



ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE CIVILĂ ȘI INSTALAȚII

ing. BAERĂ CORNELIA

TEZĂ DE DOCTORAT

CAPACITATEA DE AUTOVINDECARE A COMPOZITELOR CEMENTOASE AVANSATE INGINEREȘTI

Conducător științific,

Prof.dr.ing. MIRCEA CĂLIN



ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE CIVILĂ ȘI INSTALAȚII

ing. BAERĂ CORNELIA

TEZĂ DE DOCTORAT

CAPACITATEA DE AUTOVINDECARE A COMPOZITELOR CEMENTOASE AVANSATE INGINEREȘTI

**Conducător științific,
Prof.dr.ing. MIRCEA CĂLIN**

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

PREȘEDINTE: Prof. dr. ing. Adrian Ioani – Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

MEMBRI: Prof. dr. ing. Corneliu Bob – Universitatea “Politehnica” din Timișoara
CS II dr. ing. Henriette Szilagyí – INCD “URBAN-INCERC” Suc. Cluj-Napoca

Prof. dr. ing. Dimitrios. G. Pavlou – University of Stavanger, Norway

Associate Professor dr. ing. Todor Donchev – Kingston University,
London, United Kingdom

Conținutul acestei lucrări poate fi vizualizat, transmis și imprimat numai în scopuri personale, didactice, de cercetare și necomerciale. Dreptul de autor pentru informațiile existente în această lucrare este deținut de autorul lucrării și/sau de coordonatorul științific. Nici un material din această lucrare nu poate fi reprodus parțial, integral sau modificat fără permisiunea anterioară explicită, prin acord scris, a autorului lucrării și a coordonatorului științific.

Conținutul acestei lucrări, textele, relațiile matematice, ilustrațiile, fotografiile și orice alte materiale prezente în lucrare, sunt protejate de legea dreptului de autor.

Citarea lucrării se va face în acest format:

Baeră C., *Capacitatea de autovindecare a compozitelor cementoase avansate inginrești*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2016.

Cuvânt înainte

“Twenty years from now you will be more disappointed by the things that you didn't do than by the ones you did so. So throw off the bowlines. Sail away from the safe harbor. Catch the trade winds in your sails. Explore. Dream. Discover.” (Mark Twain)

So..I did it ☺...

Acum, la finalul călătoriei mele, aş dori să mulţumesc celor care, prin sprijinul şi încrederea ce mi-au acordat-o au făcut posibilă atingerea acestui prag...

În primul rând aş dori să acord un mare şi profund şi entuziast “Mulţumesc!!!!” celor doi mentori care m-au format, m-au clădit profesional şi nu numai, fără de care nu m-aş fi aventurat în această provocare şi fără de care, desigur, nu aş fi reuşit finalizarea stagiului doctoral: este vorba de Domnul profesor dr. ing. MIRCEA Călin, coordonator al studiilor doctorale în cadrul Universităţii Tehnice din Cluj Napoca şi Doamna dr. ing. CS II SZILAGYI Henriette, de la INCD URBAN-INCERC Sucursala Cluj-Napoca, ghid de nădejde în descifrarea misterului din matricea cementoasă şi inspiraţie vie în experienţa cotidiană prin determinare şi pasiune, seriozitate şi abnegaţie...şi caracter.

Aş dori să mulţumesc din toată inima familiei mele: mamei şi tatălui meu şi de asemenea iubitului meu Claudiu, care de departe, m-au susţinut şi m-au încurajat pas cu pas, chiar dacă poate nu m-au înţeles întotdeauna... . Vă mulţumesc că aţi rămas alături de mine până la final...şi vă asigur de toată recunoştinţa şi dragostea mea.

Mulţumiri sunt transmise coordonatorilor din Laboratorul Magnel, din cadrul Gent University (Belgia), unde am efectuat o parte al stagiului doctoral, respectiv Prof. Nele de Belie şi PhD Didier Snoeck: Thank you very much for accepting me in the lab, for sharing time and knowledge and for supporting me all the way... ☺!!

Mulţumesc din toată inima colectivului INCD URBAN-INCERC Sucursala Cluj-Napoca, unde am desfăşurat cea mai mare parte a activităţii de cercetare, colegi şi prieteni, care m-au primit în cercul intim şi solidar al colectivităţii de aici începând cu noiembrie 2012, m-au adoptat, acceptat, instruit şi ajutat pe perioada acestor patru ani... Pe rând transmit gândul bun al recunoştinţei către: Lenuţa şi dl. Rus, Andreea şi Gabi, Mirela, Micea Păstrav (Mifish), Oana şi Karcsi, Carmen Dico şi Monica, Henriette, Nicu şi Carmen (Carmencita), dl. Chiorean Ioan, Dl. Ficio Valentin şi nu în ultimul rând către dl. Florea.

De asemenea transmit recunoştinţa mea colectivului INCD URBAN-INCERC Sucursala Timişoara, unde a debutat formarea mea profesională ca şi cercetător, aproape simultan cu absolvirea facultăţii; mulţumesc Profesorilor dr. ing. Marin Marin şi Corneliu Bob pentru includerea mea în echipa INCERC Timişoara, alături de Aurelian şi Alina, Dl. Dan Vasiliu şi dl. Tarău, Şari şi dl. Florea, Felicia, şi Anamaria, Dl Mircea Ionel şi Dl. Jurca Avram, Ovidiu Murăraşu şi Nicu Armion, *dl. Ion Scordaliu (Scorda) şi dl. Ivan Nicolae, Zâna şi dl. Vasiloni, Marity Hainalca şi dl Toth, dl. Bogdanov şi dl. Ghiţă Capeta...*

Transmit mulţumiri colegilor şi colaboratorilor din cadrul Laboratorului Magnel, UGent, Belgia, care m-au ajutat şi m-au inspirat de-a lungul întregului parcurs desfăşurat acolo, departe de casă: THANK YOU MAGNEL!!!!!!

Nu în ultimul rând aş dori să multumesc prietenilor, piloni de încredere şi energie care m-au potenţat în tot acest răstimp: Henriette, Paula şi Diana, Ionel... Special thoughts of gratitude are sent to the two piles that built the strong Belgium heart inside of me... Farid and Nati ☺.

În acelaşi timp aş dori să transmit mulţumirile mele tuturor membrilor din *Comisia de analiză şi susţinere a tezei*, pentru onoarea pe care mi-au oferit-o acceptând această misiune, de evaluare, analiză şi implicit girare a materialului ştiinţific cuprins în teza de doctorat, respectiv Dlui Prof. dr. ing. Adrian Ioani în calitate de Preşdinte al acesteia, Dlui Prof. dr. ing. Călin Mircea în calitate de Coordonator ştiinţific şi referenţilor: Prof. dr. ing. Bob Corneliu (Universitatea Politehnica din Timişoara), D-na dr. ing. CS II Henriette Szilagy (INCD URBAN-INCERC Susursala Cluj Napoca); Special thanks are transmitted to the honorable reviewers from abroad, namely Prof. Dimitros G. Pavlou (University of Stavanger, Norway) and Prof. Todor Donchev (Kingston University, London, UK), for their effort in analyzing, evaluating then granting the scientific material of this present PhD thesis.

Cluj-Napoca
11.10.2016

CONȚINUT

LISTĂ SIMBOLURI	I
LISTĂ FIGURI	VI
LISTĂ TABELE	XIX
1 INTRODUCERE	1
1.1 Istoricul conceptului de autovindecare a materialelor cementoase	1
1.2. Încadrarea tezei de doctorat în domeniul științific	5
1.3 Motivația cercetării	5
1.4 Obiectivele tezei de doctorat	6
1.5 Conținutul tezei de doctorat	7
2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR	9
2.1 Conceptul de autovindecare (SH) a materialelor	9
2.2 Materiale SH. Conceptul prevenirea degradării vs managementul degradării	10
2.3 Fenomenul de autovindecare (SH) în cazul materialelor cementoase	12
2.3.1 <i>Microfisurarea și fisurarea în materialele cementoase - degradare efectivă sau cauză a degradării</i>	12
2.3.2 <i>Autovindecarea (SH) materialelor cementoase</i>	14
2.4 Fenomenul de autovindecare (SH) - direcții generale	15
2.4.1 <i>Definiții specifice</i>	15
2.4.1.1 <i>Definiții ale Institutului Japonez al Betonului (JCI)</i>	15
2.4.1.2 <i>Definiții ale Rilem TC 221-SHC</i>	17
2.4.1.3 <i>Definiții introduse de Van Tittleboom și De Belie</i>	18
2.4.2 <i>Autovindecarea autogenă</i>	19
2.4.2.1 <i>Mecanisme specifice</i>	19
2.4.2.2 <i>Factori de influență</i>	22
2.5 Modalități de evaluare a eficienței mecanismelor de autovindecare	24
2.6 Materiale compozite cementoase – ECC	25
2.6.1 <i>Definire</i>	25
2.6.2 <i>Scurt istoric</i>	25
2.6.3 <i>Fibre de armare dispersă a materialelor cementoase</i>	28
2.6.3.1 <i>Generalități</i>	28
2.6.3.2 <i>Tipuri de fibre pentru armare dispersă</i>	28
2.6.4 <i>Principii de proiectare a amestecului ECC</i>	32
2.6.5 <i>Caracteristici fizico-mecanice ale ECC</i>	34
2.6.5.1 <i>Rezistența la întindere uniaxială</i>	34
2.6.5.2 <i>Rezistența la compresiune uniaxială</i>	36
2.6.5.3 <i>Rezistența la încovoiere</i>	36
2.6.5.4 <i>Caracteristici de durabilitate</i>	37
2.6.6 <i>Familia materialelor ECC. Domenii de utilizare</i>	39

2.6.7 Mortarele ECC cu capacitate de autovindecare	40
2.6.8 Mortarul de reparație ECC	42
3. CERCETĂRI PRELIMINARE	45
3.1 Compoziții experimentale inițiale de tip ECC, realizate cu materiale locale	45
3.1.1 Principii generale de realizare a materialelor cementoase avansate SH – FECM (Fiber Engineered Cementitious Materials with Self-Healing Capacity)	45
3.1.2 Stabilirea compozițiilor materialelor cementoase avansate SH–FECM	47
3.1.3. Caracteristici ale materialelor utilizate la realizarea compozițiilor materialelor cementoase avansate SH – FECM	47
3.1.3.1 Agregate fine	47
3.1.3.2 Ciment Portland	49
3.1.3.3 Cenușă de termocentrală	49
3.1.3.4 Aditiv superplastifiant, puternic reducător de apă tip policarboxilat	51
3.1.3.5 Fibre polipropilenă	51
3.1.4 Tehnologia de realizare a materialelor cementoase avansate SH – FECM	53
3.1.4.1 Compoziții preliminare SH – FECM T1, T2, T3 și T4	53
3.1.4.2 Caracteristicile fizico-mecanice ale compozițiilor SH – FECM	55
3.1.4.2 Compoziții individualizate SH – FECM T1, T2, T3 și T4	58
4. PROIECTAREA ȘI PROPRIETĂȚILE COMPOZIȚIILOR ECC CU CAPACITĂȚE DE AUTOVIDENCARE	70
4.1 Aspecte preliminare	70
4.2 Compoziții ECC	71
4.2.1 Referințe	71
4.2.2 Materiale	71
4.2.3 Parametrii variabili	73
4.2.4 Parametrii constanți	74
4.2.5 Dozaje specifice	75
4.2.6 Secvențe specifice de malaxare	76
4.2.7 Confecționare epruvete	77
4.2.8 Caracteristici fizico-mecanice	82
4.2.8.1 Densitatea aparentă și masa volumică	82
4.2.8.2 Rezistența la întindere prin încovoiere și rezistența la compresiune	84
4.2.8.3 Evaluarea inițială a caracteristici fizico-mecanice	89
5. EVALUAREA COMPOZIȚIILOR ECC PRIN TESTE DE ÎNTINDEREA PRIN ÎNCOVOIERE 4PB	93
5.1 Metoda de încercare	93
5.2 Parametrii de investigare	96
5.3 Evaluarea capacității de autovindecare (SH)	98
5.3.1 Condiționarea cu efect de autovindecare (SH)	98
5.3.2 Capacitatea de autovindecare (SH) – parametrii investigați	100
5.3.2.1 Capacitatea de autosigilare (Self-Sealing) SS	100
5.3.2.2 Capacitatea de autoreparare (Self-Repairing) SR	100
5.4 Comportarea la diferite rate de încărcare	103

5.4.1 Compoziția martor M 1.1	103
5.4.2 Compoziția ECC M 1.4	106
5.4.3 Compoziția ECC M 1.5	110
5.4.4 Compoziția martor M 4.1	114
5.4.5 Compoziția ECC M 4.2	116
5.5 Capacitatea de autovindecare (SH)	121
5.5.1 Compoziția ECC M 1.4	121
5.5.2 Compoziția ECC M 1.5	126
5.5.3 Compoziția ECC M 4.2	131
6. EVALUAREA COMPOZIȚIILOR ECC PRIN TESTE DE IMPACT	137
6.1 Fundamentarea cercetării	137
6.2 Solicitarea de impact local	139
6.2.1 Ipotezele fundamentale ale impactului ideal elastic într-un sistem conservativ de forțe	139
6.2.1.1 Conservarea impulsului	139
6.2.1.2 Conservarea energiei	140
6.2.2 Impactul local și indicatori de autovindecare (SH)	141
6.3 Teste de impact/șoc prin metoda căderii libere (DWT)	143
6.3.1 Metoda de încercare	143
6.3.2 Evaluarea capacității de auto-vindecare (SH)	149
6.3.3 Indicatori/parametrii de evaluare a autovindecării (SH)	157
6.4 Capacitatea de autoreparare (SR)	155
6.4.1 Compoziția ECC M 1.4	155
6.4.2 Compoziția ECC M 2.2	162
6.4.3 Compoziția ECC M 3.2	168
6.4.4 Compoziția ECC M 4.2	175
6.5 Capacitatea de autosigilare (SS)	181
6.5.1 Compoziția ECC M 1.4	181
6.5.1.1 Specimenul M 1.4 R	181
6.5.1.2 Specimenul M 1.4 SH	185
6.5.2 Compoziția ECC M 2.2	192
6.5.2.1 Specimenul M 2.2 R	192
6.5.2.2 Specimenul M 2.2 SH	196
6.5.3 Compoziția ECC M 3.2	203
6.5.3.1 Specimenul M 3.2 R	203
6.5.3.2 Specimenul M 3.2 SH	207
6.5.4 Compoziția ECC M 4.2	217
6.5.4.1 Specimenul M 4.2 R	217
6.5.4.2 Specimenul M 4.2 SH	222
7 CONCLUZII	235
7.1 Îndeplinirea obiectivelor cercetării	235
7.2 Contribuții originale și concluzii finale	236
7.3 Direcții viitoare de cercetare	239

BIBLIOGRAFIE	235
ANEXA 5.1 – Analiză microscopică a evoluției fisurilor probelor ECC testate la 4PB	248
ANEXA 6.1 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 1.4 R	334
ANEXA 6.2 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 1.4 SH	338
ANEXA 6.3 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 2.2 R	343
ANEXA 6.4 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 2.2 SH	347
ANEXA 6.5 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 3.2 R	352
ANEXA 6.6 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 3.2 SH	354
ANEXA 6.7 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 4.2 R	363
ANEXA 6.8 – Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 4.2 SH	368
LISTA LUCRĂRILOR ȘTIINȚIFICE PUBLICATE PE DURATA STAGIULUI DE STUDII DOCTORALE	
LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE (2 PUBLICAȚII)	

LISTĂ SIMBOLURI

σ_{fc} - Rezistența la fisurare prin încovoiere 4PB (efortul aferent producerii primei fisuri în epruvetă, corespunzând primei căderi de forță), MPa

σ_{fc}^I – Efortul aferent producerii primei fisuri în epruvetă, corespunzând primei căderi de forță în ciclul I de preîncărcare, MPa;

σ_{fc}^{II} - Efortul aferent producerii primei fisuri în epruvetă, corespunzând primei căderi de forță în ciclul II de reîncărcare, MPa;

σ_{cu} - Rezistența la întindere prin încovoiere 4PB (efortul maxim atins sub sarcină), MPa;

σ_{cu}^I – Efortul maxim atins sub sarcină în ciclul I de preîncărcare, MPa;

σ_{cu}^{II} - Efortul maxim atins sub sarcină în ciclul II de reîncărcare, MPa;

σ_u – Efortul ultim atins sub sarcină, înainte de relaxare, MPa;

σ_u^I – Efortul ultim atins sub sarcină, înainte de relaxare, în ciclul I de preîncărcare, MPa;

σ_u^{II} – Efortul ultim atins sub sarcină, înainte de relaxare, în ciclul II de reîncărcare, MPa;

ε_{fc} - deformația specifică aferentă efortului de fisurare σ_{fc} , %;

ε_{cu} - deformația specifică aferentă rezistenței la fisurare σ_{fc} , %;

ε_{max} - deformația specifică maximă sub încărcare, %;

ε_r - deformația specifică remanentă (reziduală), după îndepărtarea încărcării %;

ε_{fc}^I - deformația specifică aferentă efortului de fisurare σ_{fc}^I produs în ciclul I de preîncărcare, %;

ε_{fc}^{II} - deformația specifică aferentă efortului de fisurare σ_{fc}^{II} produs în ciclul II de reîncărcare, %;

ε_{cu}^I - deformația specifică aferentă efortului maxim atins sub sarcină în ciclul I de preîncărcare σ_{cu}^I , %;

ε_{cu}^{II} - deformația specifică aferentă efortului maxim atins sub sarcină în ciclul II de reîncărcare σ_{cu}^{II} , %;

ε_{max}^I - deformația specifică maximă sub încărcarea aferentă ciclului I de preîncărcare, %;

ε_{max}^{II} - deformația specifică maximă sub încărcarea aferentă ciclului II de reîncărcare, %;

ε_r^I - deformația specifică remanentă (reziduală), după îndepărtarea încărcării aferentă

ciclului I de preîncărcare, %;

$\varepsilon_r^{\text{II}}$ - deformația specifică remanentă (reziduală), după îndepărtarea încărcării aferentă ciclului II de reîncărcare, %;

F_{fc} – Forța la fisurare în cadrul încercării 4PB (determină apariția primei fisuri în epruvetă), kN;

F_{cu} – Forța maximă atinsă în cadrul încercării 4PB, kN;

v_{fc} – Deplasarea verticală la care este inițiată apariția primei fisuri în epruvetă, la solicitare 4PB, mm;

v_{cu} – Deplasarea verticală corespunzătoare efortului maxim atins în epruvetă la solicitarea 4PB, mm;

SR- E^{SH} - Recuperarea elasticității (E_t) prin raportarea parametrică efectuată în cadrul probei SH, ciclul I de încărcare (I, $v = 1.5$ mm) față de ciclul de reîncărcare (II, SH);

SR- $E^{\text{SH-R}}$ - Recuperarea elasticității (E_t) prin raportarea parametrică efectuată între proba SH, după finalizarea ciclului de reîncărcare (II, SH) și proba R, testată până la rupere (R);

$E_{t,\text{loading}}$ - Modulul de elasticitate tangent, respectiv panta la curba efort - deformație specifică σ - ε , în stadiul inițial al încărcării, GPa;

$E_{t,\text{release}}$ - Modulul de elasticitate caracteristic relaxării, respectiv panta definită de punctul (σ_u ; ε_{max}) – efort ultim/deformație specifică maximă sub încărcare și punctul (0; ε_r), (efort nul după descărcare și deformația specifică remanentă), GPa;

$E_{t,\text{loading}}^{\text{I}}$ - Modulul de elasticitate tangent, respectiv panta la curba efort - deformație specifică σ - ε , în stadiul inițial al încărcării în ciclul I de încărcare, GPa;

$E_{t,\text{loading}}^{\text{II}}$ - Modulul de elasticitate tangent, respectiv panta la curba efort - deformație specifică σ - ε , în stadiul inițial al încărcării în ciclul II de reîncărcare, GPa;

$E_{\text{release}}^{\text{I}}$ - Modulul de elasticitate caracteristic relaxării și aferent ciclului I de preîncărcare, GPa;

$E_{\text{release}}^{\text{II}}$ - Modulul de elasticitate caracteristic relaxării și aferent ciclului II de reîncărcare, GPa;

MC - Intervalul de autoconsolidare „strain hardening”, pe parcursul căruia are loc dezvoltarea microfisurării multiple sub sarcină, definit ca și diferența dintre deformația specifică maximă (ε_{max}) și deformația aferentă efortului de fisurare σ_{fc} (ε_{fc}), %;

MC* - Intervalul de autoconsolidare „strain hardening” cu creștere de rezistență, pe parcursul căruia are loc microfisurarea multiplă simultan cu creșterea eforturilor σ și este

definit ca diferența dintre deformația specifică aferentă efortului maxim atins σ_{cu} , (ε_{cu}) și deformația aferentă efortului de fisurare σ_{fc} (ε_{fc}), %;

MC_I - Intervalul de autoconsolidare „strain hardening” aferent ciclului I de preîncărcare, %;

MC_{II} - Intervalul de autoconsolidare „strain hardening” aferent ciclului II de reîncărcare, %;

MC^*_I - *Intervalul de autoconsolidare „strain hardening”* aferent ciclului I de preîncărcare, %;

MC^*_{II} - *Intervalul de autoconsolidare „strain hardening”* aferent ciclului II de reîncărcare, %;

$SR-E^{SH}$ - Recuperarea elasticității, exprimată ca și raportare parametrică (E_t) efectuată în cadrul probei SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) vs. ciclul I de încărcare (I, $v = 1.5$ mm);

$SR-E^{SH-R}$ - Recuperarea elasticității, exprimată ca și raportare parametrică (E_t) efectuată între proba SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) și proba R, testată până la rupere (R);

$SR-\sigma_{fc}^{SH}$ - Recuperarea rezistenței la fisurare, exprimată ca și raportarea parametrică (σ_{fc}) efectuată în cadrul probei SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) vs. ciclul I de încărcare (I, $v = 1.5$ mm);

$SR-\sigma_{fc}^{SH-R}$ - Recuperarea rezistenței la fisurare, exprimată ca și raportare parametrică (σ_{fc}) efectuată între proba SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) și proba R, testată până la rupere (R);

$SR-\sigma_{cu}^{SH}$ - Recuperarea rezistenței la întindere prin încovoiere 4PB, exprimată ca și raportarea parametrică (σ_{cu}) efectuată în cadrul probei SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) vs. ciclul I de încărcare (I, $v = 1.5$ mm);

$SR-\sigma_{cu}^{SH-R}$ - Recuperarea rezistenței la întindere prin încovoiere 4PB, exprimată ca și raportare parametrică (σ_{cu}) efectuată între proba SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) și proba R, testată până la rupere (R);

$SR-MC^{SH}$ - Recuperarea capacității de microfisurare, exprimată ca și raportarea parametrică (MC) efectuată în cadrul probei SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) vs. ciclul I de încărcare (I, $v = 1.5$ mm);

$SR-MC^{SH-R}$ - Recuperarea rezistenței la întindere prin încovoiere 4PB, exprimată ca și raportare parametrică (MC) efectuată între proba SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II,

SH) și proba R, testată până la rupere (R);

SR-MC*^{SH} – Recuperarea capacității de microfisurare, exprimată ca și raportarea parametrică (MC*) efectuată în cadrul probei SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) vs. ciclul I de încărcare (I, $v = 1.5$ mm);

SR-MC*^{SH-R} – Recuperarea rezistenței la întindere prin încovoiere 4PB, exprimată ca și raportare parametrică (MC*) efectuată între proba SH, respectiv ciclul de reîncărcare (II, SH) și proba R, testată până la rupere (R);

N – Numărul total de fisuri dezvoltate în pe parcursul încărcării 4PB până la rupere (R), aferent probelor R;

n – Numărul de fisuri dezvoltate în cadrul ciclului inițial de încărcare 4PB, (I, $v = 1.5$) aferent probelor SH;

N* – Numărul total de fisuri dezvoltate în probele SH cumulat, după efectuarea ambelor cicluri 4PB, specific, aferent probelor SH;

w_{max} – Deschiderea maximă de fisurare la momentul evaluării, μm , mm;

w_{min} – Deschiderea minimă de fisurare la momentul evaluării, μm , mm;

w_{med} – Deschiderea medie de fisurare la momentul evaluării, μm , mm;

cr – Coeficientul de restituire, definit ca și raportul între impulsul masei corpului de impact, premergător contactului și imediat după desprinderea acestuia de epruvetă;

k – reprezintă ciclul de încărcare DWT, caracterizat de înălțimea de lansare a corpului de impact, $k = I, II, III$ sau $k = I^*$;

i – reprezintă numărul loviturii corpului de impact, din cursul unui ciclu de încărcare DWT, $i = 1 \div 5$;

δw_i^k – Săgeata relativă incrementală, definită ca și deplasare survenită ca urmare a fiecărei lovituri a corpului de impact, mm;

Δw^k – Revenirea elastică, definită ca și reducere a deplasării cumulate după efectuarea fiecărui ciclu de încărcare a câte 5 șocuri, ca efect al relaxării epruvetei timp de 60 minute, mm;

w_R^k – Săgeata totală R, definită ca și deplasării cumulate progresiv în probele R pe măsura efectuării tuturor ciclurilor de șocuri, până în momentul consemnării ruperii, mm;

$w_{R,pl}^k$ – Săgeata remanentă totală R, definită ca și deplasarea cumulate progresiv în epruvetele R, pe măsura efectuării tuturor ciclurilor de șocuri până în momentul consemnării ruperii, împreună cu relaxarea elastică, aferentă de asemenea fiecărui ciclu

de șocuri, mm;

$w_{I^*}^k$ – Săgeata totală I^* , definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH, pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclului inițial $k = I^*$, mm;

$w_{I^*,pl}^k$ – Săgeata remanentă I^* , definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclului inițial I^* , împreună cu relaxarea elastică aferentă ciclului I^* , mm;

w_{SH}^k – Săgeata totală SH, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH în cadrul efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare, I, II și III, după condiționarea SH, mm;

$w_{SH,pl}^k$ – Săgeata remanentă SH, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare $k = I, II, III$, după condiționarea SH, împreună cu relaxarea elastică, aferentă de asemenea fiecărui ciclu de șocuri, mm;

$w_{SH}^{k,abs}$ – Săgeata absolută (SH), definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH în cadrul efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare, după condiționarea SH, cumulate deplasării inițiale, rezultată în urma ciclului inițial de încărcare, $k = I^*$, mm;

$w_{SH}^{k,pl}$ – Săgeata remanentă absolută (SH), definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare: $k = I, II, III$, după condiționarea SH, împreună cu relaxarea elastică, aferentă de asemenea fiecărui ciclu de șocuri, cumulate deplasării inițiale și relaxării aferente, rezultate în urma ciclului inițial de încărcare $k = I^*$, mm;

$\delta w_{i,inst}^k$ – Săgeata instantanee incrementală, definită ca și maximul deplasării atinse în epruvetă în cursul fiecărui șoc aplicat acesteia prin căderea masei de impact și surprinsă prin înregistrările în timp real a dispozitivului laser, mm;

$\delta w_{i,inst}^{k,pl}$ – Săgeata remanentă instantanee, definită ca și deplasarea atinsă în epruvete (R și SH) în cursul fiecărui șoc aplicat acestora prin căderea masei de impact, după aproximativ 10 s de la înregistrarea valorii maxime a deplasării (săgeții instantanee) și surprinsă prin înregistrările în timp real a dispozitivului laser, mm;

ire – Revenirea instantanee elastică, definită ca și reducere a deformației instantanee și determinată ca și diferență între maximul deformației (δs_i^k) și deformația instantanee remanentă (δrs_i^k), diferență raportată la valoarea săgeții instantanee, %.

LISTĂ FIGURI

Fig. 1.1. Zidul lui Hadrian, sec.II d.Hr.	1
Fig. 1.2. Structura unui perete roman: cofraj și umplutura	2
Fig. 1.3. Forul Roman, sec I î.Hr. – I d.Hr.	4
Fig. 1.4. Pod vechi din Amsterdam	4
Fig. 2.1. Evoluția publicațiilor în domeniul materialelor SH	10
Fig. 2.2. Fisuri și microfisuri în beton	13
Fig. 2.3. Diagrama Venn asupra conceptului autovindecare/autoreparare al JCI, 2009	16
Fig. 2.4. Autovindecarea betonului - definiție a conceptului prin relația proces – acțiune	18
Fig. 2.5. Mecanisme în compozite cementoase care determină vindecarea autogenă	20
Fig. 2.6. Declanșarea precipitării carbonatului de calciu ca urmare a interacțiunii matricei cementoase cu medii aer – apă	21
Fig. 2.7. Scăderea coeficientului de permeabilitate la apă prin procesul de închidere a fisurii, pentru diferite deschideri și compoziții	23
Fig. 2.8. Curba efort-deformație la solicitare de întindere uniaxială: beton obișnuit; FRC și HPRCC	27
Fig. 2.9. Tipuri de fibre pentru armarea dispersă	29
Fig. 2.10. Propagarea stării de microfisurare în material ECC, satisfăcând criteriul energetic	33
Fig. 2.11. Curba caracteristică pentru epruvete ECC; evoluția deschiderii fisurii ca funcție de deformația specifică la întindere (impusă)	35
Fig. 2.12. a) ECC (M45) – Evoluția în timp a rezistenței la compresiune; b) Epruvetă cilindrică ECC după cedare la solicitare la compresiune	36
Fig. 2.13. a) ECC – Rezistența la încovoiere a) Curba încărcare – săgeată pentru o epruvetă ECC; b) epruvetă supusă la încovoiere și săgeata sub efortul	

indus; c) microfisurare în cadrul solicitării la încovoiere	37
Fig. 2.14. Autovindecarea microfisurilor în ECC. Mecanismul de închidere a fisurilor: a) înainte de vindecare; b) după vindecare	41
Fig. 2.15. Produși de precipitare depuși de-a lungul fibrelor	41
Fig. 2.16. Mecanismul de închidere a fisurilor în ECC prin combinația precipitării carbonatului de calciu și al produșilor de hidratare continuă C-S-H	42
Fig. 2.17. Epruvetă ECC supusă la încovoiere: conformație și schema de încărcare	43
Fig. 2.18 Diagrama efort-deformație pentru epruvete consolidate cu material de reparație	43
Fig. 2.19. Modalități de rupere - Epruvete de beton consolidate cu mortare de reparație, a) Epruvetă PC/PC; b) Epruvetă SFRC/PC; c) Epruvetă E-ECC/PC)	44
Fig. 2.20. Răspunsul încărcare – deplasare pentru epruvetele a, b și c din Figura 2.19	44
Fig. 3.1. Nisip silicios fin, utilizat la realizarea compozițiilor prototip SH-FECM	48
Fig. 3.2. Curba granulometrică a nisipului silicios fin	48
Fig. 3.3. Ciment Portland, utilizat la realizarea compozițiilor prototip SH-FECM	49
Fig. 3.4. Cenușă de termocentrală Govora	49
Fig. 3.5. Prepararea / testare probelor de ciment și ciment + cenușă	50
Fig. 3.6. Fibre de polipropilenă MASTERFIBER® 246	51
Fig. 3.7. Fibre de polipropilenă EUROFIBRES MF FINE + 1217	52
Fig. 3.8. Compoziții prototip SH – FECM T1 – T4; secvențe de malaxare	54
Fig. 3.9. Compoziții prototip SH – FECM T1 – T2; stare proaspătă	55
Fig. 3.10 Compoziții prototip SH – FECM T3 – T4; stare proaspătă	55
Fig. 3.11 Compoziții prototip SH – FECM T3 – T4 (epruvete prismatice)	56
Fig. 3.12 Epruvete prismatice după testarea la întindere prin încovoiere	57

Fig. 3.13 Nodul hibrid antiseismic - ansamblu	58
Fig. 3.14 Nodul hibrid antiseismic – detaliu de colț, îmbinare grindă-stâlp	59
Fig. 3.15 Nodul hibrid antiseismic (plan) – detaliu de îmbinare grindă-stâlp	59
Fig. 3.16 Compoziții SH – FECM T12, T13 și T14 în stare proaspătă	61
Fig. 3.17 Epruvete SH – FECM T12, T13 și T14	62
Fig. 3.18 Compoziție SH – FECM T15 – stare proaspătă	63
Fig. 3.19 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – stare proaspătă și întărită	64
Fig. 3.20 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – solicitare la încovoiere în trei puncte; test inițial	64
Fig. 3.21 Epruvete prismatice 1 și 2 (SH – FECM T15) – evoluție fisuri	66
Fig. 3.22. Epruvetă prismatică 3 (SH – FECM T15) – evoluție fisuri	67
Fig. 3.23 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – solicitare la încovoiere în trei puncte; test final, după condiționare	68
Fig. 3.24 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – solicitare la compresiune	69
Fig. 4.1. Mortare ECC - materiale componente	72
Fig. 4.2. Malaxor cu paletă conform EN 196-1 [45] (Laboratorul Magnel)	76
Fig. 4.3. Turnare ECC: epruvete 40x10x160 mm (4 PB)	78
Fig. 4.4. Turnare experimentală ECC: plăci 200x200x15 mm (DWT -1)	79
Fig. 4.5. Turnare experimentală ECC: plăci 200x200x15 mm (DWT -2)	80
Fig. 4.6. Turnare experimentală ECC: plăci 200x200x15 mm (DWT -3)	81
Fig. 4.7. Epruvetă ECC tip placă, decofrare parțială la 24 h	82
Fig. 4.8. Epruvetă ECC amplasate în incinta de condiționare cu RH 95±5 %	82
Fig. 4.9. Compoziții ECC: Densitate aparentă în stare uscată	83
Fig. 4.10. Compoziții ECC: Epruvete 40 x 40 x 160 mm	85
Fig. 4.11. Compoziții martor (fără fibre): Epruvete supuse la 3PB: cedare casantă sub sarcină	85

Fig. 4.12. Compoziții ECC: epruvete supuse la 3PB: evidențierea efectului de microfisurare sub sarcină	86
Fig. 4.13. Compoziții martor (fără fibre): epruvete supuse la compresiune cedare casantă sub sarcină	86
Fig. 4.14. Compoziții ECC: epruvete supuse la 3PB: evidențierea stării de microfisurare sub sarcină	87
Fig. 4.15. Rezistența la întindere prin încovoiere 3PB, la vârsta de 28 și 60 zile	87
Fig. 4.16. Compoziții ECC: evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere 3PB de la 28 zile la 60 zile	88
Fig. 4.17. Compoziții ECC: rezistența la compresiune la 28 și 60 zile	88
Fig. 4.18. Compoziții ECC: evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere de la 28 zile la 60 zile	88
Fig. 4.19. Compoziții martor: evoluția densității aparente în stare uscată funcție de creșterea cantității de FA în compoziții	89
Fig. 4.20. Compoziții martor: evoluția rezistenței la compresiune, la vârsta de 28 zile și 60 zile, funcție de creșterea cantității de FA în compoziții	90
Fig. 4.21. Compoziții martor: evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere 3PB, la vârsta de 28 zile și 60 zile, în funcție de creșterea cantității de FA în compoziții	92
Fig. 5.1. Schema de încărcare la întindere prin încovoiere 4PB a epruvetelor ECC	94
Fig. 5.2. Test 4PB a epruvetelor ECC: e sub încărcare: evidențierea deformației verticale și formarea rețelei de microfisuri	95
Fig. 5.3. Curba caracteristică σ - ε a epruvetelor ECC supuse la întindere prin încovoiere 4PB; evidențierea parametrilor caracteristici, relevanți	97
Fig. 5.4. Efectuarea ciclurilor de autovindecare (SH)	99
Fig. 5.5. Curba specifică efort - deformație σ - ε a epruvetelor ECC SH supuse la întindere prin încovoiere 4PB, ciclul preîncărcare (I) și expunere la 28 cicluri de autovindecare și reîncărcare (II) până la cedare; parametrii caracteristici	101
Fig. 5.6. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție martor M 1.1, înainte și după încercare	104

Fig. 5.7. Epruvete martor M 1.1: diagramele σ - ϵ la 4PB utilizând ratele de încărcare: a) I; b) II și c) III.	105
Fig. 5.8. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.4.	106
Fig. 5.9. Epruvetă prismatică 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.4, după cedare.	106
Fig. 5.10. ECC M 1.4: diagrame σ - ϵ la 4PB sub diferite rate de încărcare.	107
Fig. 5.11. ECC M 1.4: diagrame σ - ϵ suprapuse la 4PB sub diferite rate de încărcare.	108
Fig. 5.12. ECC M 1.4: evoluția fisurilor după expunere la ciclurile de autovindecare: fisuri sigilate integral și fisuri sigilate parțial.	109
Fig. 5.13. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.5.	110
Fig. 5.14. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.5, după cedare.	111
Fig. 5.15. ECC M 1.5: diagrame σ - ϵ la 4PB sub diferite rate de încărcare.	112
Fig. 5.16. ECC M 1.5 : diagrame σ - ϵ suprapuse la 4PB sub diferite rate de încărcare.	112
Fig. 5.17. ECC M 1.4: evoluția fisurilor după expunere la ciclurile de autovindecare: fisuri sigilate integral și fisuri sigilate parțial.	114
Fig. 5.18. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție martor M 4.1.	115
Fig. 5.19. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție martor M 4.1, după cedare.	115
Fig. 5.20. Epruvete martor M 4.1: diagramele σ - ϵ la 4PB utilizând ratele de încărcare: a) I; b) II.	116
Fig. 5.21. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 4.2.	116
Fig. 5.22. Epruvetă prismatică 10x40x160 mm, compoziție ECC M 4.2, după cedare.	117
Fig. 5.23. ECC M 4.2: diagrame σ - ϵ la 4PB sub diferite rate de încărcare.	117
Fig. 5.24. ECC M 4.2 : diagrame σ - ϵ suprapuse la 4PB sub diferite rate de încărcare.	118
Fig. 5.25. ECC M 4.2: evoluția fisurilor după expunere la ciclurile	

de autovindecare: fisuri sigilate integral și fisuri sigilate parțial	120
Fig. 5.26. ECC M 1.4, SH: diagrame σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare; stânga: curba SH; dreapta: suprapunerea diagramelor R - SH	122
Fig. 5.27. ECC M 1.4 SH: diagrame suprapuse σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare	123
Fig. 5.28. ECC M 1.5, SH: diagrame σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare; stânga: curba SH; dreapta: suprapunerea diagramelor R - SH	127
Fig. 5.29. ECC M 1.5 SH: diagrame suprapuse σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare	128
Fig. 5.30. ECC M 4.2, SH: diagrame σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare; stânga: curba SH; dreapta: suprapunerea diagramelor R - SH	134
Fig. 5.31. ECC M 4.2 SH: diagrame suprapuse σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare	135
Fig. 6.1. Impact gravitațional (cădere liberă): conservarea energiei	141
Fig. 6.2. Secvențe esențiale ale încercării la șoc (impact local)	142
Fig. 6.3. Epruvete ECC tip placă cu dimensiunile 200×200×15, după decofrare	144
Fig. 6.4. Epruvete ECC tip placă cu dimensiunile 200×200×13 mm pentru încercarea la impact (șoc), după nivelare	144
Fig. 6.5. Stand pentru încercarea la impact (șoc): a) imagine de ansamblu; b) detaliu rezemare probă ; c) dispozitiv captare date privind evoluția săgeții sub sarcină	145
Fig. 6.6. Evaluare evoluție microfisuri: a) riglă de fisuri amplasată sub lupă de citit fisuri; b) evaluarea microscopică a fisurilor indusă în plăcile ECC prin încercarea de impact: microscop Leica, camera captare imagini și PC pentru înregistrare/prelucrare date	147
Fig. 6.7. Monitorizarea epruvetei ECC sub impact cu ajutorul aparatului HSC: a) moment prior impactului, când masa de impact coboară spre epruveta amplasată în stand; b) momentul contactului între cele două corpuri; c) corpul de impact este respins de către epruveta ECC și atinge înălțimea maximă de recul	148
Fig. 6.8. Probe martor (fără fibre) supuse încercării la șoc. Cedare	

casantă după efectuarea primului șoc ($h = 0.5m$): a) compoziția martor M 1.1; b) mortar martor.....	151
Fig. 6.9. Curba timp - deplasare pentru evoluția săgeții instantanee (vârf și relaxare) în timp real, cf. înregistrărilor dispozitivului laser: a) grafic aferent intervalului 0 – 8s; b) identificarea intervalului aferent vârfului de deplasare, surprins în intervalul 2.52 – 3.52 s.....	154
Fig. 6.10. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH.....	157
Fig. 6.11. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH.....	157
Fig. 6.12. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH.....	158
Fig. 6.13. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH.....	158
Fig. 6.14. Capacitatea de revenire elastică, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH.....	159
Fig. 6.15. Evoluția săgeții remanente, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH (Ciclul I* și ciclurile SH).....	159
Fig. 6.16. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 1.4 R.....	160
Fig. 6.17. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 1.4 SH.....	160
Fig. 6.18. Evoluția comparativă a săgeții instantanee, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH.....	161
Fig. 6.19. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH.....	161
Fig. 6.20. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH.....	163
Fig. 6.21. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH.....	164
Fig. 6.22. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH.....	164

Fig. 6.23. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH	165
Fig. 6.24. Capacitatea de revenire elastică, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH	165
Fig. 6.25. Evoluția săgeții remanente, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH (Ciclul I* și ciclurile SH)	166
Fig. 6.26. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 2.2 R	166
Fig. 6.27. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 2.2 SH	167
Fig. 6.28. Evoluția comparativă a săgeții instantanee, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH	167
Fig. 6.29. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 2.2 R vs. M 2.2SH	168
Fig. 6.30. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH	170
Fig. 6.31. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH	170
Fig. 6.32. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH	171
Fig. 6.33. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH	171
Fig. 6.34. Capacitatea de revenire elastică, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH	172
Fig. 6.35. Evoluția săgeții remanente, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH (Ciclul I* și ciclurile SH)	172
Fig. 6.36. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 3.2 R	173
Fig. 6.37. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 3.2 SH	173
Fig. 6.38. Evoluția comparativă a săgeții instantanee, proba M 3.2 R	

vs. M 3.2 SH	174
Fig. 6.39. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH	174
Fig. 6.40. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH	176
Fig. 6.41. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH	177
Fig. 6.42. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH	177
Fig. 6.43. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH	178
Fig. 6.44. Capacitatea de revenire elastică, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH	178
Fig. 6.45. Evoluția săgeții remanente, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH (Ciclul I* și ciclurile SH)	179
Fig. 6.46. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 4.2 R	179
Fig. 6.47. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 4.2 SH	180
Fig. 6.48. Evoluția comparativă a săgeții instantanee, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH	180
Fig. 6.49. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH	181
Fig. 6.50. Evoluția rețelei de microfisure pentru proba M 1.4 R, Ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	182
Fig. 6.51. M 1.4 R, Ciclul I, rețea microfisure: detalii (microscop)	182
Fig. 6.52. M 1.4 R, Ciclul I, rețea microfisure: detaliu (microscop) de microfisure discrete (5-15 μm)	183
Fig. 6.53. M 1.4 R, Ciclul II, rețea microfisure: (stânga: ansamblul rețelei dreapta: detaliu central - microscop)	183

Fig. 6.54. M 1.4 R, Ciclul II, rețea microfisuri: stânga – dezvoltare ramificații periferice; dreapta – fisuri zonă de prindere, fața superioară	184
Fig. 6.55. M 1.4 R, Ciclul II, rețea microfisuri: (stânga sus: ansamblul rețelei; dreapta sus; centru jos: detaliu central - microscop)	185
Fig. 6.56. Evoluția rețelei de microfisure pentru proba M 1.4 SH, ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	186
Fig. 6.57. M 1.4 SH: Evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS	187
Fig. 6.58. M 1.4 SH: Evaluarea (prin analiză microscopică) a capacității SS; detalii de fisuri închise parțial (stânga) și complet (dreapta)	187
Fig. 6.59. M 1.4 SH, Ciclul I, rețea microfisuri (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	188
Fig. 6.60. M 1.4 SH, ciclul I: a), c) după autovindecare; b), d) după retestare	189
Fig. 6.61. M 1.4 SH, ciclul I: fisură nouă dezvoltată în vecinătatea fisurii vechi, sigilate	189
Fig. 6.62. M 1.4 SH, ciclul II, rețea microfisuri (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	190
Fig. 6.63. M 1.4 SH, ciclul II, rețea microfisuri	190
Fig. 6.64. M 1.4 SH, ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	191
Fig. 6.65. M 1.4 SH, ciclul III	191
Fig. 6.66. Evoluția rețelei de microfisure pentru proba M 2.2 R, ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	192
Fig. 6.67. M 2.24 R, ciclul I, rețea microfisuri	193
Fig. 6.68. Evoluția rețelei de microfisure pentru proba M 2.2 R, ciclul II (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	193
Fig. 6.69. M 2.24 R, Ciclul II, rețea microfisuri	194
Fig. 6.70. Evoluția rețelei de microfisure pentru proba M 2.2 R, ciclul III (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	194

Fig. 6.71. M 2.2 R, ciclul III, rețea microfisuri	195
Fig. 6.72. M 2.2 R: Fisura din zona mediană după aplicare șocului ultime de la înălțimea $h = 2.0$ m	195
Fig. 6.73. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 2.2 SH, Ciclul I* (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	196
Fig. 6.74. M 2.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS	197
Fig. 6.75. M 2.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; Fisuri cu grad redus de sigilare	198
Fig. 6.76. M 2.2 SH, ciclul I, rețea microfisuri	199
Fig. 6.77. M 2.2 SH, ciclul II, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	200
Fig. 6.78. M 2.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare)	200
Fig. 6.79. M 2.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare – microfisură nouă și fisură ce redeschisă sub șocuri)	201
Fig. 6.80. M 2.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare)	201
Fig. 6.81. M 2.2 SH, Ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	202
Fig. 6.82. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 R, ciclul I, detalii (microscop) pentru perimetrul central	203
Fig. 6.83. M 3.2 R, ciclul I, rețea microfisuri: a) microfisuri cu ramificații; b) microfisuri discrete $w=8...15$ μm	204
Fig. 6.84. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 R, Ciclul II, detalii (microscop) pentru perimetrul central	204
Fig. 6.85. M 3.2 R, ciclul II, rețea microfisuri	205
Fig. 6.86. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 R,	

Ciclul III (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	206
Fig. 6.87. M 3.2 R, ciclul III, rețea microfisuri	206
Fig. 6.88. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 SH, ciclul I* (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	207
Fig. 6.89. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS: fisuri nesigilate după expunerea probei la condiționarea SH	208
Fig. 6.90. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri cu grad redus de sigilare: a): fisură inițială după ciclul I*; b), c): fisură parțial închisă după condiționarea SH și detaliu produși de sigilare; d) fisură inițială; e) fisură parțial închisă	209
Fig. 6.91. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri sigilate complet: a): fisură inițială după ciclul I*; b): fisură sigilată după condiționarea SH	210
Fig. 6.92. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri sigilate complet: a): fisură inițială după ciclul I*; b): fisură sigilată după condiționarea SH	210
Fig. 6.93. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; detalii de fisuri parțial sau complet sigilate	211
Fig. 6.94. M 3.2 SH, ciclul I, rețea microfisuri	212
Fig. 6.95. M 3.2 SH, ciclul I, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului I de încărcare)	212
Fig. 6.96. M 3.2 SH, ciclul I, evoluția rețelei de microfisuri prin apariția de noi microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului I de încărcare)	213
Fig. 6.97. M 3.2 SH, ciclul II, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	214
Fig. 6.98. M 3.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după ciclul I; dreapta: microfisuri după ciclul II de încărcare)	214
Fig. 6.99. M 3.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare – microfisură nouă și fisură redeschisă sub șocuri)	214

Fig. 6.100. M 3.2 SH, Ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: exindere și ramificare fisuri existente; dezvoltare microfisuri noi	215
Fig. 6.101. M 3.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri	215
Fig. 6.102. M 3.2 SH, ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	216
Fig. 6.103. M 3.2 SH, ciclul III, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după ciclul II; dreapta: microfisuri după ciclul III de încărcare)	217
Fig. 6.104. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 4.2 R, ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	218
Fig. 6.105. M 4.2 R, ciclul I, rețea microfisuri: a) mMicrofisuri cu ramificații; b) microfisuri discrete $w=8...15 \mu\text{m}$	218
Fig. 6.106. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 4.2 R, ciclul II, (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	219
Fig. 6.107. M 4.2 R, ciclul II, rețea microfisuri	220
Fig. 6.108. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 4.2 R, ciclul III (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	221
Fig. 6.109. M 4.2 R, ciclul III, rețea microfisuri	222
Fig. 6.110. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 4.2 SH, Ciclul I* (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	223
Fig. 6.111. M 4.2 SH:e (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS: fisuri nesigilate după expunerea probei la condiționarea SH	224
Fig. 6.112. M 4.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri cu grad redus de sigilare: a), c): fisură inițială după ciclul I*; b), d): fisură parțial închisă după condiționarea SH și detaliu produși de sigilare	225
Fig. 6.113. M 4.2 SH: Evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; Fisuri sigilate complet după condiționarea SH	226
Fig. 6.114. M 4.2 SH, ciclul I, rețea microfisuri	227
Fig. 6.115. M 4.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea	

ciclului I de încărcare)	228
Fig. 6.116. M 4.2 SH, ciclul II, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	229
Fig. 6.117. M 4.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: stânga: microfisuri după ciclul I; dreapta: microfisuri după ciclul II de încărcare	230
Fig. 6.118. M 4.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri prin dezvoltarea de noi microfisuri sub șocurile ciclului II	231
Fig. 6.119. M 4.2 SH, ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)	232
Fig. 6.120. M 4.2 SH, ciclul III, evoluția rețelei prin dezvoltarea unui număr semnificativ de microfisuri și ramificații sub succesiunea șocurilor	232
Fig. 6.121. M 4.2 SH, Ciclul III, evoluția rețelei de microfisuri: stânga: microfisuri după Ciclul II; dreapta: microfisuri după ciclul III de încărcare	233
Fig. 7.1. Coeficienți de restituire la testul de impact a) ciclul I $h=0.5$ m; b) ciclul II $h=1.0$ m; c) ciclul III $h=1.5$ m	237
Fig. 7.2. Indicele de revenire elastică la testul de impact a) ciclul I $h=0.5$ m; b) ciclul II $h=1.0$ m; c) ciclul III $h=1.5$ m	238

LISTĂ TABELE

Tab. 2.1. Sinteza tehnicilor și determinărilor în domeniul SH	24
Tab. 3.1. Fișa compoziției ECC-M45	46
Tab. 3.2. Caracteristici fizico-mecanice ale fibrei PVA utilizată la realizarea ECC-M45	46
Tab. 3.3. Analiza granulometrică a nisipului silicios fin	48
Tab. 3.4. Caracteristici fizico-mecanice ale cenușii de termocentrală Govora - determinări CEPROCIM	50
Tab. 3.5. Determinarea indicelui de activitate pozzolanică pentru cenușă de termocentrală Govora. Caracteristici fizico-mecanice	51
Tab. 3.6. Caracteristici fizico-mecanice ale fibrelor MASTERFIBER® 246*	52
Tab. 3.7. Caracteristici ale fibrelor PP EUROFIBRES MF FINE + 1217	52
Tab. 3.8. Fișe compoziții SH – FECM T1 – T4	54
Tab. 3.9. Caracteristici mecanice compozițiile T1 – T4	57
Tab. 3.10. Caracteristici mecanice compozițiile martor Tm1 – T4m	57
Tab. 3.11. Fișe compoziții SH – FECM T12 – T14	60
Tab. 3.12. Caracteristici mecanice compozițiile T12 – T14	61
Tab. 3.13. Fișă compoziție SH – FECM T15	63
Tab. 3.14. Compoziția SH–FECM T15 – solicitare la încovoiere – 20 zile	65
Tab. 3.15. Compoziția SH–FECM T15 – solicitare la încovoiere – după cicluri de condiționare	67
Tab. 4.1. Materiale componente ale compozițiilor ECC	72
Tab. 4.2. Compoziții principale ECC (în funcție de FA/C): M1, M2, M3 și M 4	75
Tab. 4.3. Compoziții complementare ECC: M1 (Raport FA/C = 1.0;	

variația tipului de fibre și a procentului de armare)	75
Tab. 4.4. Densitate aparentă și mase volumice ale compozițiilor ECC la vârste relevante și condiționări specifice	84
Tab. 4.5. Proprietăți fizico-mecanice ale compozițiilor ECC, la vârsta de 28 zile și respectiv 60 zile; creșteri procentuale de rezistență	87
Tab. 5.1. Rate de încărcare utilizate în cadrul încercării 4PB	96
Tab. 5.2. Compoziția martor M 1.1: rezistența la întindere prin încovoiere 4PB și deformații specifice aferente	104
Tab. 5.3. Compoziția consacrată ECC M 1.4: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare	107
Tab. 5.4. Compoziția consacrată ECC M 1.4: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare	107
Tab. 5.5. Compoziția consacrată ECC M 1.4: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB la cedare (rupere)	108
Tab. 5.6. Compoziția complementară ECC M 1.5: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare	111
Tab. 5.7. Compoziția consacrată ECC M 1.4: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare	111
Tab. 5.8. Compoziția complementară ECC M 1.5: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB, ciclul de încărcare până la rupere R, sub diferite rate de încărcare	113
Tab. 5.9. Compoziția martor M 4.1: rezistența la întindere prin încovoiere 4PB și deformații specifice aferente	115
Tab. 5.10. Compoziția ECC M 4.2: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare	118
Tab. 5.11. Compoziția ECC M 4.2: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare	118
Tab. 5.12. Compoziția principală ECC M 4.2: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB, ciclul de încărcare până la rupere R, sub diferite rate de încărcare	123
Tab. 5.13. Compoziția ECC M 1.4, SH: caracteristici de rezistență la	

întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH).....	123
Tab. 5.14. Compoziția ECC M 1.4, SH: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm), evaluare SS după ciclurile de vindecare și efectuarea ciclului secundar de reîncărcare până la rupere(II, SH).....	124
Tab. 5.15. Compoziția ECC M 1.4: Analiza comparativă asupra stării de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: Proba SH (ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și ciclul de reîncărcare până la rupere, II, SH) față de proba R(ciclu complet de încărcare până la rupere, R).....	124
Tab. 5.16. Compoziția ECC M 1.4, Epruvete SH: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH).....	124
Tab. 5.17. Compoziția ECC M 1.4, epruvete SH: recuperarea procentuală a caracteristicilor de rezistență, ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare	125
Tab. 5.18. Compoziția ECC M 1.5, SH: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH).....	126
Tab. 5.19. Compoziția ECC M 1.5, SH: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm), evaluare SS după ciclurile de vindecare și efectuarea ciclului secundar de reîncărcare până la rupere(II, SH).....	128
Tab. 5.20. Compoziția ECC M 1.5: Analiza comparativă asupra stării de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: Proba SH (ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și ciclul de reîncărcare până la rupere, II, SH) față de proba R(ciclu complet de încărcare până la rupere, R).....	129
Tab. 5.21. Compoziția ECC M 1.5, Epruvete SH: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH).....	129
Tab. 5.22. Compoziția ECC M 1.4, epruvete SH: recuperarea procentuală a caracteristicilor de rezistență, ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare.....	130

Tab. 5.23. Compoziția ECC M 4.2, SH: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH)	131
Tab. 5.24. Compoziția ECC M 4.2, SH: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm), evaluare SS după ciclurile de vindecare și efectuarea ciclului secundar de reîncărcare până la rupere(II, SH)	132
Tab. 5.25. Compoziția ECC M 4.2: Analiza comparativă asupra stării de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: Proba SH (ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și ciclul de reîncărcare până la rupere, II, SH) față de proba R(ciclu complet de încărcare până la rupere, R):	132
Tab. 5.26. Compoziția ECC M 4.2, Epruvete SH: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH):	133
Tab. 5.27. Compoziția ECC M 4.2, epruvete SH: recuperarea procentuală a caracteristicilor de rezistență, ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare:	133
Tab. 6.1. Compoziția consacrată ECC M 1.4 R: evoluția pe parcursul testului DWT	155
Tab. 6.2. Compoziția consacrată ECC M 1.4 SH: evoluția pe parcursul testului DWT	156
Tab. 6.3. Compoziția consacrată ECC M 2.2 R: evoluția pe parcursul testului DWT	162
Tab. 6.4. Compoziția consacrată ECC M 2.2 SH: evoluția pe parcursul testului DWT	162
Tab. 6.5. Compoziția principală ECC M 3.2 R: evoluția pe parcursul testului DWT	168
Tab. 6.6. Compoziția principală ECC M 3.2 SH: evoluția pe parcursul testului DWT	169
Tab. 6.7. Compoziția principală ECC M 4.2 R: evoluția pe parcursul testului DWT	175

Tab. 6.8. Compoziția principală ECC M 4.2 SH: evoluția pe parcursul
testului DWT

175

1 INTRODUCERE

1.1 Istoricul conceptului de autovindecare a materialelor cementoase

Arhicunoscut că fiind materialul de construcție cu cea mai largă utilizare pe întreaga planetă, betonul datează cel puțin din perioada romană: un amestec coeziv de pietriș și nisip, având drept element liant o compoziție din lut, var și cenușă vulcanică, capabil să facă față cu precădere sarcinilor de compresiune.



Fig. 1.1. Zidul lui Hadrian, sec. II d.Hr.

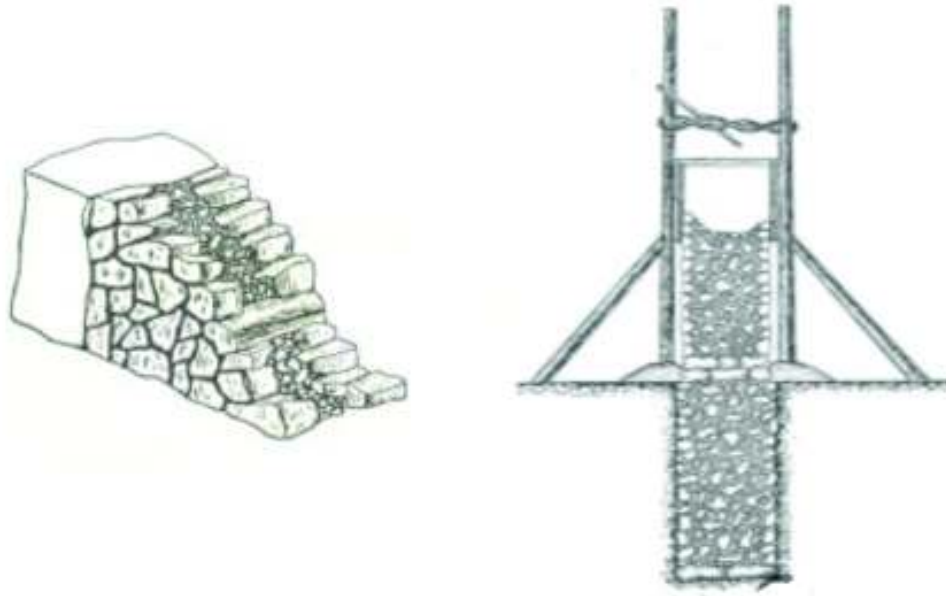


Fig. 1.2. Structura unui perete roman: cofraj și umplutura [1]

Zidul lui Hadrian (vezi Figura 1.1) este un exemplu consacrat de perete realizat după conceptul roman (Figura 1.2).

Totuși, arheologii consemnează că primele forme de beton au fost descoperite în Siria, respectiv Vietnam, la mijlocul mileniului VII î.Hr. În Europa primele descoperiri în acest sens datează din mileniul III secolul VII î.Hr. și au fost identificate de-a lungul Dunării, pe teritoriul fostei Iugoslavii. În perioadă similară chinezii utilizau materiale cementoase conținând nisip, ceramică spartă, oase și apă, pentru înclieirea bambusului, în cadrul ambarcațiunilor lor și de asemenea la clădirea Marelui Zid Chinezesc. În jurul lui 2500 î.Hr. egiptenii au utilizat compoziții de mortare pe bază de ghips și var ca și material liant armat cu paie, la ridicarea Marilor Piramide. În jurul anului 600 î.Hr. grecii descopereau în insula Santorini puzzolana naturală cu proprietăți hidraulice în combinație cu varul. Trei sute de ani mai târziu romanii descoperă beneficiile utilizării cenușii vulcanice numită Pozzolană datorită locației (orașul Pozzouli, în apropiere de portul Napoli), iar Plinius consemnează primele proporții în compoziții de mortare, în acest sens: 1 parte var și patru părți nisip, iar Vitruvius include 2 părți de puzzolană și una de var; grăsime de animal, lapte sau chiar sânge erau utilizate ca și liant. În jurul anului 75 î.Hr. puzzolana și cimentul hidraulic (mix de var și cenușă vulcanică cu conținut de silice

și alumină) sunt utilizate la ridicarea băilor romane și a teatrului din Pompei; Zidurile Palatinului, cu înălțime de 70m sunt ridicate cu materiale similare în jurul anului 44 î.Hr., iar Colosseumul este finalizat în jurul anului 82 d.Hr. Digurile din Caesarea (marea Mediterană, Israel) sunt ridicate cu materiale cementoase similare, în vremea lui Irod cel Mare, aproximativ 25 î.Hr. Inginerii romani realizează apeducte care să deservească marile orașe ale Imperiului, iar în jurul anului 142 este finalizat Panteonul, rămas ca și referință ca cea mai mare structură de beton armat până în 1913.

Surprinzător, betonul zilelor noastre, dezvoltat cu precădere odată cu descoperirea cimentului Portland (CP) la mijlocul secolului al XIX-lea, nu diferă mult de conceptul inițial: o matrice cât mai compactă, obținută printr-o cantitate cât se poate de redusă de material liant, reprezentat în proporție covârșitoare de Cimentul Portland.

Ca și material de construcție, betonul este considerat degradabil în timp, fisurarea și microfisurarea în masa sa fiind considerate inevitabile. Independent de cauzele care determină apariția lor și fără a se constitui ca și iminentă cauză de cedare structurală, fisurile reprezintă căi efective de acces pentru agenții agresivi (săruri, acizi, dioxid de carbon), cu repercusiuni în timp asupra durabilității materialului și implicit a structurilor din beton.

În același timp, imitând natura, materialele cementoase dovedesc un real potențial de autovidecare – *autosigilare a microfisurilor*, fapt constatat de comunitatea științifică încă din 1836, când Academia Franceză a explicat fenomenul prin conversia hidroxidului de calciu, rezultat din hidratarea cimentului, în carbonat de calciu prin expunere la condiții atmosferice uzuale [2]. Așa numita *vindecare autogenă*, proprietate intrinsecă a materialului, este considerată a fi cauza pentru care o multitudine de clădiri vechi și structuri realizate cu liant hidraulic au rezistat de-a lungul timpului, cu reparații minimale. Așa numitul *mortar Roman* pe bază de cenușă vulcanică și var, evident inferior ca și proprietăți mecanice materialelor din zilele noastre, asigură prin capacitatea lui de autosigilare, longevitatea unor structuri antice timp de peste 2000 de ani. (vezi Figura 1.3).



Fig. 1.3. Forul Roman, sec I î.Hr. – I d.Hr.

Weterbeek [3] afirma în 2005 că, în prezența apei, calciul aflat în depozite consistente, se dizolvă în prezența apei și precipitează în fisuri, asigurând închiderea lor parțială și prevenind evoluția lor, asigurând implicit longevitatea podurilor vechi din Amsterdam, Utrecht sau Delft (Figura 1.4).

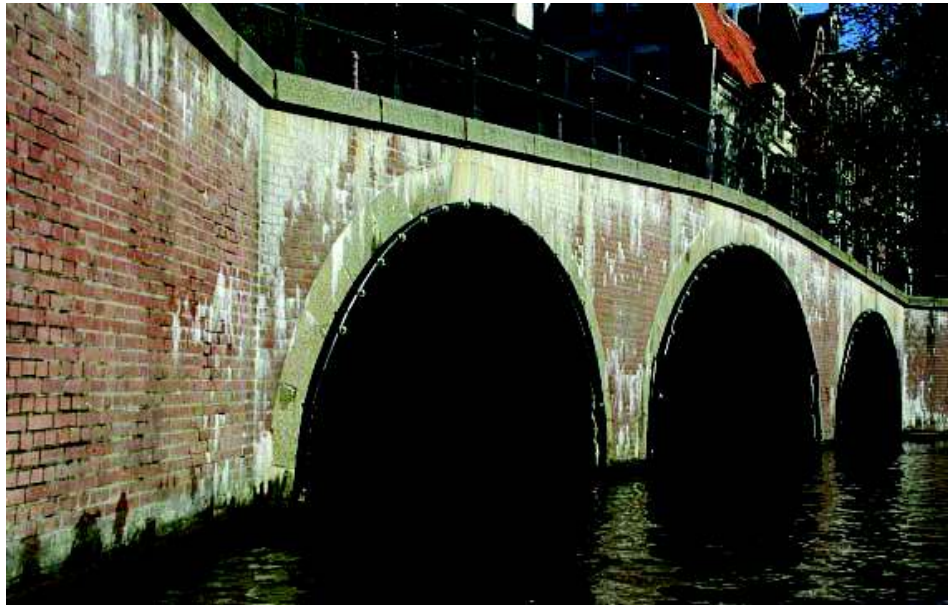


Fig. 1.4. Pod vechi din Amsterdam

1.2. Încadrarea tezei de doctorat în domeniul științific

Implementarea conceptului de dezvoltare sustenabilă presupune cunoașterea intimă a fenomenelor ce se petrec în structurile de construcții, și implicit a materialelor din care acestea sunt alcătuite. Realizarea de noi materiale, cu performanțe superioare, se constituie în consecință într-o prioritate a cercetării din domeniul ingineriei civile. Materialele cementoase avansate de tipul ECC (Engineered Cementitious Composites) sunt alternativa viabilă de integrare a structurilor de beton armat în categoria structurilor inteligente.

Materialul în sine a făcut subiectul unor cercetări din ce în ce mai intensive în ultimii 25-30 ani. Realizarea de structuri alcătuite preponderent din ECC este de natură a aduce o calitate fundamentală în ingineria structurală, anume capacitate de autoreparare și autoregenerare, pe fondul unor performanțe (de ductilitate și rezistență) mult superioare betonului armat, tradițional. Este de notorietate că betonul este materialul de construcție cu cea mai mare răspândire în lume. Structurile de beton armat tradiționale și-au dovedit fiabilitatea de-a lungul timpului, dar evoluțiile recente din tehnologia informației, ingineria mediului și societatea globalizată impun adaptarea acestora la dimensiuni până recent imperceptibile / inaccesibile.

Demersul de cercetare întreprins în cadrul prezentului stagiu de doctorat se încadrează în tematicile de vârf din domeniul ingineriei civile, materiale de construcții noi, materiale și structuri inteligente și sustenabile.

1.3 Motivația cercetării

Autoarea prezentei teze de doctorat a fost și este motivată de dorința de a aduce contribuții personale la tematicile de cercetare mai sus menționate. În acest sens a abordat în premieră pentru țara noastră cercetarea în profunzime a potențialului de **autovindecare (self-healing, SH)**, prin:

- **autoreparare (self-repairing, SR)**, care presupune recuperarea proprietăților fizico-mecanice după inducerea unei anumite stări de degradare datorate unor solicitări curente sau excesive;
- **sutosigilarea (self-sealing, SS)**, care asigură sigilarea (parțială sau completă) fără intervenții exterioare a fisurilor și care garantează îndeplinirea performanțelor structurale pe durata de serviciu prognozată

1.4 Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivul general al cercetării este acela de a aduce contribuții semnificative în descifrarea mecanismelor de autovindecare în matricea compozitelor cementoase armate dispers cu fibre polimerice.

Atingerea acestui obiectiv global este fundamentată în cadrul prezentei teze prin îndeplinirea următoarelor obiective specifice:

Obiectivul 1: Descifrarea mecanismelor de autovindecare endogenă (autogenă) specifice materialelor cementoase (beton, mortar, amestecuri compozite, etc.).

Obiectivul 2: Implementarea materialelor locale în dezvoltarea de noi/inovative compoziții ECC și proiectarea individualizată a acestora pentru îndeplinirea unor funcțiuni specifice

Obiectivul 3: Optimizarea compozițiilor ECC, având ca și ținte performanțe superioare la solicitările din încovoiere și impact

Obiectivul 4: Validarea experimentală a performanțelor fizico-mecanice ale amestecurilor ECC preconizate.

Obiectivul 5: Asigurarea potențialului de autovindecare prin evaluarea amestecurilor proiectate din perspectiva celor două direcții anterior menționate: autoreparare (SR) și autosigilare (SS).

Obiectivul 5: Fundamentarea de noi direcții de cercetare prin valorificarea cercetărilor întreprinse în cadrul stagiului de doctorat.

1.5 Conținutul tezei de doctorat

Teza de doctorat de față este structurată în șapte capitole și nouă anexe. În continuare este prezentat succint(sintetic) conținutul tezei de doctorat:

Capitolul 1 prezintă sintetic conceptul de autovindecare a materialelor cementoase din perspectivă istorică, după care demersul de cercetare este fundamentat prin interacțiunea cu domeniul de cercetare al ingineriei civile și obiectivele sale.

Capitolul 2 tratează pe larg stadiul atins în studiul mecanismelor de vindecare al materialelor cementoase și a performanțelor mecanice și de durabilitate ale acestora și de asemenea principiile de proiectare ale amestecurilor de tip ECC.

Proiectarea și evaluarea unor amestecuri cementoase avansate realizate cu materiale locale face obiectul *Capitolului 3*. Sunt evaluate compoziții preliminare și compoziții individualizate având ca destinație structurile prefabricate hibride, atât din punct de vedere a capacității fizico-mecanice cât și a potențialului de autovindecare, cu cel două direcții urmărite, SR și SS.

În *Capitolul 4* sunt prezentate o serie de amestecuri proiectate, având ca și variabile tipul și procentul de fibre polimerice pentru armarea dispersă, respectiv raportul dintre cantitatea de cenușă de termocentrală)(FA) și ciment (C) ca și elemente liant în cadrul ECC-urilor. Sunt prezentate proprietățile de bază determinate experimental pentru compozițiile dezvoltate (densități și greutatea volumice, rezistența la compresiune și rezistența la întindere prin încovoierea în trei puncte, la vârstele caracteristice de 28 și respectiv 60 zile).

Capitolul 5 evaluează comportarea la întindere prin încovoiere a amestecurilor proiectate prin încercări experimentale de întindere prin încovoiere în patru puncte 4PB, cu diferite rate de încărcare. De asemenea se evaluează potențialul de autovindecare pentru fracturi (deprecieri) specifice acțiunii de încovoiere.

Capitolul 6 evaluează comportarea la șoc (impact) a amestecurilor proiectate prin încercări experimentale specifice Drop Weight Tests (DWT). De asemenea se evaluează potențialul de autovindecare pentru fracturi (deprecieri) specifice acțiunii de impact (șoc).

2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR

2.1 Conceptul de autovindecare (SH) a materialelor

Autovindecarea (SH) reprezintă capacitatea intrinsecă a materialului de reparare (parțială sau totală) a deteriorării intervenite în structura sa și implicit de îmbunătățire a performanțelor sale, după ce o acțiune premergătoare a determinat degradarea acestora până la un anumit nivel [1].

O retrospectivă a evoluției sferei de interes asupra topicii materialelor cu proprietăți de autovindecare este oferită de Van Tittelboom & De Belie în 2013 [4]. Primele materiale cu proprietăți specifice și dedicate de autovindecare (SH) sunt menționate pentru prima dată în anul 1969. În 1979 și respectiv 1981 apar publicații cu referire la capacitatea SH a materialelor termoplastice și a sistemelor compuse, încrucișate.

Primele cercetări specifice, dedicate betonului și compozițiilor cementoase sunt demarate de Dry [5] în anii 1990. Un moment de cotitură, ce va determina un val de atenție acordat materialelor SH, îl constituie publicarea cercetărilor lui White și col. [6] legate de acest subiect în anul 2001, în revista Nature.

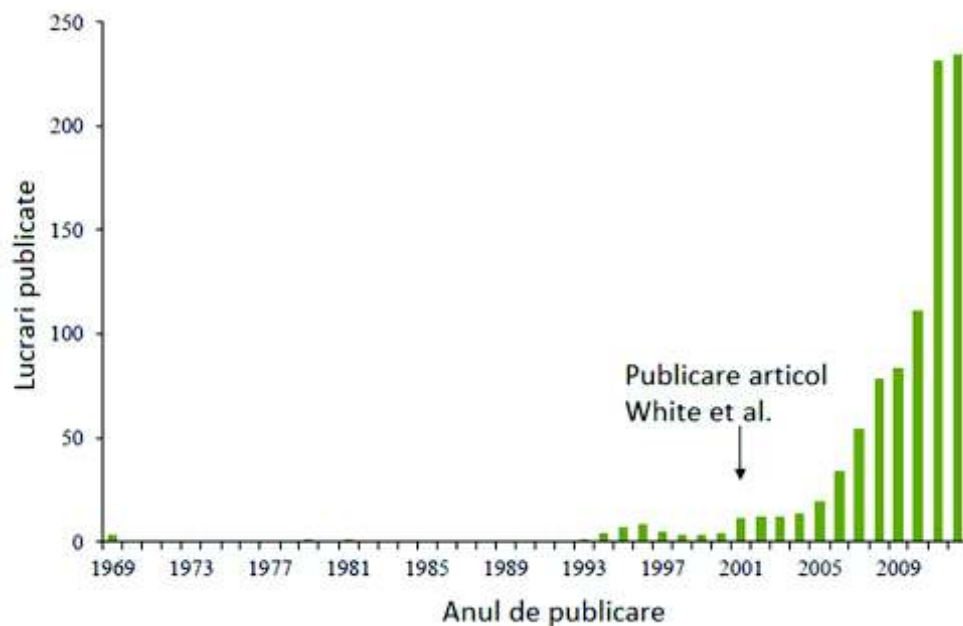


Fig. 2.1. Evoluția publicațiilor în domeniul materialelor SH [4]

Van Tittelboom & De Belie [4] prezintă un grafic (vezi Figura 2.1) al evoluției publicațiilor aferente materialelor SH, începând cu a doua jumătate a secolului 20 și semnalând inclusiv publicația White și col. [6], ca și rampă de declanșare a interesului comunității științifice în această ramură a cercetării.

2.2 Materiale SH. Conceptul prevenirea degradării vs managementul degradării

Îmbunătățirea permanentă a calității materialelor implică creșterea rezistenței și robusteții lor, a capacității de a se opune cu succes unor agresiuni (încărcări) mai puternice, fără ca în acestea să apară dezintegrarea și/sau alterarea formei. În același timp, vârfurile de solicitări apropiate de limita de cedare, produc de asemenea transformări semnificative în material, caracterizate prin deformații plastice, deplasări inerente ale moleculelor și atomilor; transformările interne inerent conducând uneori implicit la cedare [1].

Crearea de materiale foarte rezistente presupune posibilitatea de a concentra un număr cât mai mare de atomi într-un volum cât mai redus cu putință, într-o matrice cât mai densă care se opune microfisurării și extinderii acestora. În acest fel materialele vor fi atât de rezistente și robuste încât nivelul de încărcare asociat degradării lor nu poate fi atins. Acest concept este

prezentat de către Zwaag în „*Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science self-healing materials*” [7], sub denumirea de *Prevenirea Degradării (Damage Prevention)*. Inducerea stării de degradare nu poate fi exclusă în totalitate, aspect ce determină ca structurile să fie permanent monitorizate pentru evaluarea defectelor inerente asociate utilizării și mediului. Implicit, necesitatea reparațiilor și remediilor, cu costuri aferente, este inevitabilă.

O alternativă o reprezintă conceptul *Managementul Degradării (Damage Management)*, ce se constituie ca o bază în dezvoltarea conceptului de Materiale cu Capacitate de Autovindecare (SH); paradigma acceptă noțiunea de degradare în structura materialului, contracarată de iminența unui proces de recuperare, sau reparare a degradării, care va face ca, la un anumit moment, nivelul acestuia să fie îmbunătățit față de situația anterioară. Implicit, materialele cu capacitate SH au o **rată negativă** de evoluție a degradării în structura lor, în diferite etape ale duratei de serviciu. Estimarea performanțelor pentru materialele SH consideră două procese ce variază în funcție de timp: rata de evoluție a degradării vs rata de autovindecare (SH) și recuperare a performanțelor inițiale.

Conceptul, teoretic prin excelență, poate fi transpus în practică doar considerând următoarele etape, generale și caracteristice tuturor materialelor SH:

- **acceptarea stării de degradare** ca fiind iminentă; cedarea nu mai este privită în termeni extremi, de colaps sau nedegradat, ci ca un proces real, continuu, de creștere în timp a numărului și dimensiunilor fisurilor, proces ce acceptă și reversul, respectiv recuperarea, adică autovindecarea;
- **necesitatea mecanismului de declanșare**: o stare de solicitare induce un anumit nivel de degradare; de asemenea, procesul invers, de recuperare, este declanșat de asemenea de un semnal/mechanism de semnalizare, ce necesită atât localizarea deteriorării cât și severitatea acesteia;
- **calea de acces/transport**: odată mecanismul SH fiind inițiat, este necesară

asigurarea transportului agentului de vindecare spre locația unde deteriorarea s-a produs, pentru ca vindecarea efectivă să se poată realiza.

Comitetul tehnic al RILEM TC-221 a adoptat noul CEB-FIB Model Code [8], care include principiul performanței ce trebuie atinse pentru o acțiune maximă de proiectare (de ex. sarcina maximă). În consecință este necesar ca materialul/structura proiectată să facă față acestei solicitări. **Conceptul Self-Healing (SH)** implică acceptarea apariției inerente în material/structură a stării de degradare, care se poate produce fie prin mărimea acțiunii (încărcării) care depășește valoarea de proiectare, fie prin scăderea rezistenței inițiale sub influența factorilor de mediu. Evident; pentru recuperarea acestuia este necesară inducerea unui **proces de autovindecare (SH)**. Când recuperarea rezistenței se produce ca o consecință directă a proiectării ca atare a materialului, aceasta se intitulază **AUTOVINDECARE (SH)**; iar când implică înlocuirea materialului prin intervenția omului, acțiunea se numește **REPARAȚIE** [1].

2.3 Fenomenul de autovindecare (SH) în cazul materialelor cementoase

2.3.1 Microfisurarea și fisurarea în materialele cementoase - degradare efectivă sau cauză a degradării

Capabile să preia eforturi de compresiune în mod uzual variind în intervalul 20–80 MPa, prin ajustări compoziționale mergând până la 150–200 MPa, iar în mod excepțional atingând 800 MPa, compozitele cementoase, generalmente caracterizate de cedare casantă, prezintă vulnerabilitate în fața solicitărilor de întindere și dezvoltă, inevitabil, microfisuri și fisuri în structura lor, ca formă de generare, evoluție a degradării și ulterior de cedare.

Factorii uzuali care determină apariția microfisurilor și fisurilor în masa betonului sunt: suprasolicitarea generată de încărcări, contracții sau dilatări, tasări ale terenului de fundare, deficiențe de proiectare sau execuție defectuoasă. Factorii de mediu au de asemenea o influență masivă asupra

comportării în timp, determinând microfisuri plastice de contracție, deteriorări generate de îngheț – dezgheț, contracții de uscare, coroziune (vezi Figura 2.2). Reacția alcali – agregate reprezintă de asemenea un risc major de deteriorare intrastructurală în masa betonului, generând fisuri periculoase.

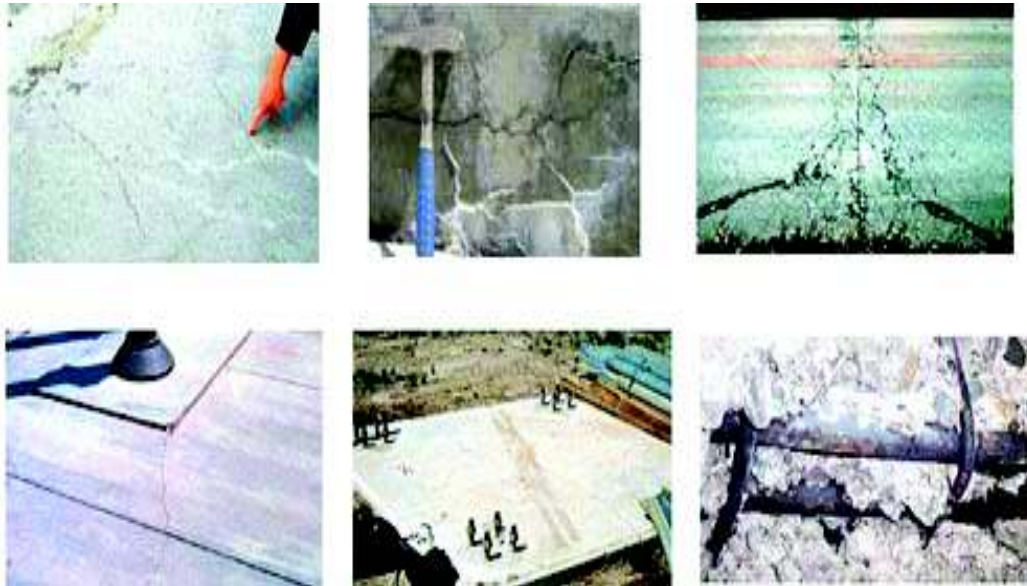


Fig. 2.2. Fisuri și microfisuri în beton

O altă cauză de inițiere a microfisurării în matricea de beton o reprezintă heterogenitatea sa; în acest sens identificându-se [9]:

- **heterogenitatea dimensională:** material multidimensional, betonul conține **elemente nanodimensionale**, cum ar fi produșii de hidratare (de exemplu C-S-H silicații de calciu hidratat), **particule microdimensionale**, din ciment și **mesoparticule** (agregatele);
- **heterogenitatea mecanică:** rigiditatea agregatelor la betoanele curente (de clasă sub C 30/37), în termeni de moduli de elasticitate este net superioară pietrei întărite de ciment, fapt ce conduce la un deficit de conlucrare sub sarcină între cele două tipuri de materiale;
- **heterogenitatea chimică:** pe durata prizei și întăririi, pasta de ciment dezvoltă o contracție chimică puternic obstrucționată de materialul granular, rigid și inert; în caz de tratament termic, coeficientul de dilatare termică a pietrei de ciment este de trei ori mai mic decât a granulelor cuarțoase,

determinând microfisurarea acestora sub efectul dilatației agregatelor.

Prezența fisurilor și mai ales a microfisurilor în structura materialelor cementoase este un fapt comun și nu echivalează cu cedarea structurală. Fără a se constitui ca și factor iminent de colaps, fenomenul conduce la dezvoltarea unei rețele de căi de acces în masa compozitului a factorilor agresivi, generând în timp alterarea materialului, a armăturii înglobate și implicit a structurii propriu zise.

2.3.2 Autovindecarea (SH) materialelor cementoase

Conceptul de autovindecare (SH) în aria materialelor cementoase este preponderent legat de **starea de fisurare – microfisurare** indusă în structura materialului ca și element de degradare și implicit de închiderea, sigilarea parțială sau totală a acestora, uneori realizându-se și recuperarea unor caracteristici mecanice, ca și rezultat al autovindecării. Inițierea mecanismelor SH poate reprezenta o reducere semnificativă a costurilor alocate activităților de mentenanță și reparație a infrastructurii de beton, de departe cea mai extinsă și cu cea mai largă pondere din întreaga arie a construcțiilor, la nivel mondial. Are loc prelungirea implicită a duratei de viață a structurilor din beton și beton armat, cu costuri semnificativ reduse, și inerent, scăderea necesarului de construcții noi, prin urmare și a consumului de ciment, cu impact direct asupra protejării mediului și a resurselor primare epuizabile, în contextul conceptului general de sustenabilitate și dezvoltare durabilă.

De fapt, mecanismele de autovindecare (SH) autogenă în beton sunt vechi, iar eficiența lor în închiderea microfisurilor este recunoscută ca și contribuție semnificativă la longevitatea unor structuri străvechi, antice. Hidratarea continuă a particulelor de liant și precipitarea acestora în fisuri conduce în timp la închiderea acestora [12]. Recent, procesele de autovindecare (SH) în aria compozitelor cementoase sunt menționate ca fiind eficiente și în cazul unor alor forme de degradare, cum ar fi **carbonatarea** sau cea indusă de **sarcina termică** [1].

2.4 Fenomenul de autovindecare (SH) - direcții generale

2.4.1 Definiții specifice

Terminologia generală a conceptului de autovindecare (SH) în domeniul materialelor cementoase cuprinde mai multe direcții și abordări. Grupuri distincte de cercetare în acest domeniu (Japonia, Belgia și Olanda, Marea Britanie, SUA, etc.), în urma activităților de cercetare, a direcțiilor și metodelor considerate precum și a rezultatelor obținute, au constituit linii directoare și definiții specifice proprii, iar suprapunerea terminologiei de la grup la grup nu implică întotdeauna potrivirii exacte. În acest sens, Comitetul Tehnic RILEM 221-SHC propune, în raportul „*Self-Healing Phenomena in cement-Based Materials*” [1] un set unitar de definiții, pentru o ilustrare clară și unitară a conceptului. Raportul cuprinde de asemenea precizarea punctelor comune sau distincțiilor față de alte grupuri de cercetare pe tematica SH, spre exemplu Japonia.

2.4.1.1 Definiții ale Institutului Japonez al Betonului (JCI)

În perioada 2007-2009, Comitetul Tehnic TC 075B - Autogenous Healing in Cementitious Materials (Vindecarea Autogenă a Materialelor Cementoase) al Institutului Japonez al Betonului (JCI) realizează un studiu amplu asupra acestei topici [11] și oferă definiții specifice în acest sens, pentru delimitări cantitative și calitative necesare în cadrul tematicii SH.

Interconectarea mecanismelor și implică a ariilor lor de activare este prezentată printr-o diagrama Venn (vezi Figura 2.3), iar terminologia cuprinde [1], [11]:

- **vindecare autogenă (autogenous healing):** orice proces natural de umplere și sigilare a fisurilor, care nu implică o intervenție externă;
- **vindecare/reparare indusă (engineered healing/repairing):** metode artificiale și intenționate de umplere și sigilare a fisurilor fără nici o intervenție externă; componentele SH sau alte instrumente de acționare sunt incluse anterior în compozitul cementos, prin proiectare dedicată în acest sens.

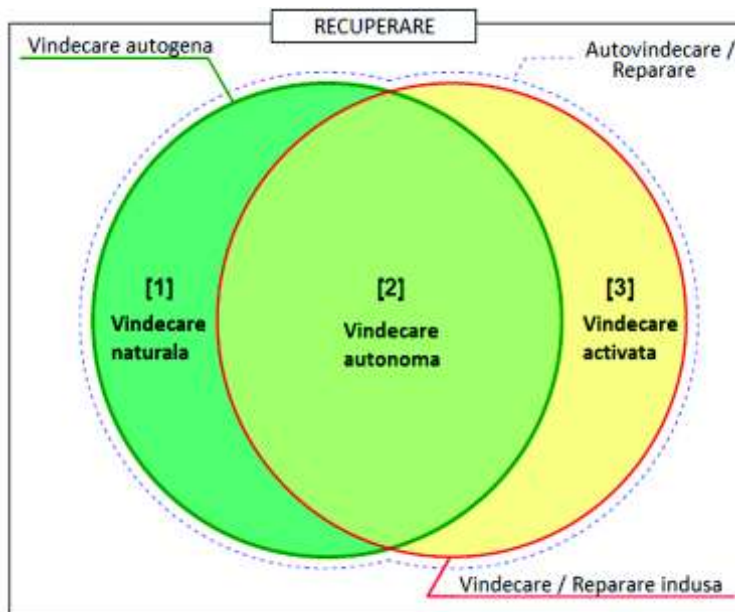


Fig. 2.3. Diagrama Venn asupra conceptului autovindecare/autoreparare al JCI, 2009 [2]

- **autovindecare/reparare (self-healing/repairing):** proces de umplere și sigilare a fisurilor care se produce automat in situ și nu implică nici o intervenție dedicată, a lucrătorilor, în acest sens;
- **vindecare naturală (natural healing):** fenomene naturale de umplere și sigilare a fisurilor care rezultă în urma unor reacții chimice (cum ar fi hidratarea târzie) sau a unor procese mecanice de blocare a fisurilor; aceste mecanisme se constituie ca și proprietăți/funcții intrinseci, inerente ale betonului sau materialelor cementoase; principalele mecanisme specifice de inducere a vindecării naturale sunt hidratarea continuă a cimentului nehidratat și precipitarea carbonatului de calciu;
- **vindecare autonomă (autonomic healing):** vindecarea involuntară a fisurilor prin acțiunea adaosurilor din compoziția cementoasă; adaosuri cum ar fi cenușa de termocentrală sau alți agenți de expansiune introduși inițial în compoziție, special pentru acest scop; principalele mecanisme specifice de inducere a vindecării autonome sunt reacția puzzolanică a cenușii de termocentrală și expansiunea unor polimeri și agenți încorporați în amestec;
- **reparare activată (activated repairing):** vindecarea/repararea automată

produsă prin instrumente artificiale, constând în senzori și actuatori, elemente de acționare; funcția de reparare este asigurată de către substanțe dedicate, diferite de componentele originale și tradiționale ale betonului; acest tip de sisteme pot fi încadrate în categoria materialelor inteligente (intelligent materials) sau a sistemelor deștepte (smart systems) încorporate în structurile de beton; mecanisme specifice de inducere a vindecării sunt de microincapsularea, materiale de sigilare conținute în pipete casante înglobate în beton; tehnici de monitorizare, aliaje cu funcția de memorie a formei etc..

- **reparare (repairing):** implică o activitate specifică, realizată de către om în situ, iar decizia de efectuare a acesteia este luată de către responsabilul tehnic în urma unei evaluări a structurii deteriorate.

2.4.1.2 Definiții ale Rilem TC 221-SHC

Definițiile și direcții de inducere a mecanismelor de autovindecare propuse de către Comitetul Tehnic RILEM 221-SHC [1] sunt:

- **autovindecare (self-healing):** orice proces cauzat de material în sine, implicând recuperarea și implicit îmbunătățirea performanțelor după o acțiune anterioară care a determinat reducerea performanțelor acestuia;
- **autogen/endogen (autogenous):** procesul SH este considerat autogen când acțiunea de recuperare utilizează componente ale materialului deja prezente în compoziția acestuia, independent de o eventuală proiectare specifică SH;
- **automon (autonomic):** procesul SH este considerat autonom când acțiunea de recuperare utilizează componente ale materialului prezente în compoziția acestuia ca urmare a unor considerente SH și care în alte circumstanțe nu ar fi fost adăugate compoziției.

De Rooij și Schalgen propun în 2011 [1], în acord cu prevederile CT RILEM 221-SH, distincția noțiunilor directe: autogen vs autonom ca și **proces de inducere a ameliorării degradării**, respectiv autosigilare (self-closing) vs autovindecare (self-healing) ca și **acțiune rezultată** în urma procesului (vezi Figura 2.4).

PROCES	ACTIUNE	
	Autosigilare (inchidere)	Autovindecare
Autogen	Autosigilare autogena	Autovindecare autogena
Autonom	Autosigilare autonoma	Autovindecare autonoma

Fig. 2.4. Autovindecarea betonului - definire a conceptului prin relația proces -acțiune [1]

2.4.1.3 Definiții introduse de Van Tittleboom și De Belie

Van Tittleboom și De Belie (Laboratorul Magnel, Universitatea din Gent, Belgia) [4] introduc următoarele noțiuni și direcții principale de evoluție în cadrul fenomenului de autovindecare a compozitelor cementoase, inspirate de abordarea fenomenului în cazul polimerilor cu proprietăți de autovindecare (SH):

- **autovindecare intrinsecă (intrinsic self-healing):** materialele cementoase prezintă capacitate intrinsecă de autovindecare prin prisma compoziției pietrei de ciment; ca și noțiuni derivate sunt menționate: **vindecarea autogenă, vindecarea autogenă îmbunătățită și reacția polimerilor în cadrul betonului modificat cu polimeri.**
- **vindecare prin microîncapsulare (capsule based healing):** microcapsule, conținând agentul de vindecare sunt amplasate dispers în masa amestecului cementos; sub impulsul unui stimul, care poate fi chiar apariția fisurii, capsula se sparge eliberând conținutul ce va acționa local, sigilând fisura și împiedicând propagarea și deschiderea ei; pentru ca mecanismele de vindecare să fie declanșate, este necesar ca agentul încapsulat să fie capabil să reacționeze sub influența unui stimul, care poate fi: umiditatea sau temperatura, interacțiunea efectivă cu matricea propriu-zisă sau cu un al doilea component, aflat dispers în matrice; tipul de capsule sau agenți încapsulați, monocompenți sau bicompenți, tehnologia de încapsulare sau factorii care determină declanșarea reacțiilor ce induc vindecarea

efectivă reprezintă posibile direcții de optimizare a întregului mecanism;

- **vindecare vasculară (vascular healing):** procesul de autovindecare este declanșat de agentul de vindecare prezent într-o rețea tubulară care leagă interiorul structurii de exterior; agentul SH poate fi monocomponent, prezent într-o rețea monotubulară, sau poate fi multicomponent în cadrul unui sistem multitubular; cercetările în acest sens au cuprins un număr mare de posibilități, atât legat de sistemul de transport cât și de natura agentului SH, respectiv de stimulii care declanșează; este considerat autonom când acțiunea de recuperare utilizează componente ale materialului, prezente în compoziția acestuia ca urmare a unor considerente SH și care în alte circumstanțe nu ar fi fost adăugate compoziției.

2.4.2 Autovindecarea autogenă

2.4.2.1 Mecanisme specifice

Vindecarea autogenă a fisurilor reprezintă un cumul de procese care determină recuperarea (parțială sau totală) a performanțelor inițiale de material exclusiv prin prisma caracteristicilor intrinseci ale acestuia, respectiv ale compușilor din compoziția sa. Fenomenul se constituie ca o bază primară a conceptului actual SH, asigurând preponderent sigilarea parțială a fisurilor și având o eficiență dovedită în cadrul microfisurilor cu deschidere mică. Numeroasele studii efectuate în acest sens menționează deschideri maxime de 5-10 μm, 100-150 μm până la 300 μm [4], sigilate prin mecanisme autogene.

Procesele de bază ale autovindecării autogene sunt de natură fizică, chimică sau mecanică (vezi Figura 2.5):

- **procese fizice:** umflarea în interiorul fisurii a pietrei hidratate de ciment (PHC) prin absorbția de apă și dilatarea implicită a constituenților săi, determinând închiderea de aproximativ 10 % (conform evaluărilor statistice) a deschiderii fisurii [1];
- **procese chimice:** au fost identificate două reacții chimice esențiale pentru ca vindecarea autogenă să se producă:

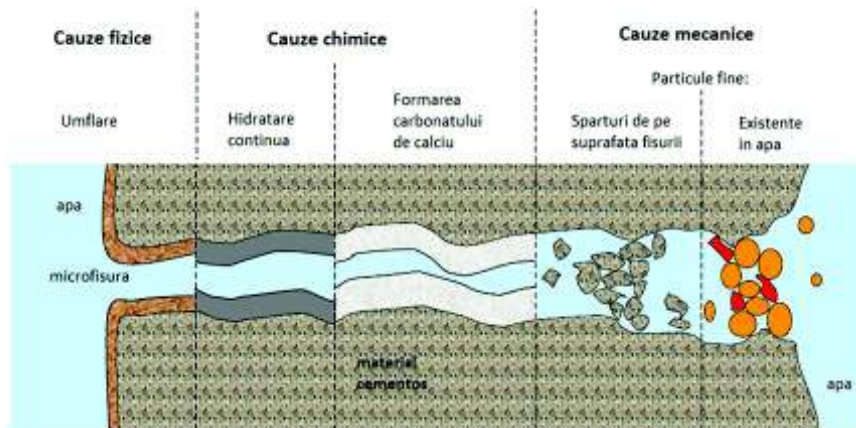


Fig. 2.5. Mecanisme în compozite cementoase care determină vindecarea autogenă [1]

⇒ **hidratarea continuă a pietrei de ciment** rămasă nehidratată ca o consecință a deficitului de apă din matrice; în fisura odată deschisă poate pătrunde apa și implicit se formează noi produși specifici de hidratare C-S-H, silicații de calciu hidratați, care ocupă aproximativ dublul spațiului ocupat inițial de către particulele de ciment; Neville [12] consideră acest proces ca fiind cauza majoră a închiderii fisurilor, cercetări ulterioare consemnând însă că mecanismul este specific betonului tânăr, cu rezerve substanțiale de ciment nehidratat [12] și determină doar închideri parțiale ale fisurilor; odată cu creșterea deschiderii acestora eficiența procesului descrește. Un factor important, neevidențiat în studiile prezentate este acela al „desfacerii” unor nuclee de ciment nehidratate (numai 30% din granule se hidratează), datorită microfisurării, care în prezența apei se hidratează și formează noi produși de hidratare cu volum sporit și care ocupă spațiile fisurilor, contribuind la procesul de autoconsolidare; procesul fizico-chimic este valabil indiferent de vârsta betonului. Aceste constatări sunt probate de realizarea betoanelor reciclate cu lianți obținuți din măcinarea betoanelor rezultate din demolări.

⇒ **precipitarea carbonatului de calciu (CaCO_3):** ionii de calciu

(Ca²⁺) prezenți în matricea de ciment intră în reacție cu dioxidul de carbon (CO₂) sau cu ionii de carbon (CO₃²⁻) din apă și precipită cristale de carbonat de calciu (CaCO₃) pe fețele fisurii, determinând închiderea acesteia; acest cumul de reacții chimice, evidențiat prin relațiile 2.1...2.3 reprezintă cel mai important mecanism în cadrul vindecării autogene:

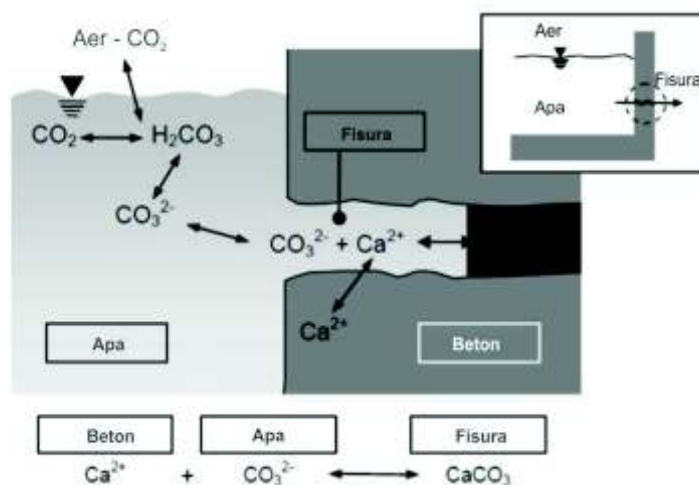


Fig. 2.6. Declanșarea precipitării carbonatului de calciu ca urmare a interacțiunii matricei cementoase cu medii aer - apă [13]



Edwardsen [13] evidențiază faptul că procesul de cristalizare a carbonatului de calciu implică două procese distincte. În faza inițială, cinematica cristalizării este generată de reacții pe suprafețele pereților fisurii, urmând ca ulterior să implice reacții cu ionii de difuzie prin stratul deja creat în prima etapă de către produșii de precipitare (vezi Figura 2.6). În evaluarea eficienței mecanismului, Yang [14] consideră crucială influența factorilor de mediu, identificând următoarele aspecte:

- prezența ionilor de calciu este necesară în concentrație cât mai ridicată;
- umiditatea este esențială și poate fi asigurată eventual prin alternanțe apă-aer sau imersări repetate;

- deschiderea fisurii trebuie să fie cât de redusă posibil, de maxim 50 μm pentru închidere completă, respectiv de maxim 150 μm pentru o închidere parțială;
- **procese mecanice:** blocarea fisurii cu impurități (particule fine) are loc prin reziduurile existente în apa ce se infiltrează în fisură sau spărturi de pe pereții acesteia, formate în pe parcursul procesului de fisurare; ponderea acestor mecanisme este însă minimală și poate produce efecte doar în combinație cu mecanismele anterior precizate.

2.4.2.2 *Factori de influență*

Factorii care influențează apariția și eficiența mecanismelor de autovindecare autogenă sunt: **betonul (materialul cementos)** în care se produce fisura și respectiv vindecarea, **apa** ca și mediu absolut necesar pentru inducerea reacțiilor de vindecare și **fisura propriu-zisă** (formă, dimensiune) [1].

Betonul determină implicit capacitatea sa intrinsecă de vindecare autogenă prin compoziția sa, respectiv: tipul de ciment, tipul de adaosuri, tipul de agregate și vârsta. Matricea betonului (incluzând: pastă hidratată de ciment - PHC, adaosuri și material granular foarte fin) este determinantă pentru capacitatea intrinsecă de vindecare a compozitului, agregatele, fiind inerte, având un rol secundar în proces. În momentul hidratării cementului se formează silicații de calciu hidratați (C-S-H), aluminații și hidroxidul de calciu $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ioni de calciu necesari reacțiilor de precipitare sunt oferiți de hidroxidul de calciu, solubil în apă. Compușii C-S-H, aproape insolubili în apă, oferă ioni Ca^{2+} doar în momentul în care ionii din $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sunt epuizați. Cu cât conținutul de clincher este mai mare (respectiv Ciment Portland) cu atât rezerva de ioni Ca^{2+} este mai mare și implicit potențialul de produși de precipitare este mai corespunzător superior.

Prezența adaosurilor active în compoziție, cum ar fi cenușa de termocentrală, zgura de furnal sau puzzolana naturală, ca înlocuitori parțiali al

cimentului Portland din compozițiile de beton, au fost analizate din perspectiva capacității de închidere a fisurilor. Cunoscute ca lianți hidraulici latenți și având activitate pozzolanică, prezența acestor adaosuri în matrice determină rezerve îndelungate, la vârste târzii ale betonului, pentru hidratarea continuă a pietrei de liant și implicit potențial în formarea compușilor de hidratare cu rol de închidere a fisurilor. Van Tittelboom și De Belie [15] au întreprins studii în acest sens, încercând stimularea potențialului de autosigilare a compozitelor cementoase prin înlocuirea cimentului cu cenușă de termocentrală sau zgură de furnal. Diferitele compoziții au fost analizate prin prisma permeabilității la apă, prin inducerea unei stări de fisurare în epruvete, aplicare unui flux de apă la presiune scăzută prin fisură și înregistrarea coeficientului de permeabilitate k . Rezultatele nu sunt concludente asupra variației raportului apă/ciment (A/C), însă a fost evident potențialul de autovindecare (SH) diferit, în termen de permeabilitate la apă și implicit închidere a fisurii, în funcție de variația compozițională (sistem liant). Zgura de furnal a prezentat cele mai promițătoare rezultate, cu hidratare spectaculoasă în prezența fluxului de apă, spre deosebire de cenușă de termocentrală, care prezintă un potențial de hidratare mult mai întârziat și nu a generat sigilarea microfisurii scontată (Figura. 2.7).

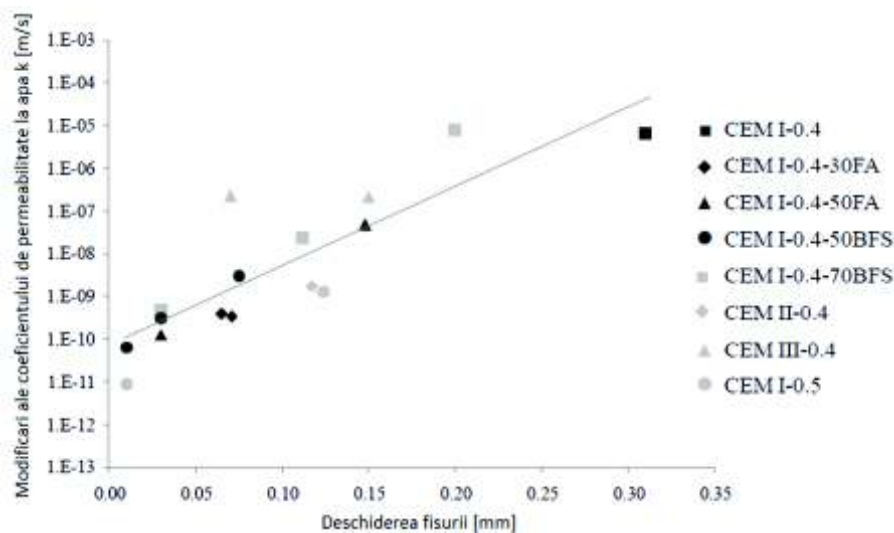


Fig. 2.7. Scăderea coeficientului de permeabilitate la apă prin procesul de închidere a fisurii, pentru diferite deschideri și compoziții [15]

2.5 Modalități de evaluare a eficienței mecanismelor de autovindecare

Tehnicile de vizualizare și determinările (fisuri, trasee de fisurare, închiderea fisurilor, produse de precipitare, compoziții chimice etc.) necesare pentru cuantificarea eficienței mecanismelor de autovindecare sunt prezentate în Tabelul 2.1, în baza sintezei realizată de Van Tittleboom și De Belie [1], [4].

Tab. 2.1. Sinteza tehnicilor și determinărilor în domeniul SH

Nr. crt.	Tehnologia	Determinarea
Microscopie		
1	Microscopia fluorescențe (asigură un contrast mare între spații și fazele solide)	Caracterizarea deprecierii (microscopie cantitativă): - natura, frecvența și tipul fisurilor - porozitatea capilară, goluri de aer (fisuri) în microstructura pietrei de ciment datorate produșilor hidratării și altor solide
2	Microscopia cu lumină polarizată - POL (asigură identificarea solidelor cristaline, natura și cantitatea produșilor primari și secundari ai hidratării)	Agenții și produșii de vindecare sunt în principal solide cristaline ca și carbonatul de calciu (CaCO_3): - caracterization deprecierii - stabilirea gradului de autovindecare.
3	Microscopie optică - OM și analiza imaginii	Visualizarea depozitelor de cristale și determinarea ratei de vindecare. SH fisurilor în mortare istorice.
4	Microscopie electronică – ESEM (electronii cu lungimi de undă extrem de joase sunt capabili să genereze imagini de înaltă rezoluție);	Controlul eficienței și calității unui material proiectat SH. Microstructura ECC înainte și după autovindecare. Comparații și caracterizări ale epruvetelor de control cu cele ce înglobează bacterii impibile. Vizualizarea spargerii capsulelor parțial înglobate.
Microscopie combinată		
5	*Utilizarea combinată OM și ESEM = una din cele mai puternice metode de cercetare în domeniul materialelor, permițând studiul a: lungimii și distribuției fisurii, porozității, distribuției porilor, formei și distribuției agregatelor, omogenității pastei de ciment, distribuției chimice și minerale, a agenților SH. Stabilirea gradului SH: - deschiderea fisurii înainte și după SH; - măsurarea cantitativă a materialului SH bazat pe etringită într-o fisură generată artificial.	
5.1	Analiza secțiunilor subțiri	Vizualizarea depozitelor cristaline în fisură.
5.2	Radiografierea cu raze X	Vizualizarea agenților eliberații din capsulele înglobate.
5.3	Tomografierea cu raze X	Vizualizarea 3D a agenților eliberații din capsulele înglobate.
5.4	Corelarea digitală a imaginii	Vizualizarea închiderii fisurii.
5.5	Analiza difracție razelor X	Determinarea materialelor cristaline.
Altele		
6	Spectroscopie raman (tehnica bazată pe împrăștierea inelastică a luminii monocrome, de obicei o sursă laser)	Determinarea compoziției chimice. Analiza fisurilor înainte și după SH, identificarea depozitelor de carbonat de calciu.
7	Analiza în infraroșu	Determinarea produșilor de precipitație

2.6 Materiale compozite cementoase - ECC

2.6.1 Definiere

Materialele compozite cementoase (ECC), cunoscute și sub denumirea de **betoane flexibile**, reprezintă o categorie unică de mortare armate dispers cu diferite tipuri de fibre (de regulă polimerice), dezvoltate în contextul Materialelor Cementoase Compozite de Înaltă Performanță Armate cu Fibre (HPFRCC).

Cercetările în domeniu au obiectivul de a găsi metode sustenabile de reducere a cedării casante a betonului și de îmbunătățire a ductilității la întindere. Materialele tradiționale HPFRCC s-au limitat preponderent la utilizări în cadrul laboratoarelor de cercetare sau pentru aplicații specializate, fapt datorat costurilor ridicate implicate de conținutul ridicat de fibre din compoziție.

În cazul materialelor ECC s-a reușit îmbunătățirea semnificativă a ductilității la întindere, reducând simultan conținutul de fibre (în general 2 % din volum sau mai puțin), fapt ce implică diminuarea semnificativă a costului produsului finit [16].

2.6.2 Scurt istoric

De la începutul utilizării materialelor ingineresti (bazate pe argilă, var și ciment) a apărut necesitatea contracarării comportării lor casante. Astfel, a apărut armarea cu fibre disperse, ce are o vechime seculară. În antichitate fibrele utilizate erau de natură organică. De exemplu, cărămizile nearse au fost armate cu paie sau cu păr de animale pentru a reduce fisurarea și implicit scăderea rezistenței după apariția fisurilor. Evoluția a fost firească: așa cum de la argilă s-a trecut la ciment, implicit, de la paie și păr de animale s-a ajuns la armarea cu fibre anorganice (de oțel, sticlă, etc.), iar ulterior polimerice (polietilenă, polipropilenă, etc.).

Betonul armat cu fibre (Fibre Reinforced Concrete - FRC) este un

material compozit pe baza de ciment în masa căruia este înglobată o cantitate variabilă de fibre discrete (uzual de oțel), în majoritatea cazurilor distribuite aleatoriu. Adăosul de fibre metalice în compoziția betonului a fost implementat pentru prima dată în 1874 în California-SUA, de către A. Berard [17]. Acesta a obținut îmbunătățirea rezistențelor mecanice ale materialului utilizând resturi de oțel de dimensiuni inegale. Înglobarea de fibre în matricea de beton are scopuri multiple, structurale și nestructurale:

- îmbunătățirea rezistențelor mecanice ale materialului;
- ameliorarea caracterului casant al materialelor cementoase, creșterea ductilității lor la întindere;
- controlul stării de fisurare, implicând îmbunătățirea durabilității elementelor de beton, structurale și nestructurale, prin reducerea fisurilor și posibilitatea estimării modelului de fisurare (tipologie și dimensiuni de fisură).

Creșterea ductilității la întindere a betonului (caracteristică asociată în mod uzual oțelului) a constituit o preocupare majoră a cercetătorilor. În anii de după 1960 Romualdi și col. săi demonstrează că friabilitatea betonului poate fi redusă prin adăugarea unei cantități de fibre scurte de oțel în compoziția acestuia [18], [19].

Aveston și col. [20], urmași de Krenchel și Stang [21], arată că utilizarea fibrelor continue și aliniată induce o creștere semnificativă a ductilității materialului comparativ cu betonul obișnuit. Allen [22], urmat de Lankard [23] și mai târziu de Naaman [24] au efectuat încercări privind utilizarea fibrelor discontinue disperse într-un dozaj ridicat de 4-20 %. Au obținut îmbunătățiri semnificative ale rezistențelor mecanice, dar o ductilitate inferioară comparativ cu cazul fibrelor continue.

Trebuie subliniată și contribuția inginerului român Gogu Constantinescu, care prin cercetările sale (1943 în Anglia și 1945 în SUA) oferă informații asupra modalității de distribuție a fisurilor și îmbunătățirea

capacității de preluare a eforturilor a betonului armat cu fibre de oțel [25]. Semnificative în România sunt și contribuțiile în domeniul armării dispere în mitrici cementoase ale lui C. Avram și C. Bob [26].

În prima raportare asupra acestui material în 1973, ACI a definit betonul armat cu fibre ca fiind "*betonul făcut din cimenturi hidraulice care conțin agregate fine sau mari și fibre discontinue*" [27].

În România betonul armat dispers cu fibre metalice – BFM este definit ca „*material obținut prin amestecul cimentului, agregatelor, fibrelor metalice, aditivilor, adaosurilor minerale și apei la preparare, în proporțiile prestabilite, ale cărui proprietăți se dezvoltă prin hidratarea și întărirea cimentului și interacțiunea dintre fibrele metalice și matrice*” în reglementarea tehnică GP-075-02 [28].

Materialelor Cementoase Compozite de Înaltă Performanță Armate cu Fibre (HPFRCC) reprezintă o parte distinctă a FRC, caracterizată prin îmbunătățiri considerabile aduse ductilității la întindere, implicând un palier de consolidare sub încărcare/deformare, distinct de cedarea obișnuită prin scăderea tensiunilor în condițiile creșterii deformațiilor în secțiunea considerată, de tip înmuiere (slăbire), tipică materialelor FRC. Comparația între cele trei categorii – beton normal, FRC și HPFRCC- este prezentată în Figura 2.8, sub forma diagramelor caracteristice aferente solicitării la întindere uniaxială [16].

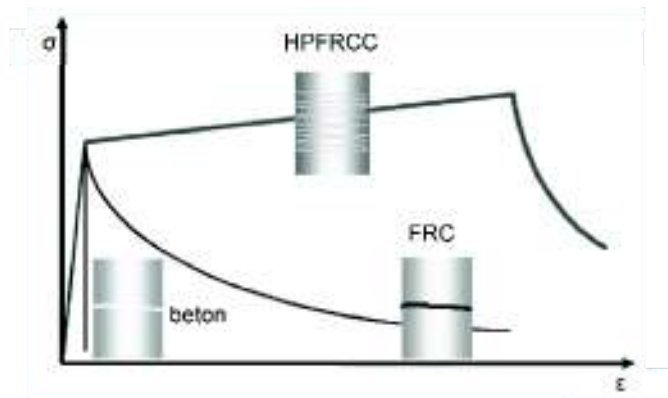


Fig. 2.8. Curba efort-deformație la solicitare de întindere uniaxială: beton obișnuit; FRC și HPFRCC [16]

2.6.3 Fibre de armare dispersă a materialelor cementoase

2.6.3.1 Generalități

În vederea alegerii tipului adecvat de fibre pentru armarea materialelor cementoase este esențială identificarea efectului pe care fibrele îl vor induce materialului în care sunt înglobate (efecte structurale, cum ar fi controlul grosimii de fisurare sau nestructurale și prevenția fisurilor timpurii de contracție). Pentru a se dovedi eficiente în matricea de beton, fibrele trebuie să satisfacă câteva condiții, conform specificațiilor lui Naaman [29]:

- rezistență la întindere a fibrelor trebuie să fie de aproximativ 2 – 3 ori mai mare decât a betonului;
- aderența fibrelor la matricea de beton trebuie să fie cel puțin egală sau chiar superioară rezistenței la întindere a betonului;
- modulul de elasticitate al fibrelor trebuie să fie semnificativ mai mare decât al betonului.

În vederea evitării degradării aderenței fibrelor la matricea de beton se recomandă fibre cu un coeficient al lui Poisson și un coeficient de expansiune termică sensibil egal cu al betonului.

2.6.3.2 Tipuri de fibre pentru armare dispersă

Fibrele de oțel sunt confecționate din oțel carbon sau oțel inoxidabil (recomandabil pentru cerințe de rezistență la coroziune). Acestea prezintă rezistență la întindere ce variază între 200 și 2600 MPa, alungire ultimă cuprinsă între 0.5 și 5 % (fibrele prea rezistente pot induce efecte defavorabile în ceea ce privește eficiența armării, testele de smulgere - efectuate în matrice slabe armate cu fibre cu rezistență ridicată ducând la degradări semnificative ale matricei în apropierea punctului de smulgere a fibrei); modulul de elasticitate este de aproximativ 200 GPa. Prezintă aderență scăzută la beton, fapt ce a determinat introducerea fibrelor cu suprafețe deformate (ondulate sau drepte, cu suprafața neprelucrată, cu sau fără capete îngroșate) [19], [27].

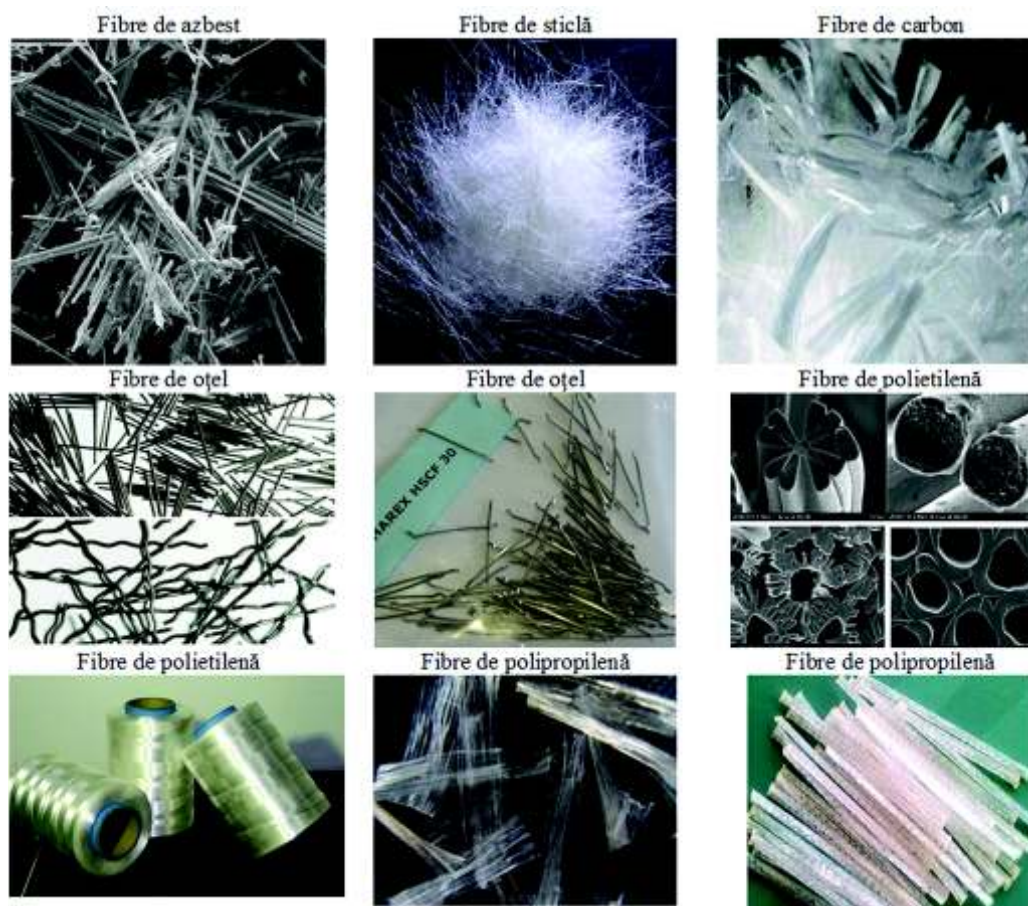


Fig. 2.9. Tipuri de fibre pentru armarea dispersă [27]

Fibrele de azbest, elastice și fine, au un aspect asemănător bumbacului. Se obținut prin defibrare mecanică sau chimică din azbest și au proprietăți fizico-mecanice excelente (rezistența la întindere, stabilitatea termică, capacitatea de absorbție, etc.), care le conferă comportament excelent ca armătură dispersă în betoane, însă potențialul cancerigen le limitează drastic utilizarea.

Fibrele de sticlă nu sunt higroscopice, nu putrezesc și nu ard, sunt însă casante și prezintă deteriorare rapidă (fibrele convenționale) datorită alcalinității ridicate a matricelor cementoase. Un interes deosebit prezintă fibrele produse din sticla rezistentă la acțiunea alcaliilor, AR – GFRC, având o compoziție chimică distinctă prin incluziunea de zirconiu ceramic, cu rezistență chimică ridicată.

Fibrele sintetice sunt artificiale și rezultă în urma dezvoltării industriei textile și petrochimice. Proprietățile lor fizico în termeni de rezistență la întindere și modul de elasticitate, precum și reactivitatea/stabilitatea lor chimică variază pe intervale foarte largi. La ora actuală se utilizează următoarele tipuri de fibre sintetice:

- ***fibrele de carbon*** sunt inerte la agresivitate chimică și prin urmare sunt recomandate mediilor alcaline caracteristice materialelor cementoase; fibrele de carbon pot fi produse prin carbonizarea fibrelor acrilice (poliacrilonitril sau mătase) la temperaturi înalte (pentru a conferi fibrelor modul de elasticitate și rezistențe sporite) sau, mai ieftin, prin extragerea catranului din petrol sau cărbune;
- ***fibre de aramidă (kevlar)*** au fost utilizate inițial la realizarea frânghiilor, velelor sau anvelopelor, prezentând rezistență și modul de elasticitate cu valori ridicate; de asemenea au rezistență chimică ridicată, îmbunătățesc semnificativ proprietățile mecanice și de durabilitate al matricei în care sunt înglobate (rezistență la întindere și încovoiere, durabilitate și rezistență la șoc); spre deosebire de fibrele de carbon, nu prezintă sensibilitate la deteriorare în timpul procesului de preparare, însă au dezavantajul unui cost ridicat;
- ***fibrele de polietilenă (PE)*** au densitatea mare, modulul de elasticitate sporit semnificativ față de polimerii de bază, suprafața deformată pentru îmbunătățirea aderenței la matrice, induc matricelor în care sunt încorporate o comportare elasto-plastică; în amestecurile convenționale de beton se recomandă utilizarea fibrelor cu lungimi de 40 mm; conținutul de fibre recomandat variază între 2 și 4 %, fiind recomandate pentru controlul fisurilor și de asemenea elementelor cu secțiune redusă;
- ***fibrele de polipropilenă (PP)*** sunt produse din polipropilenă pură 100 % și sunt de două tipuri: tip F – sub formă de fibre fibrilate și de tip M – sub formă de multifilament; prezintă rezistență la alcalinitatea mediilor alcaline; sunt non magnetice, rezistente la coroziune, neutre din punct de vedere

chimic și nu absorb apă; dezavantajele constau în aderență redusă la matrice, sensibilitate la lumina soarelui și oxigen, modul de elasticitate redus (deși în Danemarca a fost dezvoltată fibra Krenit, cu un modul de elasticitate ce variază între 7 și 18 GPa și o rezistență la întindere cuprinsă între 500 și 1200 MPa) [30]; literatura de specialitate [27] specifică două modalități de utilizare în cadrul compozitelor cementoase: plase dispuse într-un strat (conținutul volumic de fibre poate atinge 10 %) și sub formă de fibre scurte discontinue, orientate întâmplător în amestecul convențional de beton (volumul de fibre, datorită suprafeței specifice ridicate, este mult mai mic 0.5-0.75 % pentru fibrele cu lungimea de 40 mm și maxim 2 % pentru fibrele mai scurte, cu lungimea de până la 20 mm; armarea dispersă cu fibre de polipropilenă este eficientă pentru contracararea contracțiilor plastice de uscare, iar fibrele cu modul de elasticitate redus sunt utilizate pentru protecție la foc: fibrele se topesc, creându-se astfel canale cu rol de evacuare a vaporilor produși de foc, evitându-se astfel exfolierea brutală a acoperirii armăturilor.

- ***fibrele de polivinilalcool (PVA)*** sunt larg utilizate în pescuit și sunt unul din elementele de bază ale ECC; fibrele sunt scurte și sunt confecționate din materiale organice; au un modul de elasticitate mare și o rezistență mare la întindere; microstructura unică a fibrelor de PVA determină formarea unei legături puternice cu matricea pe bază de ciment [31]; combinația PVA-ECC formează un compozit care s-a dovedit a atinge o deformație specifică ultimă la tracțiune mai mare de 3 %, rezistență la încovoiere mai mare de 13 MPa, rezistență la compresiune de peste 68 MPa, iar la tracțiune peste 5 MPa.

Fibrele naturale au avantajul prețului și disponibilității. Se obțin din fructe (de exemplu fibrele de cocos), frunze (de exemplu fibrele de sisal) și tulpinile unor plante sau arbori (de exemplu fibrele din iută, in, cânepă sau celuloză de la diferite specii de lemn). Prezintă însă marele dezavantaj de a fi susceptibile la atacul bacteriilor și ciupercilor, implicând putrezirea și implicit

reducerea rezistenței la întindere și a modulului de elasticitate, precum și o instabilitate dimensională excesivă în timpul ciclurilor de umezire-uscare.

2.6.4 Principii de proiectare a amestecului ECC

Efectul de autoconsolidare, caracteristic materialelor HPFRCC, poate fi obținut prin creșterea conținutului de fibre în cadrul matricei, deși această soluție nu este cea mai simplă, implicând o serie de inconveniente cum sunt reducerea lucrabilității și costurile ridicate – de cele mai multe ori costul fibrelor este mai ridicat decât prețul celorlalte elemente componente (agregate, ciment, etc.).

După cum subliniază Victor Li [16], **înalta performanță** poate avea sensuri diferite: în Europa înseamnă în principal durabilitate crescută, în Statele Unite ale Americii termenul se referă în primul rând la rezistențe mecanice, iar în Japonia la capacitatea de auto-compactare a betonului proaspăt la punerea în operă. Li consideră că pentru ca un material să poată fi definit ca prezentând **performanță înaltă**, acesta trebuie să prezintă performanțe excelente atât în stare proaspătă cât și întărită. În același timp costurile de producție reprezintă un aspect esențial, care recomandă un produs ca fiind sau nu competitiv pe piața construcțiilor, optimizarea conținutului de fibre fiind obligatorie în acest sens.

Ductal®, este un produs din categoria HPFRCC conceput și dezvoltat de concernul Lafarge. Este un material cu matrice foarte densă (raport A/C<0.2 și un conținut ce variază între 2 % și 6 % de fibre cu diametrul de 0.1-0.2 mm și lungimea de 5-15 mm), oferind o creștere substanțială atât a rezistenței la compresiune cât și la întindere, dar o performanță destul de modestă a ductilității (variază între 0.02 % și 0.06 %) [16], [32].

Efectul de autoconsolidare poate fi atins prin optimizarea proporțiilor elementelor componente matricei, fapt ce nu implică în mod obligatoriu un conținut ridicat de fibre. Acest concept, de obținere a sistemelor cu autoconsolidare, în condițiile unei matrice cu rezistențe normale și cu un conținut minimal de fibre (aproximativ 2 % din volum, sau chiar mai scăzut) a

fost demarat aproximativ acum două decenii la Departamentul de Construcții Civile al Universității din Michigan (SUA), de către Victor Li și colaboratorii săi [16], [33], [34], [35], [36], [37], [38]: Materialele rezultate în urma cercetărilor sunt materialele compozite cementoase (ECC), o alternativă mai accesibilă (din punct de vedere al prețului) la costisitorul Ductal® [16].

Principiul esențial al ECC este că potențialul fibrelor este folosit inclusiv sub sarcini de serviciu (SLS), în stadiul elastic sau stadiul de autoconsolidare (inelastic), spre deosebire de conceptul Ductal®, unde fibrele devin eficiente doar când este atinsă starea de rupere [16], [32], [33], [34].

Având la bază interacțiunile mecanice dintre fibre, matricea de mortar și interfața fibră-matrice, considerând de asemenea eterogenitățile prezente în ECC (defecte, particule de nisip, granule de ciment și particule de compuși minerali, cu dimensiuni variind de la scară nano - la scară millimetrică) și prin mijloacele oferite de micromecanica mecanismelor de deformare, au fost elaborate ipoteze simplificatoare de proiectare a ECC, respectând următoarele două criterii [16], [30], [32]:

- **criteriul de rezistență:** rezistența la fisurare nu trebuie să depășească capacitatea maximă de legătură a fibrelor de-a lungul fiecărui plan potențial de fisurare;
- **criteriul energetic:** trebuie atinsă starea de microfisure multiple (Figura 2.10).

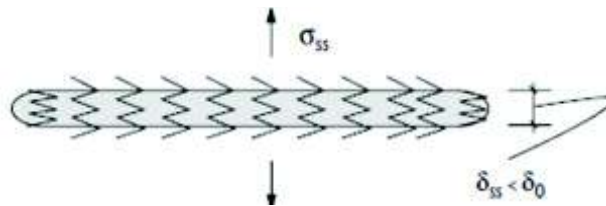


Fig. 2.10. Propagarea stării de microfisure în material ECC, satisfăcând criteriul energetic [32]

Satisfacerea simultană a acestor criterii implică controlul aderenței. Aderența slabă implică rezistența de legătură redusă, deci cedarea primului criteriu, în timp ce o aderență ridicată implică dezvoltarea unui efort maxim de

legătură în condițiile unei deschideri mici de fisurare, ducând la cedarea celui de-al doilea criteriu. Esențială este distribuția omogenă a fibrelor, neomogenitatea fibrelor pe unitatea de volum reducând efortul ultim [16], [30].

2.6.5 Caracteristici fizico-mecanice ale ECC

Cu ajutorul instrumentelor micromecanice de dimensionare, proprietățile materialelor ECC pot fi raportate necesităților dictate de destinația lor. Caracteristica lor comună este ductilitatea la întindere, semnificativ mai ridicată comparativ cu cea a betonului sau a materialelor FRC [35], [39].

Principiile de bază de obținere a compozițiilor ECC nu impun un anumit tip de fibră de armare dispersă, acestea trebuie să satisfacă doar anumite caracteristici (mecanice, dimensionale sau aspecte legate de suprafață) în vederea obținerii efectului de autoconsolidare în condițiile unui procent redus de fibre în matricea materialului. Destinația finală a materialului reprezintă un alt aspect esențial, ce impune cerințe legate de proprietățile mecanice, durabilitate sau performanțe economice.

În general, în compoziția ECC au fost utilizate cu succes fibre de polivinil alcool (PVA) dar și alte tipuri de fibre s-au dovedit interesante: polietilenă cu modul de elasticitate ridicat (PE) sau polipropilenă (PP) [40], [41].

2.6.5.1 Rezistența la întindere uniaxială

Cea mai importantă caracteristică a ECC este ductilitatea ridicată la încovoiere, deformația specifică ultimă atingând valoarea de 5 % la solicitare de întindere uniaxială (Figura 2.11). Putem identifica un anumit comportament specific metalului în cazul materialelor ECC, cu o limita de curgere la sfârșitul stadiului elastic când prima microfisură este indusă în epruvetă sub sarcina aplicată.

Creșterea sarcinii de încărcare induce formarea de microfisuri multiple și redistribuirea eforturilor rezultată din propagarea lor, ca un răspuns de

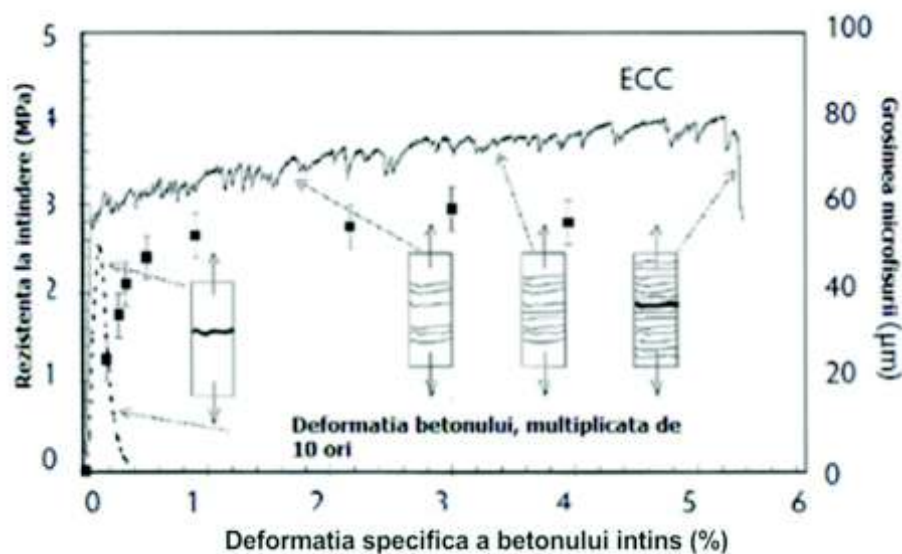


Fig. 2.11. Curba caracteristică pentru epruvete ECC; evoluția deschiderii fisurii ca funcție de deformația specifică la întindere (impusă) [39]

autoconsolidare de tip „strain hardening” al materialului, ceea ce semnifică o creștere suplimentară a deformației la întindere. Cedarea apare atunci când planul de rupere se formează prin unificarea microfisurilor rezultând fracturi semnificative, acest stadiu corespunzând încărcării maxime. Dincolo de acest vârf, materialele de tip ECC prezintă un comportament similar materialelor FRC (înmuire).

Formarea microfisurilor este obligatorie în vederea obținerii ductilității de material. Conform explicațiilor [16] de-a lungul intervalului de deformație 0.01 % (valoare corespunzătoare apariției primei fisuri) și 1 %, deschiderea fisurii evoluează de la 0 la aproximativ 60 μm. Odată cu creșterea încărcării apar mai multe microfisuri, urmând același model (nici o microfisură nu depășește deschiderea de 60 μm), datorită interacțiunilor fibre – matrice din cadrul compoziției. De asemenea este precizat faptul că stabilizarea deschiderii maxime a fisurii la valoarea de maxim 60 μm este o proprietate intrinsecă a materialului, care nu depinde de tipul încărcării (întindere, încovoiere sau forță tăietoare), de caracteristicile dimensionale sau geometrice ale structurii sau tipul de armare.

2.6.5.2 Rezistența la compresiune uniaxială

Materialele ECC prezintă o rezistență la compresiune similară betonului normal sau de înaltă rezistență, variind în intervalul 20-95 MPa (Figura 2.12). Cedarea este mai puțin casantă și bruscă decât în cazul betonului obișnuit.

Considerând lipsa agregatului grosier din cadrul compoziției (fapt pentru care materialele ECC ar trebui privite ca paste sau mortare cementoase armate dispers cu fibre), modulul de elasticitate variază între 15-34 GP. Deformația specifică ultimă la compresiune variază în intervalul valoric 0.45-0.65 %.

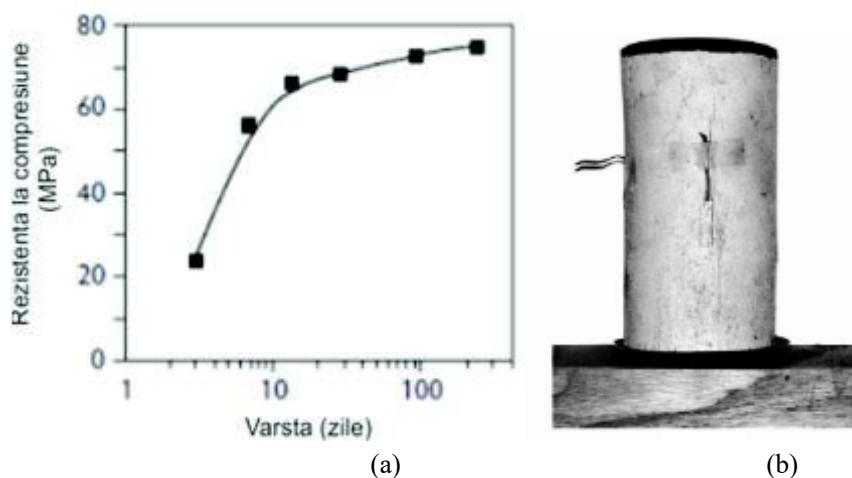
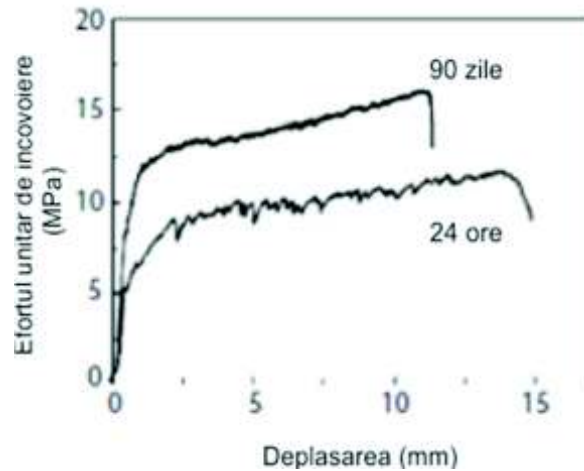


Fig. 2.12. a) ECC (M45) – Evoluția în timp a rezistenței la compresiune; b) Epruvetă cilindrică ECC după cedare la solicitare la compresiune [16]

2.6.5.3 Rezistența la încovoiere

Materialele ECC supuse întinderii prin încovoiere dezvoltă fenomenul de microfisurare la baza grinzii epruvetă (Figura 2.13, c), fapt ce permite dezvoltarea unei săgeți semnificative (beton flexibil) și dovedește ductilitatea (Figura 2.13, b).

Rezistența la încovoiere (modulul de rupere) al ECC variază între 10 și 15 MPa și este caracterizată de apariția autoconsolidării – proprietate intrinsecă a materialului ECC, independentă de geometria materialului. Acest fenomen nu este caracteristic materialelor FRC, la care, pe măsură ce înălțimea grinzii crește, este tot mai dificil de atins palierul de consolidare a deformației [32].



(a)

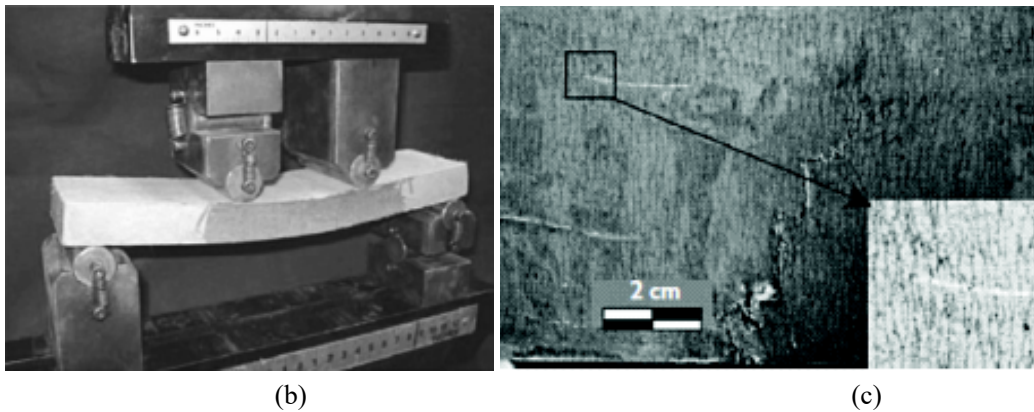


Fig. 2.13. a) ECC – Rezistența la încovoiere a) Curba încărcare – săgeată pentru o epruvetă ECC; b) epruvetă supusă la încovoiere și săgeata sub efortul indus; c) microfisurare în cadrul solicitării la încovoiere [16]

2.6.5.4 Caracteristici de durabilitate

Pe lângă performanțele mecanice superioare betonului simplu sau materialelor FRC, materialele ECC trebuie să dovedească performanțe de durabilitate în diferite condiții de mediu unde este preconizată utilizarea acestora. De asemenea, trebuie demonstrată durabilitatea structurală a elementelor ECC armate. Pentru ca un material să fie considerat durabil este necesar ca și caracteristicile lui mecanice să nu se degradeze de-a lungul timpului și să coboare sub valorile de proiectare.

Considerând faptul că una dintre caracteristicile de bază ale ECC o reprezintă ductilitatea, utilizarea acestor materiale se va face implicit în cadrul

structurilor ce impun deformații substanțiale materialului. Aceasta implică faptul ca structura să rămână funcțională chiar în condițiile în care materialul intră sub incidența efectului de autoconsolidare însoțit de microfisurare. În consecință, este recomandabil ca analiza performanțelor de durabilitate pentru ECC să fie realizată în stadiul fisurat.

Este de remarcat faptul că durabilitatea ECC și a elementelor realizate din aceste materiale este corelată cu deschiderea microfisurilor, proiectate să fie mici, în general sub 100 μm . După cum dovedesc studiile experimentale și teoretice, acestea rămân pe acest palier de valori inclusiv sub acțiunea testelor de oboseală [16], deși sub efectul de curgere lentă au fost înregistrate depășiri ale acestor valori [42].

Materialele ECC prezintă următoarele caracteristici principale din punctul de vedere al durabilității:

- **capacitate de deformare la întindere de lungă durată:** deformația specifică ultimă este de aproximativ 3 % (conform testelor efectuate la 180 zile, mult superioară altor materiale însă dovedind un regres considerabil față de procentul de 5 % al matricei ECC în stadii timpurii [43];
- **rezistență la cicluri repetate de îngheț–dezgheț:** testele experimentale au dovedit conservarea modului dinamic de elasticitate al epruvetelor ECC după efectuarea a 300 cicluri de gelivitate, comparativ cu epruvetele de beton simplu care suferă degradări majore după efectuarea a 110 cicluri; se constată de asemenea menținerea unei capacități de deformare cu o deformație specifică de aproximativ 3 % [44];
- **expunere la climat tropical:** au fost efectuate teste fizico-mecanice după expunerea timp de 26 săptămâni a epruvetelor la cicluri de imersiune în apă fierbinte (60 °C), în vederea evaluării comportamentului de lungă durată în mediu cald și umed; modificările pentru epruvetele ECC au fost minime din punctul de vedere al fibrelor – rezistențe, modul de elasticitate, iar capacitatea de deformare a scăzut de la o deformație specifică de 4.5 %

(determinată inițial) la 2.75 % (după efectuarea ciclurilor) [45];

- **imersiune în cloruri:** epruvetele, care inițial au fost aduse la un anumit nivel de fisurare, au fost expuse în medii cu concentrații ridicate de cloruri (simulând expunerea structurilor din medii marine sau elementelor de pavaj supuse sărurilor de dezgheț); concluziile arată stabilizarea capacității de deformare cu o deformație specifică de aproximativ 3 % față de valoarea inițială, deschiderea medie a fisurilor a crescut de la 40 μm la circa 100 μm iar rezistența la întindere a prezentat o scădere cu aproximativ 10 % [46];
- **rezistență la reacția alcalii – silicați (ASR):** testele experimentale [16] demonstrează că epruvetele realizate cu cenușă zburătoare clasa F sau clasa C nu prezintă modificări substanțiale, respectiv expansiuni după 30 zile imersare în soluție alcalină la 60 °C; de asemenea s-a constatat că prezența microfibrilor PVA are un efect benefic; concluziile arată că materialele ECC au o comportare extrem de bună în cazul expunerii la ASR.

Rezistența la încovoiere (modulul de rupere) al ECC variază între 10 și 15 MPa și este caracterizată de apariția autoconsolidării – proprietate intrinsecă a materialului ECC, independentă de geometria materialului; acest fenomen nu este caracteristic materialelor FRC, la care, pe măsură ce înălțimea grinzii crește, este tot mai dificil de atins palierul de consolidare cu deformarea [47].

2.6.6 Familia materialelor ECC. Domenii de utilizare

Familia de materiale ECC poate fi privită ca fiind capabilă să ofere intervale generoase de rezistențe și ductilitate, în funcție de cerințele structurale specifice și, în același timp, aptă să asigure funcționalități diferite. Astfel, se pot identifica următoarele soluții particulare:

- **ECC autocompactant**, destinat unui larg număr de aplicații in situ;
- **ECC cu rezistențe ridicate timpurii (HES-ECC)**, destinat pentru aplicații care impun obținerea unor rezistențe ridicate într-un timp foarte scurt, cum ar fi lucrările de infrastructură rutieră, unde reluarea traficului trebuie realizată cât de repede posibil [48];

- **ECC cu densitate mică** (LW-ECC), destinat pentru elemente a căror greutate proprie trebuie redusă cât mai mult posibil [49];
- **ECC ecologic** (Green-ECC), dezvoltat în cadrul principiilor durabilității la nivel mondial [50];
- un tip special este **ECC cu autovindecare** (SHECC), [51], [52-2].

2.6.7 Mortarele ECC cu capacitate de autovindecare

Micromortarele ECC dovedesc, pe lângă proprietățile anterior menționate, un potențial superior de AutoVindecare autogenă (SH), identificat atât ca și capacitate de închidere (sigilare) a fisurilor (AutoSigilare, Self-Sealing) cât și de recuperare a caracteristicilor fizico-mecanice (prin proprietăți fizico-mecanice de recuperare după un anumit nivel de deteriorare), respectiv AutoReparare (Self-Repairing) [51], [52-2]. Numeroase studii experimentale dovedesc cu claritate potențialul de autovindecare autogenă a ECC: [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62]. Sunt utilizate diferite tehnici de investigare ale eficienței SH, atât prin monitorizarea evoluției microfisurilor cât și prin retestarea și reevaluarea diferiților parametrii de natură fizică (permeabilitatea la apă și vapori) și mecanică (rezistențe mecanice, modul de elasticitate, etc). Sunt variate condițiile de expunere în vederea inducerii mecanismelor specifice autovindecării autogene, precum și compozițiile ECC, respectiv cantitatea de liant, agregatul sau aditivul utilizate, cantitatea și tipul de fibre polimerice, etc.

Potențialul de AutoVindecare a ECC se constituie ca și un cumul de factori, preponderent legați de compoziția materialului [62]:

- **Microfisurarea multiplă sub sarcină**, respectiv generarea unui număr mare de microfisuri ce implicit au șanse ridicate de închidere completă datorită dimensiunii reduse a deschiderii lor (60-100 μm) (vezi Figura 2.14).

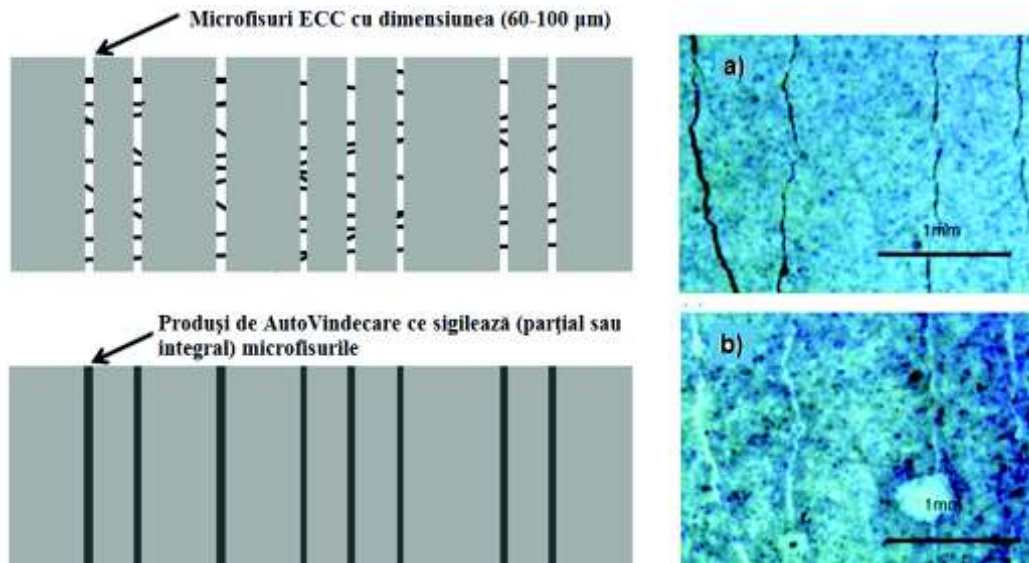


Fig. 2.14. Autovindecarea microfisurilor în ECC. Mecanismul de închidere a fisurilor: a) înainte de vindecare; b) după vindecare [62]

- **Prezența fibrelor în compoziție:** fibrele polimerice joacă un rol esențial în matricea cimentoasă, de punți ce leagă microfisurile, pe de o parte restricționând deschiderea lor peste valoarea de (60-100 μm), iar pe de altă parte favorizând precipitarea de-a lungul lor a produșilor specifici (carbonat de calciu CaCO_3 sau produșii de hidratare, silicații de calciu hidratați C-S-H) ce determină sigilarea lor [63].

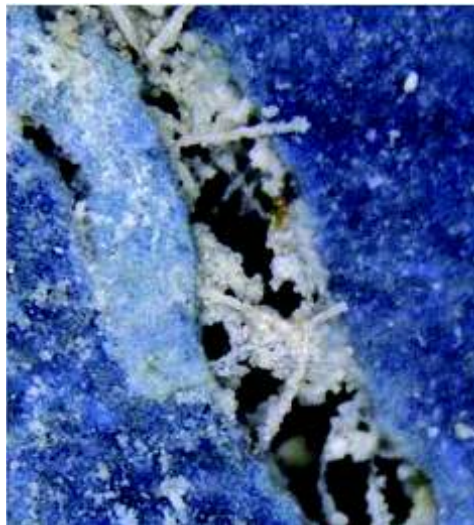


Fig. 2.15. Produși de precipitare depuși de-a lungul fibrelor

- **Cantitatea generoasă de cenușă de termocentrală** din compoziție (minim 1/2 din cantitatea totală de liant) caracterizată printr-un caracter puzzolanic târziu, asigură, împreună cu cimentul, un potențial constant și continuu, pe durată îndelungată, de particule nehidratate ce, în condiții de prezență a apei generează producția de hidratare C-S-H, necesari sigilării microfisurilor [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70].

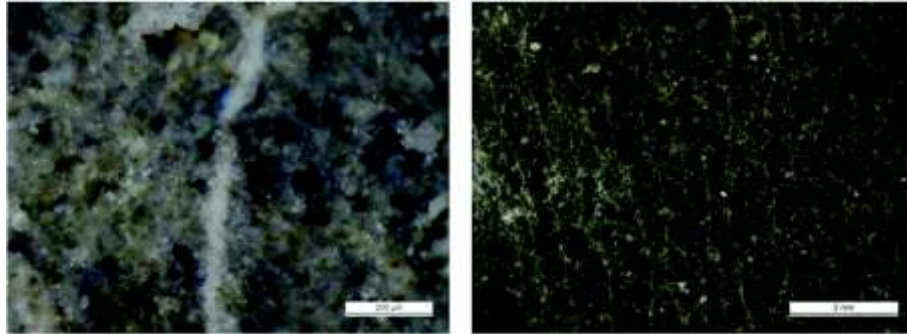


Fig. 2.16. Mecanismul de închidere a fisurilor în ECC prin combinația precipitării carbonatului de calciu și al produșilor de hidratare continuă C-S-H [30]

2.6.8 Mortarul de reparație ECC

În domeniile vaste de utilizare ale materialelor ECC poate fi inclus și acela de mortar de reparație pentru structurile deja existente, afectate într-un anumit grad de degradare. Studiile experimentale efectuate de-a lungul timpului demonstrează performanțele superioare ale straturilor de reparație realizate din materiale ECC comparativ cu completările realizate din mortarele de reparație obișnuite sau armate dispers cu fibre. Cedarea prin exfoliere sau sfărâmarea matricei este practic eliminată în cazul materialelor ECC. Astfel, aplicarea unui strat de material cu ductilitate ridicată poate rezolva o serie de probleme de durabilitate [71].

Durata de serviciu estimată pentru sistemele de reparație cu materiale ECC depășește 20 de ani. Testele experimentale și analizele numerice, efectuate în ultima perioadă, pun în lumină performanțele excelente ale materialelor ECC ca și materiale de reparație. În acest sens trebuie menționat studiul experimental realizat de către Lim și Li [72], demonstrând

performanțele de reparație ale materialelor ECC. Sunt realizate două compoziții ECC cu fibre PE și PVA, având un conținut volumic de 2%. Ca și elemente de comparație sunt utilizate două compoziții, un mortar obișnuit de reparație (PC) și un mortar cu fibre (SFRC). Mortarele de reparație sunt amplasate pe un strat de beton simplu (PC), conform schemei din Figura 2.17.

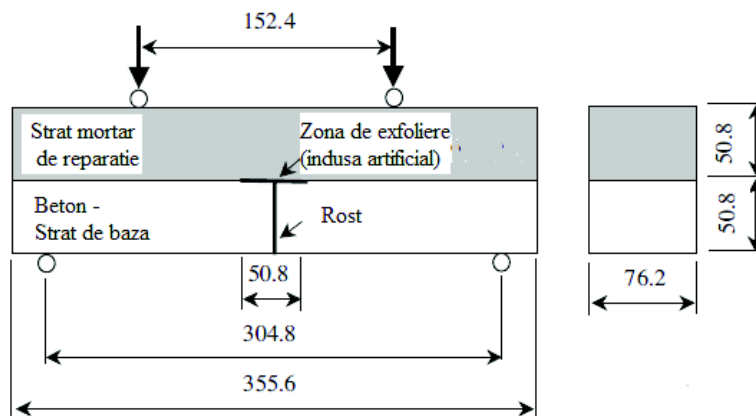


Fig. 2.17. Epruvetă ECC supusă la încovoiere: conformație și schema de încărcare

Curba efort – deformație ($\sigma - \epsilon$), descrisă în urma testelor experimentale, realizate pe epruvete similare, consolidate cu materialele PC, SFRC, PVA-ECC și PE-ECC, demonstrează performanțele net superioare ale compozițiilor ECC (Figura 2.18).

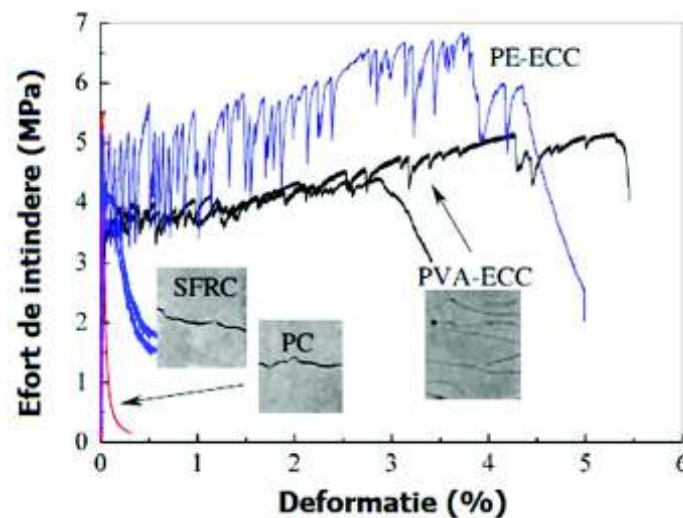


Fig. 2.18 Diagrama efort-deformație pentru epruvete consolidate cu material de reparație

Cedarea sistemului PC/PC este casantă. Defectul de la interfața celor două materiale se propagă sub forma unei spărturi masive prin grosimea stratului de mortar de reparație PC. Cedarea sistemului SFRC/PC este semicasantă. Fisura neregulată formată în urma creșterii încărcării este unită de către fibre metalice din mortarul de reparație SFRC. Astfel, este permisă transmiterea efortului, deși aflat în descreștere, de-a lungul crăpăturii, formate tot de-a lungul stratului SFRC.

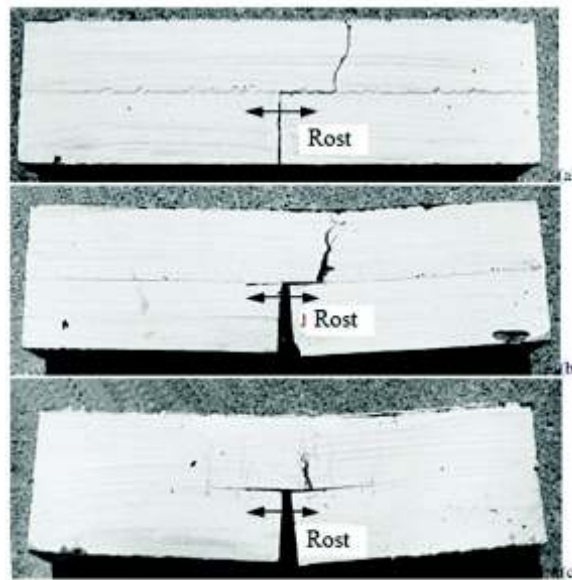


Fig. 2.19. Modalități de rupere - Epruvete de beton consolidate cu mortare de reparație, a) Epruvetă PC/PC; b) Epruvetă SFRC/PC; c) Epruvetă E-ECC/PC);

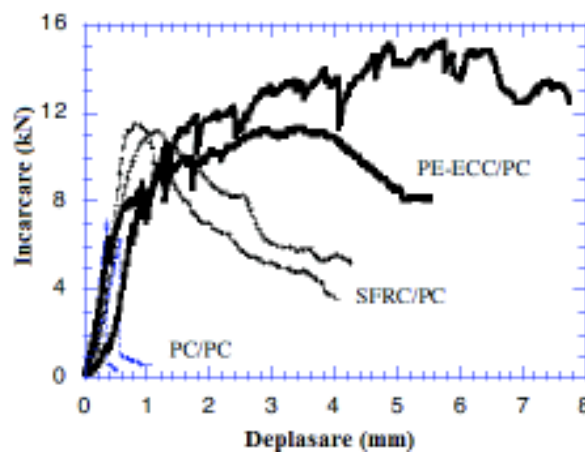


Fig. 2.20. Răspunsul încărcare – deplasare pentru epruvetele a, b și c din Figura 2.19

3. CERCETĂRI PRELIMINARE

3.1 Compoziții experimentale inițiale de tip ECC, realizate cu materiale locale

3.1.1 Principii generale de realizare a materialelor cementoase avansate SH – FECM (Fiber Engineered Cementitious Materials with Self-Healing Capacity)

Materialele compozite cementoase (ECC), denumite și *betoane flexibile*, reprezintă o subcategorie din familia Materialelor Cementoase Compozite de Înaltă Performanță Armate cu Fibre (HPFRCC), cu potențial de reducere a cedării casante la solicitări de întindere și compresiune și de îmbunătățire a ductilității la întindere; reprezintă mortare armate dispers cu diferite tipuri de fibre (polimerice în mod uzual).

Materialele ECC prezintă un comportament specific sub sarcina de încărcare (cu precădere în cazul eforturilor de întindere), caracterizate de prezența *palierului de autoconsolidare sub încărcare*.

Elementul de referință în vederea proiectării și optimizării compozițiilor materialelor SH – FECM îl constituie cunoscutul amestec ECC – M45 și fibrele din PVA (vezi Tabelul 3.1 și respectiv Tabelul 3.2), cel mai utilizat din cadrul familiei ECC [16].

Tab. 3.1. Fișa compoziției ECC-M45 [16]

Ciment	Cenușă		Agregat fin	Apă	Aditiv	Fibre
1 parte	1.2 părți		0.8 părți	0.56 părți	0.012 părți	0.2 % din volum
	Ciment II/A-V 42.5R					
	Cenușă zburătoare tip F					
	Nisip silicios ($\varnothing_{max}=250 \mu\text{m}$; $\varnothing_{med}=110 \mu\text{m}$)					
	Fibre PVA					
	Aditiv superplastifiant, puternic reducător de apă tip policarboxilat					

Tab. 3.2. Caracteristici fizico-mecanice ale fibrei PVA utilizată la realizarea ECC-M45

Caracteristici fizico-mecanice (UM)	Valori
Rezistența nominală la întindere (MPa)	1620
Rezistența aparentă la întindere (MPa)	1092
Diametru (μm)	39
Lungime (mm)**	8.0
Modulul de elasticitate (GPa)	42.8
Alungirea (%)	6.0

Compozițiile prototip SH – FECM prezentate în acest capitol sunt proiectate în vederea obținerii unor amestecuri având proprietăți comparabile cu ale mortarelor consacrate ECC, atât în stare proaspătă sau în stare uscată cât și în ceea ce privește caracteristicile de durabilitate.

Principalele ținte stabilite pentru această etapă preliminară a cercetării se reduc la următoarele obiective și criterii minimale:

- obținerea unor compoziții fiabile din materiale locale, disponibile pe piața românească: agregate (ca și natură petrografică, compoziție chimică); ciment, cenușă de termocentrală, fibre, aditiv;
- utilizarea cenușilor zburătoare de termocentrală ca și liant activ în cadrul acestor compoziții, reducându-se astfel cantitatea totală de ciment, imprimă acestora implicit un caracter ecologic;
- îndeplinirea criteriilor de rezistență și performanță necesare destinației de mortar pentru rosturile nodurilor cadrelor hibride de beton armat rezistente la cutremur;
- evaluarea preliminară a potențialului de autovindecare (SH) în timp, după deprecierea probelor sub o solicitare predeterminată de întindere din încovoiere.

3.1.2 Stabilirea compozițiilor materialelor cementoase avansate SH-FECM

Materialele de tip SH – FECM au fost proiectate utilizând cu următorii constituenți:

- agregate fine: nisip silicios local cu granula maximă 0.5 mm;
- ciment Portland CEM I 52.5R;
- cenușă de termocentrală Govora;
- fibre sintetice de polipropilenă pentru armare dispersă;
- aditivi superplastifianți, puternic reducători de apă, de tip policarboxilat.

Cele patru compoziții prototip SH – FECM sunt realizate unitar, utilizând cantități similare de ciment, cenușă, agregat fin și fibre.

Parametrii care variază între compoziții sunt:

- cantitatea de apă / aditiv, cu efect implicit asupra raporturilor specifice (apă/ciment, apă/liant; lichid/ciment, lichid/liant);
- tipul de aditiv superplastifiant utilizat;
- succesiunea și durata operațiilor de amestecare/malaxare.

3.1.3. Caracteristici ale materialelor utilizate la realizarea compozițiilor materialelor cementoase avansate SH – FECM

3.1.3.1 Agregate fine

În compozițiile SH – FECM proiectate s-a utilizat ca și agregat nisip silicios fin, de proveniență locală, cu granula maximă 0.5 mm (vezi Figura 3.1).

Analiza granulometrică a agregatului folosit este prezentată în Tabelul 3.3, iar curba granulometrică rezultantă este prezentată în Figura 3.2.



Fig. 3.1. Nisip silicios fin, utilizat la realizarea compozițiilor prototip SH-FECM

Tab. 3.3. Analiza granulometrică a nisipului silicios fin

Clasă granulară	SITE (mm)	REST	0.063	0.125	0.25	0.5	1
0.200	200.000						
0 – 1 (seria 1)	Refuz (g)	17.12	30.15	41.75	98.22	12.76	0.00
	Refuz (%)	9	15	21	49	6	0
	Treceri (%)	0.0	8.6	23.6	44.5	93.6	100.0
0.200	200.000		0.063	0.125	0.25	0.5	1
0 – 1 (seria 1)	Refuz (g)	5.71	26.13	54.68	97.55	15.93	0.00
	Refuz (%)	3	13	27	49	8	0
	Treceri (%)	0.0	2.9	15.9	43.3	92.0	100.0
0.200	200.000		0.063	0.125	0.25	0.5	1
0 - 1 (medie)	Refuz (g)	11.42	28.14	48.22	97.89	14.35	0.00
	Refuz (%)	6	14	24	49	7	0
	Treceri (%)	0.0	5.7	19.8	43.9	92.8	100.0

Notă: densitatea absolută (masa volumică reală) a agregatului fin este de 1410 kg/m³.

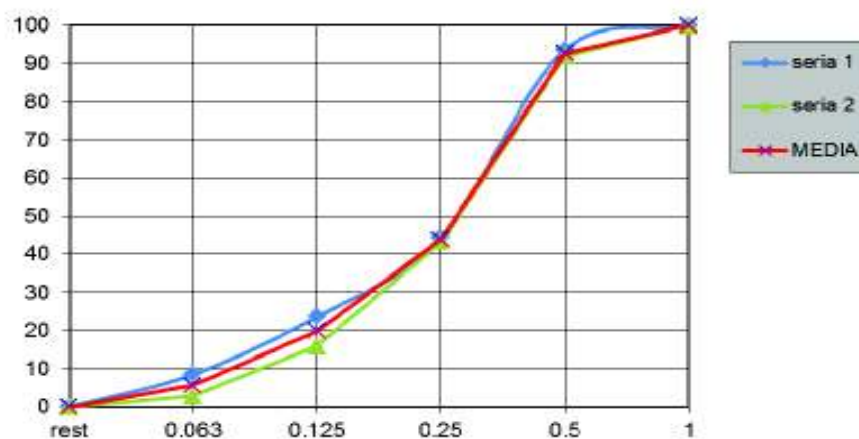


Fig. 3.2. Curba granulometrică a nisipului silicios fin

3.1.3.2 Ciment Portland

În compozițiile SH – FECM proiectate se utilizează ciment Portland CEM I 52.5 R (Figura 3.3).



Fig. 3.3. Ciment Portland, utilizat la realizarea compozițiilor prototip SH-FECM

3.1.3.3 Cenușă de termocentrală

În compozițiile SH – FECM proiectate se utilizează cenușă de termocentrală Govora (vezi Figura 3.4), având caracteristicile prezentate în Tabelul 3.4.



Fig. 3.4. Cenușă de termocentrală Govora

Tab. 3.4. Caracteristici fizico-mecanice ale cenușii de termocentrală Govora - determinări CEPROCIM

Finețea (%)	Densitate (kg/m ³)	Timp de priză (min.)	Stabilitate (mm)	Indice activitate pozzolanică la 90 zile (%)
59.00	1790	275	0	78.59

Determinarea indicelui de activitate a cenușii de termocentrală s-a realizat prin determinarea rezistenței la compresiune în conformitate cu EN 196-1 [73], conform specificațiilor SR EN 450-1:2012 [74]. Astfel, determinarea indicelui de activitate pozzolanică a cenușii zburătoare s-a determinat pe epruvete prismatice cu dimensiunile 40 x 40 x 160 mm, realizate conform cerințelor EN 196-1 [73] din mortar de ciment (vezi Figura 3.5):

- epruvete martor, având drept liant - ciment 100 %;
- epruvete cu cenușă, având drept liant ciment, în proporție de 75 % și cenușă zburătoare Govora în procent de 25 %.



Fig. 3.5. Prepararea / testare probelor de ciment și ciment + cenușă

Teste relevante asupra rezistenței la compresiune se efectuează la 28 zile, respectiv 90 zile (vezi Tabelul 3.5). Indicele de activitate pozzolanică nu trebuie să fie mai mic de 75% (pentru vârsta de 28 zile), respectiv 85% pentru 90 zile. Au fost efectuate determinări și asupra rezistenței la încovoiere.

Tab. 3.5. Determinarea indicelui de activitate pozzolanică pentru cenușă de termocentrală Govora. Caracteristici fizico-mecanice

Mortar	Masa la decofrare (g)	$R_{i,med}$ (N/mm ²)	Indice de activitate pozzolanică* (%)	$R_{c,med}$ (N/mm ²)	Indice activitate pozzolanică (%)
Mortar ciment 28 zile	570.7	7.5	103.4	52.3	100,4
Mortar ciment+cenușă 28 zile	562.8	7.8		52.5	
Mortar ciment 90 zile	577.0	8.0	86.7	54.2	105,0
Mortar ciment + cenușă 90 zile	555.7	7.7		56.9	

3.1.3.4 Aditiv superplastifiant, puternic reducător de apă tip policarboxilat

În compozițiile SH – FECM proiectate s-au utilizează două tipuri de aditiv superplastifiant, puternic reducător de apă tip policarboxilat, Master Glenium 115 și Master Glenium ACE 440, produși de firma BASF din Germania.

3.1.3.5 Fibre polipropilenă

Primele patru compoziții prototip SH – FECM proiectate utilizează fibre de polipropilenă MASTERFIBER® 246* (vezi Figura. 3.6), cu caracteristicile prezentate în Tabelul 3.6.



Fig. 3.6. Fibre de polipropilenă MASTERFIBER® 246

Tab. 3.6. Caracteristici fizico-mecanice ale fibrelor MASTERFIBER® 246*

Caracteristici fizico-mecanice (UM)	Valori
Tip de polimer	Polipropilenă compusă
Diametru (mm)	0.78
Lungime (mm)	39.00
Raport Lungime/Diametru	50
Culoare	Alb-transparent
Densitate (g/cm ³)	0.91
Punct de topire (°C)	160
Rezistența la întindere (MPa)	450 - 500
Absorbția de apă (%)	0.00 (hidrofobe)
Rezistența la Acid / Alkali	Ridicată
Număr de fibre/kg	Aprox.. 65000

Compozițiile îmbunătățite SH – FECM proiectate utilizează fibre de polipropilenă EUROFIBRES MF FINE + 1217 (Figura. 3.7), cu caracteristicile prezentate în Tabelul 3.7. Utilizarea acestui nou tip de fibre urmărește îmbunătățirea lucrabilității materialelor, facilitând punerea în operă și performanțe superioare printr-o compatibilitate îmbunătățită fibră – matrice.

**Fig. 3.7.** Fibre de polipropilenă EUROFIBRES MF FINE + 1217**Tab. 3.7.** Caracteristici ale fibrelor PP EUROFIBRES MF FINE + 1217

Caracteristici fizico-mecanice (UM)	Valori
Tip de polimer	Polipropilenă virgină
Densitate (g/cm ³)	0,91
Punct de topire (°C)	165
Rezistența la întindere (MPa)	320 - 400
Conductivitate electrică (Siemens)	<10
Secțiune	circulară
Diametru (μ)	15
Modul de elasticitate KN/mm ²	36
Lungime (mm)	12

* Conform fișei tehnice a producătorului

3.1.4 Tehnologia de realizare a materialelor cementoase avansate SH – FECM

3.1.4.1 Compoziții preliminare SH – FECM T1, T2, T3 și T4

Tehnologia de realizare a compoziției SH – FECM T1 cuprinde următoarele secvențe tehnologice:

- condiționarea materiilor prime, la o temperatură de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- dozarea componentelor după următoarea secvență:
 - agregate fine silicioase - nisip fin în procente propuse (uscate în prealabil în etuvă la 105°C),
 - 2/3 din apa de amestecare: secvență de malaxare și secvență de pauză;
 - liant: ciment și cenușa de termocentrală: secvență de malaxare viteză mare;
 - aditiv în amestec cu restul de apă (1/3): secvență de malaxare viteză mare,
 - fibre PP MASTERFIBER® 246: secvență de malaxare.

Tehnologia de realizare a compoziției SH – FECM T2 – T4 cuprinde următoarele secvențe tehnologice:

- condiționarea materiilor prime, la o temperatură de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- dozarea componentelor după următoarea secvență:
 - liant: ciment și cenușa de termocentrală;
 - agregate fine silicioase - nisip fin în procente propuse (uscate în prealabil în etuvă la 105°C): secvență de malaxare viteză mică;
 - 1/3 din apa de amestecare și 1/3 aditiv: secvență de malaxare și secvență de pauză;
 - 1/3 din apa de amestecare și 1/3 aditiv: secvență de malaxare și secvență de pauză;
 - restul de 1/3 din apa de amestecare și 1/3 aditiv: secvență de malaxare cu viteză mare;
 - fibre PP MASTERFIBER® 246 : secvență scurtă de malaxare.

Tehnologia concepută implică utilizarea unui malaxor cu paletă, având capacitatea vasului de amestec de 4.75 litri, cu o mișcare de rotație: 140/280 rot/minut, respectiv o mișcare de revoluție: 61.5 /123 rot/minut. Fișele de compoziție a SH – FECM T1 – T4 sunt menționate în Tabelul 3.8, iar secvențe specifice de realizare sunt prezentate în Figura 3.8. De asemenea s-au realizat 4 compoziții martor fără fibre (T1m-T4m).

Tab. 3.8. Fișe compoziții SH – FECM T1 – T4

<i>SH – FECM T1</i>											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 1	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.79	0.04	0.83	0.2% din volum	0.79	0.36	0.83	0.38
<i>SH – FECM T2</i>											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 1	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.82	0.04	0.86	0.2% din volum	0.82	0.37	0.86	0.39
<i>SH – FECM T3</i>											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 1	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.76	0.05	0.81	0.2% din volum	0.76	0.35	0.81	0.37
<i>SH – FECM T4</i>											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 2	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.75	0.04	0.79	0.2% din volum	0.75	0.34	0.79	0.36



Amestec uscat: liant și agregat fin



Malaxare amestec semiumed



Malaxare amestec fara fibre



Pauza la malaxare



Malaxare amestec cu fibre

Fig. 3.8. Compoziții prototip SH – FECM T1 – T4; secvențe de malaxare

3.1.4.2 Caracteristicile fizico-mecanice ale compozițiilor SH – FECM

Caracteristici în stare proaspătă: lucrabilitate și densitate aparentă



Compoziție SH – FECM T1 (fără fibre) pe masa de împrăștiere



Compoziție SH – FECM T1 (cu fibre) pe masa de împrăștiere



Compoziție SH – FECM T2 (fără fibre) pe masa de împrăștiere



Compoziție SH – FECM T2 (cu fibre) pe masa de împrăștiere

Fig. 3.9. Compoziții prototip SH – FECM T1 – T2; stare proaspătă



Compoziție SH – FECM T3 (fără fibre) pe masa de împrăștiere



Compoziție SH – FECM T3 (cu fibre) pe masa de împrăștiere



Compoziție SH – FECM T4 (fără fibre) pe masa de împrăștiere



Compoziție SH – FECM T4 (cu fibre) pe masa de împrăștiere

Fig. 3.10 Compoziții prototip SH – FECM T3 – T4; stare proaspătă

Consistența compozițiilor realizate s-a determinat prin metoda mesei de împrăștiere (vezi Figura 3.9 și 3.10), iar valorile obținute pe compozițiile prototip variază între 150 și 195 mm.

Valorile densităților în stare proaspătă ale compozițiilor prototip SH – FECM, variază între 2000 și 2200 kg/m³.

Caracteristicile în stare uscată

Epruvetele prismatice (vezi Figurile 3.11 și 3.12) realizate din materiale cementoase SH – FECM T1, T2, T3 și T4 au fost decofrate la vârsta de 24 h (timp în care au fost menținute acoperite în atmosferă cu umiditate relativă $RH > 95\%$). După decofrare epruvetele au fost menținute:

- 7 zile în apă la temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- până la data încercării (28 zile) epruvetele au fost menținute în condițiile: temperatură: $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$; RH – umiditate relativă: $(65 \pm 5) \%$.

În Tabelul 3.9 sunt prezentate rezultatele încercărilor la întindere din încovoiere și compresiune uniaxială pentru compozițiile SH – FECM T1 – T4. De asemenea sunt menționate și rezistențele aferente forței de fisurare la întindere prin încovoiere (R_{fi}^*). Tabelul 3.10 prezintă proprietățile mecanice pentru compozițiile martor T1m-T4m (corespunzătoare amestecurilor T1-T4 fără fibre).



Fig. 3.11 Compoziții prototip SH – FECM T3 – T4 (epruvete prismatice)



Fig. 3.12 Epruvete prismatice după testarea la întindere prin încovoiere

Tab. 3.9. Caracteristici mecanice compozițiile T1 – T4

Compoziția	Proba	R_{fi}^* (N/mm ²)	R_{fi} (N/mm ²)	$R_{fi,med}$ (N/mm ²)	$R_{c,med}$ (N/mm ²)
T1	T1/1	-	14.7	18.7	61.3
	T1/2	7.7	21.3		
	T1/3	6.8	20.1		
T2	T2/1	4.8	12.8	13.5	62.1
	T2/2	4.5	16.2		
	T2/3	5.6	11.5		
T3	T3/1	5.2	20.9	18.3	68.8
	T3/2	4.0	17.0		
	T3/3	7.1	17.0		
T4	T4/1	4.9	11.3	13.8	70.5
	T4/2	7.5	15.4		
	T4/3	7.7	14.8		

Tab. 3.10. Caracteristici mecanice compozițiile martor Tm1 – T4m

Compoziția	$R_{fi,med}$ (N/mm ²)	$R_{c,med}$ (N/mm ²)
T1m	5.8	71.6
T2m	8.6	69.0
T3m	7.5	74.6
T4m	8.6	70.0

Comparând caracteristicile din Tabelele 3.9 și 3.10 rezultă o relativă incompatibilitate a fibrelor utilizate cu matricea de compozit.

Rezultă că fibrele curent disponibile la ora actuală pe piața românească nu satisfac, în primul rând datorită dimensiilor, nu satisfac exigențele ECC. În continuare s-au înlocuit fibrele utilizate cu fibre de polipropilenă EUROFIBRES, iar amestecurile s-au optimizat atât pentru aplicația specifică îmbinărilor structurilor seismice hibride (subiect al unor cercetări desfășurate în paralel) cât și a studiului în continuare a potențialului de autovindecare.

3.1.4.2 Compoziții individualizate SH – FECM T1, T2, T3 și T4

Raportat la compozițiile inițiale, pentru noile amestecuri s-au modificat cantitățile de apă și de tipul de fibre utilizat, în vederea îmbunătățirii lucrabilității materialelor, facilitând punerea în operă.

Nodul hibrid antiseismic - concept

Compozițiile rezultate sunt utilizate ca și mortar la îmbinarea grindă-stâlp în cadrul nodului hibrid antiseismic, tridimensional, studiat în cadrul INCD URBAN INCERC Sucursala Cluj-Napoca (vezi Figura 3.13).



Fig. 3.13 Nodul hibrid antiseismic - ansamblu

Particularitatea conceptului constă în echiparea elementului cu armătură neaderentă în zona de îmbinare grindă-stâlp, unde sunt așteptate concentrări de eforturi la întindere în caz de solicitare seismică, permițând înlocuirea acestora în caz de deteriorare și avarie datorată solicitărilor. În cadrul structurii antiseismice s-au identificat ca și zone esențiale suprafețele de îmbinare grindă stâlp, unde sunt așteptate concentrații semnificative, atât de compresiune cât și de întindere. (vezi Figura 3.14 și Figura 3.15).



Fig. 3.14 Nodul hibrid antiseismic – detaliu de colț, îmbinare grindă-stâlp

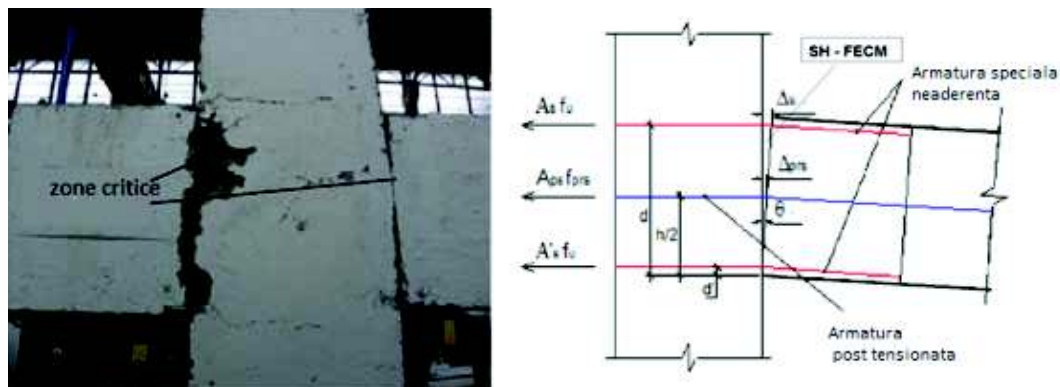


Fig. 3.15 Nodul hibrid antiseismic (plan) – detaliu de îmbinare grindă-stâlp

Compoziții SH – FECM T12, T13 și T14

Compozițiile T12, T13 și T14 au fost realizate în vederea utilizării ca mortar de monolitizare a îmbinării grindă-stâlp, cu performanțe superioare atât din punct de vedere al rezistenței la compresiune, a rezistenței la întindere din încovoiere, dar și al aderenței la startul suport, respectiv betonul din elemente structurale; suplimentar se dorește și evaluarea performanțelor de autovindecare a fisurilor rezultate în urma avarierii structurii ca rezultat direct testelor specifice.

În cadrul noilor compoziții au fost utilizate fibrele de Polipropilenă EUROFIBRES MF FINE + 1217. Secvențele de malaxare sunt identice cu cele aferente compozițiilor T2 T3 și T4. Aditivul utilizat este Glenium ACE440, produs de către BASF (Germania). Fișele de compoziție a SH – FECM T12 – T14 sunt prezentate în Tabelul 3.11, iar secvențele specifice de realizare sunt aceleași (vezi Figura 3.8).

Tab. 3.11. Fișe compoziții SH – FECM T12 – T14

SH – FECM T1											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 2	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.80	0.04	0.83	0.2% din volum	0.79	0.36	0.83	0.38
SH – FECM T2											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 2	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.83	0.04	0.88	0.2% din volum	0.83	0.38	0.88	0.40
SH – FECM T3											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 2	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.83	0.04	0.88	0.2% din volum	0.83	0.38	0.88	0.40

Caracteristicile fizico-mecanice în stare proaspătă ale compozițiilor SH – FECM T12-T14

Consistența compozițiilor realizate s-a determinat prin metoda mesei de împrăștiere, iar valorile obținute pe compozițiile prototip variază între 150 și 165 mm. Valorile densităților în stare proaspătă ale compozițiilor îmbunătățite SH – FECM, variază între 2000 și 2200 kg/m³. Aspectul în stare proaspătă este prezentat în Figura 3.16.

Compoziție SH-FECM
în stare proaspătă



Compoziție SH-FECM
Aplicare la interfața grindă stâlp



Compoziție SH-FECM
în stare proaspătă; prelevare
epruvete prismatice



Fig. 3.16 Compoziții SH – FECM T12, T13 și T14 în stare proaspătă

Caracteristicile fizico-mecanice în stare întărită ale compozițiilor SH – FECM T12-T14

Epruvetele prismatice aferente SH – FECM T12 au fost testate la vârsta de 28 zile, respectiv cele aferente SH – FECM T13 și T14 au fost testate la vârsta de 22 zile, respectiv 15 zile, vârsta la momentul de testare a elementului – nod hibrid (vezi Figura 3.17), iar rezultatele sunt prezentate în Tabelul 3.12.

Tab. 3.12. Caracteristici mecanice compozițiile T12 – T14

Compoziția	Proba	R_{ti} (N/mm ²)	R_{ci} (N/mm ²)	$R_{ti,med}$ (N/mm ²)	$R_{c,med}$ (N/mm ²)
T12	T12/1	5.5	75.1/69.0	5.7	73.2
	T12/2	6.0	76.6/75.4		
	T12/3	5.5	72.7/70.2		
T13	T13/1	6.3	76.4/71.7	6.4	73.8
	T13/2	6.5	68.8/76.9		
	T13/3	6.4	75.4/73.9		
T14	T14/1	5.3	65.5/68.6	5.3	66.5
	T14/2	5.1	67.1/66.1		
	T14/3	5.4	66.4/65.2		

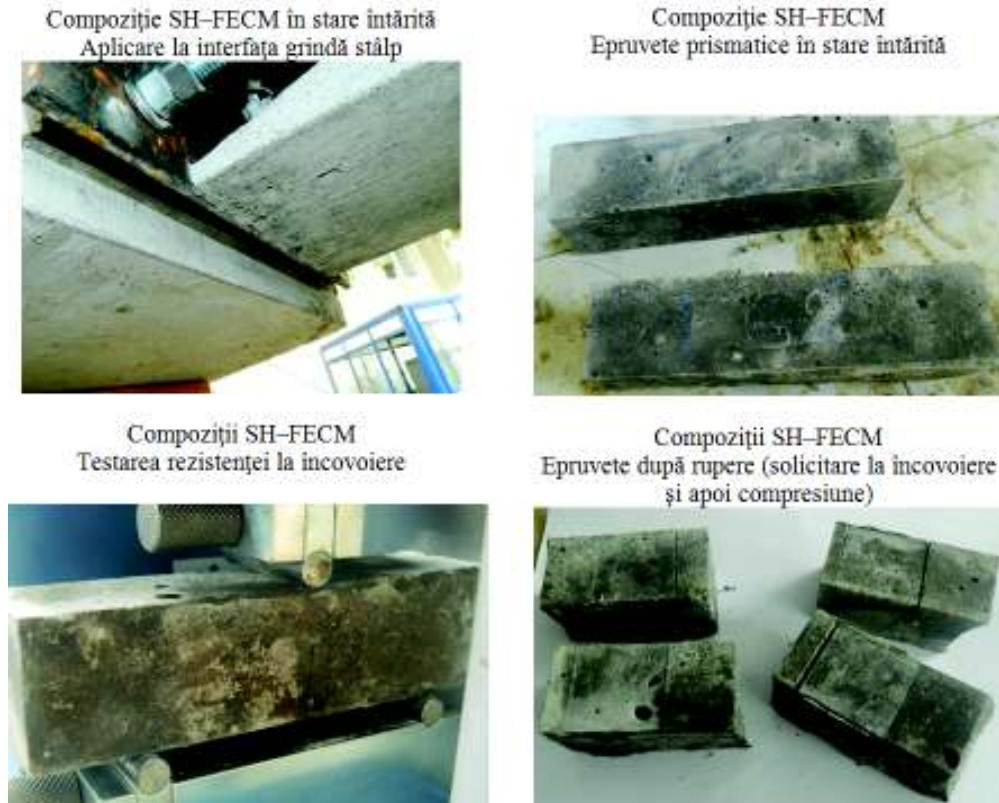


Fig. 3.17 Epruvete SH – FECM T12, T13 și T14

Compoziția SH – FECM T15

Compoziția T15 au fost realizată, la fel ca și compozițiile anterioare T12, T13 și T14, în vederea utilizării ca mortar de monolitizare a îmbinării grindă-stâlp. De asemenea au fost utilizate fibrele de Polipropilenă EUROFIBRES MF FINE + 1217 iar secvențele de malaxare sunt identice cu cele aferente compozițiilor T12 - T4. Aditivul utilizat este Glenium ACE440, produs de către BASF (Germania).

Ca și particularitate în procedura de obținere a mortarului se menționează că înaintea includerii în compoziție, fibrele sunt umezite cu o cantitate redusă de apă și de asemenea ulei mineral, în vederea saturării lor și implicit a reducerii absorbției de lichid din compoziția în care sunt înglobate; în acest fel se obține o îmbunătățire a lucrabilității mortarului, fără creșterea cantității de lichid în amestec. Compoziția prototip SH – FECM T15 are un aspect fluid (vezi Figura 3.18) în stare proaspătă, permițând aplicarea cu ușurință în spațiile înguste la interfața elementelor spațiale ale nodului hibrid



Fig. 3.18 Compoziție SH – FECM T15 – stare proaspătă

Fișele de compoziție a SH – FECM T15 sunt menționate în Tabelul 3.13

Tab. 3.13. Fișă compoziție SH – FECM T15

<i>SH – FECM T1</i>											
Ciment	Cenușă	Liant	Nisip	Apă	Aditiv 2	Lichid	Fibre	W/C	W/B	L/C	L/B
1	1.2	2.2	0.8	0.83	0.04	0.88	0.2% din volum	0.83	0.38	0.88	0.40

Caracteristicile fizico-mecanice în stare proaspătă ale compozițiilor SH – FECM T15

Consistența compoziției realizate s-a determinat prin metoda mesei de împrăștiere, iar valorile obținute pe compozițiile prototip variază între 150 și 165 mm.

Valorile densităților în stare proaspătă ale compozițiilor îmbunătățite SH – FECM T15, este de 2200 kg/m³.

Identificarea proprietății de autovindecare a compozițiilor SH – FECM T15

Identificarea proprietății de autovindecare (Self - Healing) a mortarelor cementoase s-a realizat pe epruvete prismatice 40x40x160 mm din compoziția SH – FECM T15 (vezi Figura 3.19):

- prin închiderea fisurii (self-sealing, SS);

- prin recuperarea caracteristicilor fizico-mecanice (self-repairing, SR).

În epruvetele prismatice a fost indusă o stare de fisurare prin solicitare la întindere prin încovoiere (vezi Figura 3.20):

- epruveta nr. 1 a fost supusă forței de rupere, generând și rezistența la întindere prin încovoiere asociată probei, $R_t = 5.0 \text{ N/mm}^2$;

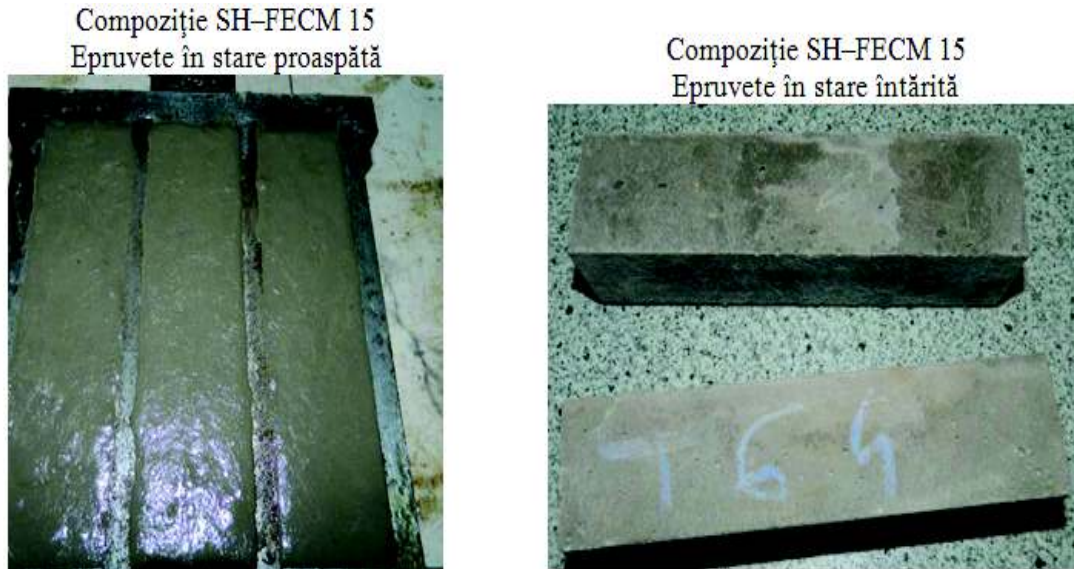


Fig. 3.19 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – stare proaspătă și întărită

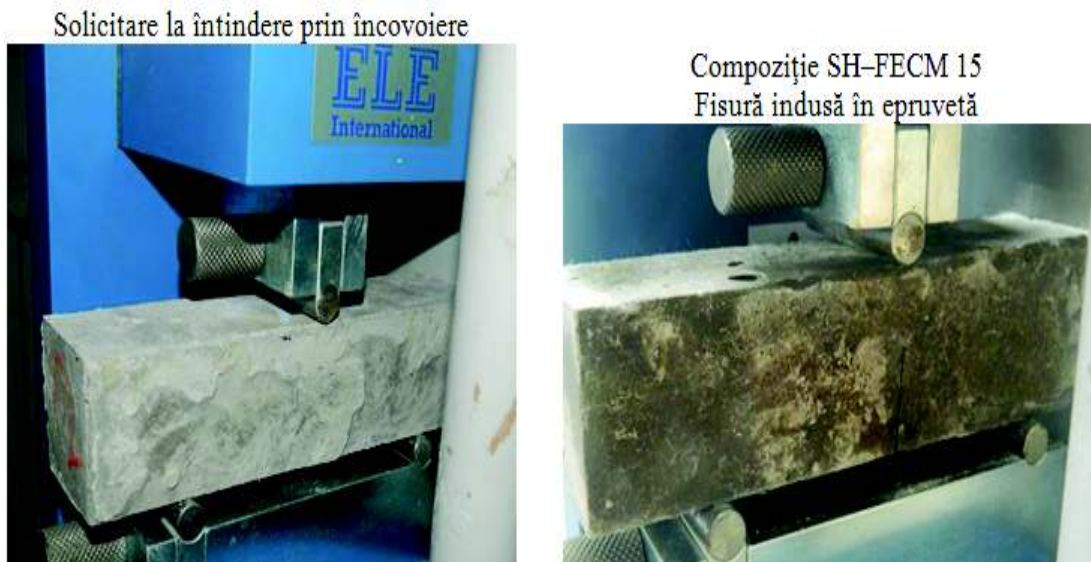


Fig. 3.20 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – solicitare la încovoiere în trei puncte; test inițial

- în epruvetele 2 și 3 a fost indus un efort ce corespunde unei încărcări egale cu aproximativ 90 % din încărcarea de rupere, efort ce a determinat apariția unei stări de fisurare în epruvete.

Tab. 3.14. Compoziția SH-FECM T15 – solicitare la încovoiere – 20 zile

Nr. crt.	L (mm)	b (mm)	l (mm)	P (kN)	R _{ti} (N/mm ²)	Observații
1	160	40	100	2.2*	5.0*	Efort la rupere
2	160	40	100	1.9**	4.4**	Fisurare indusă la 90% din capacitatea portantă
3	160	40	100	1.9**	4.4**	Fisurare indusă la 90% din capacitatea portantă

*Epruvetă supusă inițial efortului de rupere la întindere prin încovoiere;

**Epruvete supuse inițial unui efort de aproximativ 90% din valoarea efortului de rupere la încovoiere.

Epruvetele au fost supuse unui număr de cicluri de condiționare, în vederea demarării procesului de închidere a fisurii (self-closing) și eventuală recuperare a capacității portante.

Ciclurile de condiționare constau în:

- epruvetele sunt menținute în apă potabilă, la temperatura de 20±2 °C, timp de 8 h;
- epruvetele sunt menținute în aer, în condițiile: T 21 ± 3 °C; RH: 50 ± 5 % 16 h.

Capacitatea de autosigilare (self-closing)

Examinările vizuale realizate asupra epruvetelor prismatice cu dimensiunea 40x40x160 mm după efectuarea a 10, 30 și respectiv 50 cicluri de condiționare indică existența potențialului de închidere a fisurii (self - closing) prin precipitarea carbonatului de calciu, în condițiile expunerii epruvetelor la cicluri de condiționare aer – apă, în condiții standard.

Prin constatarea vizuală a fisurilor induse în epruvete se estimează că efectul de închidere al acestora este mai pronunțat în intervalul 10-30 cicluri (vezi Figurile 3.21 și 3.22).

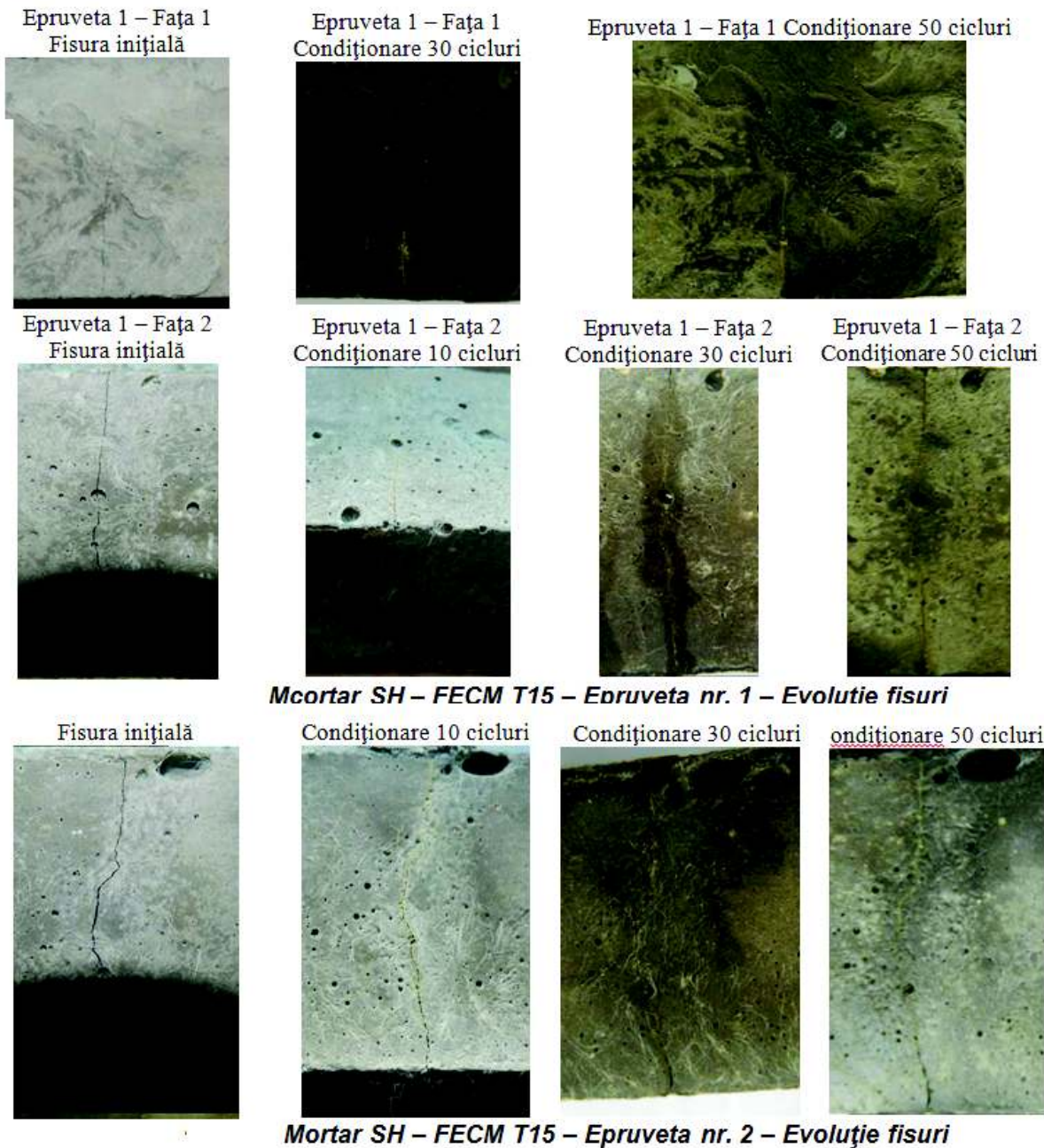


Fig. 3.21 Epruvete prismatice 1 și 2 (SH – FECM T15) – evoluție fisuri

Capacitatea de recuperare

După efectuarea a 50 cicluri de condiționare pentru epruvetele analizate, acestea au fost retestate la solicitarea de întindere prin încovoiere (vezi Figura 3.21).

Rezultatele prezentate în Tabelul 3.15 demonstrează capacitatea mortarului de recuperare a capacității portante inițiale.

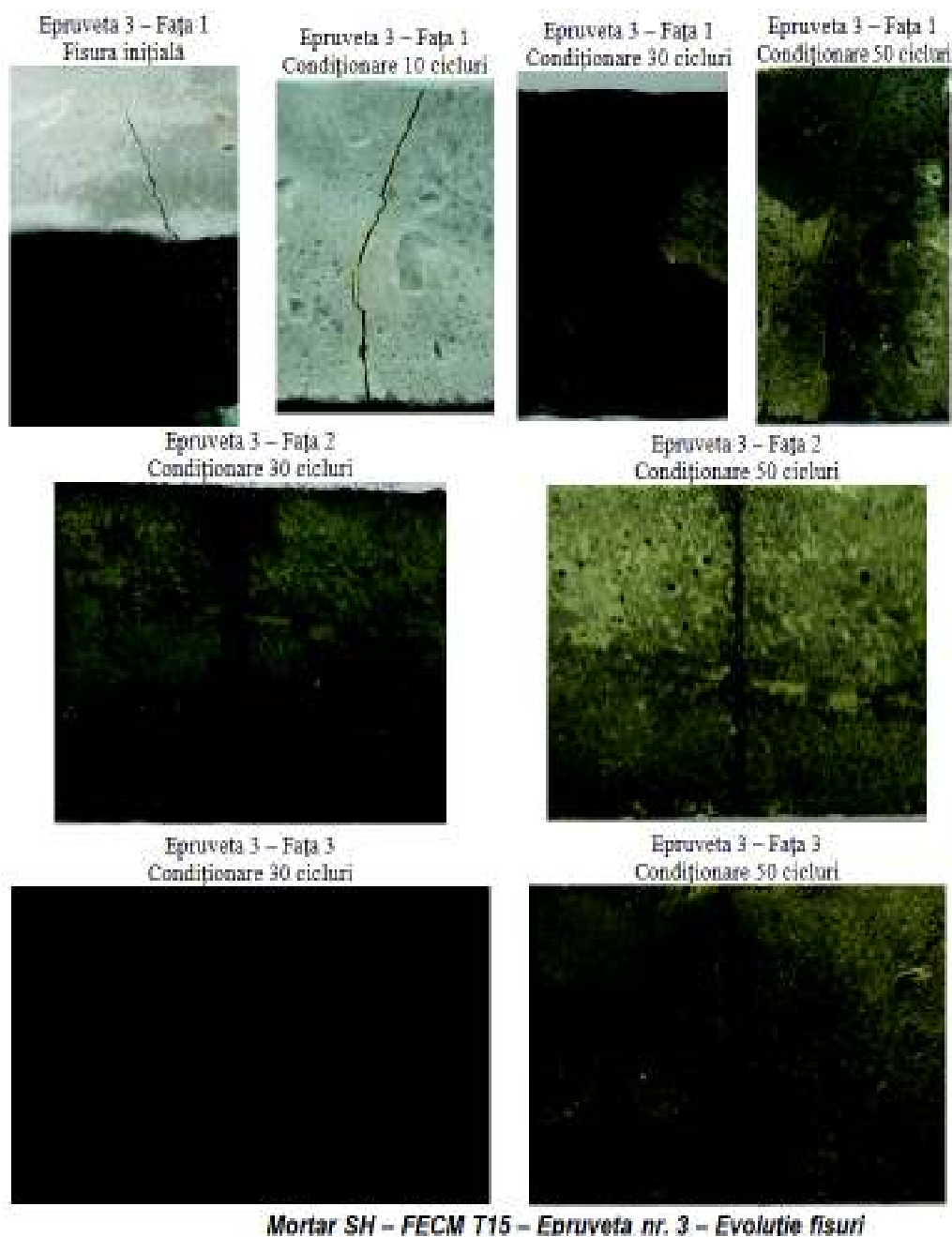


Fig. 3.22. Epruvetă prismatică 3 (SH – FECM T15) – evoluție fisuri

Tab. 3.15. Compoziția SH–FECM T15 – solicitare la încovoiere – după cicluri de condiționare

Nr. crt.	L (mm)	b (mm)	l (mm)	P (kN)	R_{ti} (N/mm ²)	Observații
1	160	40	100	2.32*	5.4*	Recuperarea 100% a capacității portante inițiale
2	160	40	100	2.6**	6.1**	Fisurare indusă la 90% din capacitatea portantă
3	160	40	100	2.0**	4.7**	Fisurare indusă la 90% din capacitatea portantă

*Epruvetă supusă inițial efortului de rupere la întindere prin încovoiere;

**Epruvete supuse inițial unui efort de aproximativ 90% din valoarea efortului de rupere la încovoiere.

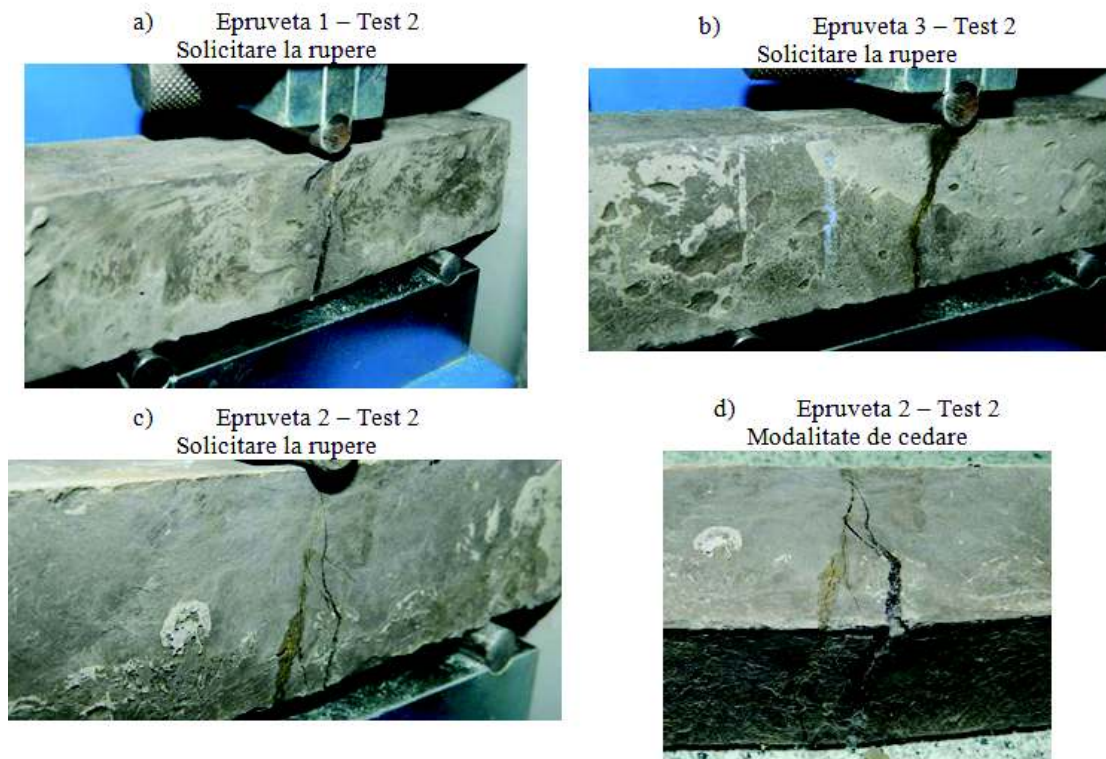


Fig. 3.23 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – solicitare la încovoiere în trei puncte; test final, după condiționare

Concluzii asupra capacității de autovindecare a compozițiilor SH – FECM T15

Concluziile în urma efectuării retestării la întindere din încovoiere pentru epruvetele prismatice sunt succint prezentate astfel:

- în cazul epruvetei nr. 1, supusă unui efort de rupere în cazul testului inițial, se remarcă o recuperare de 100 % a capacității portante inițiale ($R_{t2}=5.4 \text{ N/mm}^2$); fisura de rupere este suprapusă peste fisura inițială, închisă în urma ciclurilor de condiționare și redeschisă prin solicitarea testului 2 (vezi Figura 3.23.a).
- epruveta 2, supusă inițial unui efort de fisurare de aproximativ 90 % din efortul de rupere estimat pe epruveta 1, prezintă o rezistență corespunzătoare la solicitarea aferenta testului 2 ($R_{t2}= 6.1\text{N/mm}^2$); se remarcă faptul că fisura de rupere este distinctă de fisura inițială, remediată semnificativ în urma ciclurilor de condiționare; acest fapt demonstrează o reparare în profunzime a materialului, care poate dezvolta

„pattern” distinct de cedare în urma retestării (vezi Figura 3.23.c,d).

- în cazul epruvetei nr. 3, supusă inițial unui efort de fisurare de aproximativ 90 % din efortul de rupere estimat pe epruveta 1, prezintă o rezistență sensibil inferioară celei estimate, la solicitarea aferentă testului 2 ($R_{t2}=4.7 \text{ N/mm}^2$); fisura de rupere este suprapusă peste fisura inițială, închisă parțial în urma ciclurilor de condiționare și redeschisă prin solicitarea testului 2 (vezi Figura 3.21b).

Ulterior efectuării testului 2 de întindere prin încovoiere, jumătățile de prismă rezultate au fost încercate la compresiune (Figura 3.24):



Fig. 3.24 Epruvete prismatice SH – FECM T15 – solicitare la compresiune

- eforturi de rupere la compresiune ($R_c=72.8 \text{ MPa}$), pentru determinarea capacității portante – 3 epruvete;
- eforturi de fisurare, prin efectuarea de cicluri încărcare –descărcare pe palierul 0-90 % din capacitatea portantă determinată anterior.

4. PROIECTAREA ȘI PROPRIETĂȚI LECOMPOZIȚIILOR ECC CU CAPACITĂȚE DE AUTOVIDENCARE

4.1 Aspecte preliminare

În perioada ianuarie-noiembrie 2015, s-a conceput și derulat un program experimental conceput în cadrul Laboratorului Magnel, Universitatea Ghent, Belgia. Programul s-a derulat sub coordonarea prof. dr. Nele De Belie și dr. Didier Snoek (ca și coordonatori din partea Universității Ghent), respectiv a prof. dr. Călin Mircea, conducător/coordonator al stagiului doctoral la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

Programul experimental a urmărit evaluarea capacității de autovindecare a ECC în baza unor parametri rezultați din încercări experimentale specifice, după cum urmează:

- la întindere din încovoiere (vezi capitolul 5);
- șoc/impact (vezi capitolul).

Având în vedere caracterul relativ de noutate al materialelor ECC, încercările s-au realizat în baza unor proceduri nestandardizate. Acestea sunt însă validate în literatura de specialitate de profil, personalități marcante în domeniu contribuind la elaborarea lor.

4.2 Compoziții ECC

4.2.1 Referințe

În vederea efectuării testelor specifice și evaluare ulterioară a capacității de autovindecare au fost proiectate o serie de compoziții de materiale ECC, ajustate prin turnări experimentale.

Proiectarea și optimizarea compozițiilor ECC dezvoltate au avut următoarele repere de referință:

- compozițiile prototip de tip SH- FECM, proiectate și studiate în cadrul programului experimental preliminar prezentat în capitolul 3.
- mortarul brevetat ECC – M45, proiectat, optimizat și testat de către Victor Li [13];
- mortarele ECC proiectate de către D. Snoeck [30], pornind la rândul său, în dezvoltarea teoretică și practică a conceptului său propriu de la compozițiile consacrate ale lui Victor Li [13].

În prima fază s-a stabilit un amestec inițial de referință, denumit în cele ce urmează M 1.4. Acesta este de fapt compoziția ECC consacrată (de bază) a laboratorului Magnel, stabilită de către dr. ing. D. Snoeck prin cercetările publicate în teza sa [30]. Produsul M 1.4 respectă compoziția, proporțiile și secvențele de malaxare specifice turnărilor experimentale de volum redus [30].

În vederea optimizării lucrabilității a fost operată o ajustare a cantității de aditiv superplastifiant utilizat, față de compoziția originală. Alte ajustări s-au operat în baza experienței acumulate anterior cu celelalte compoziții de referință și a documentării efectuate.

4.2.2 Materiale

Materialele utilizate pentru compozitele de tip ECC (vezi Fig. 4.1) sunt precizate în Tabelul 4.1.

Tab. 4.1. Materiale componente ale compozițiilor ECC [42]

Material	Cod	Producător /Proveniență	Caracteristici
Ciment	C	Holcim, Belgia	Ciment Portland CEM I 52.5N Suprafața specifică (Metoda Blaine): 390m ² kg ⁻¹ Densitate: 3140 Kg/m ³
Cenușă de termocentrală	FA	Belgia	Clasa F Compoziția oxidică: CaO: 2.47%; SiO ₂ : 49.34%; Al ₂ O ₃ : 24.55%; Fe ₂ O ₃ : 3.99%; SO ₃ : 3.07%; MgO: 1.02%; K ₂ O: 0.77%; Na ₂ O: 0.41%; Cl ⁻ :0.0%; S ²⁻ : 0.0%; Mn: 0.0% Suprafața specifică (Metoda Blaine): 330m ² kg ⁻¹ Densitate: 2250 Kg/m ³
Agregate fine	S	SIBELCO, Olanda	Nisip silicios M34, cu granula maximă Ø 0.2mm Densitate: 2250 Kg/m ³
Aditiv	Spl/A	BASF, Germania	Aditiv superplastifiant, puternic reducător de apă, de tip policarboxilat (Glenium 51, concentrație 35%) Densitate: 1100 Kg/m ³
Apă	W	-	Apă curentă
*Fibre sintetice PVA	PVA I	Kuraray, Japan	Lungime fibră: 8 mm; Diametru: Φ39μm; Densitate: 1300 Kg/m ³ Lubrifiant: 1.2 % ulei mineral Rezistență la întindere: 1560±325 MPa, Alungire: 6.5±1.5 %
Fibre sintetice PVA	PVA II	Redco nv, Belgia	Lungime fibră: 6 mm; Sensibil lubrefiate cu ulei mineral Densitate: 1300 Kg/m ³
Fibre sintetice PP	PP I	Redco nv, Belgia	Lungime fibră: 6 mm; Densitate: 910 Kg/m ³
Fibre sintetice PP	PP II	Redco nv, Belgia	Fibră monofilament Lungime fibră: 8 mm; Densitate: 910 Kg/m ³

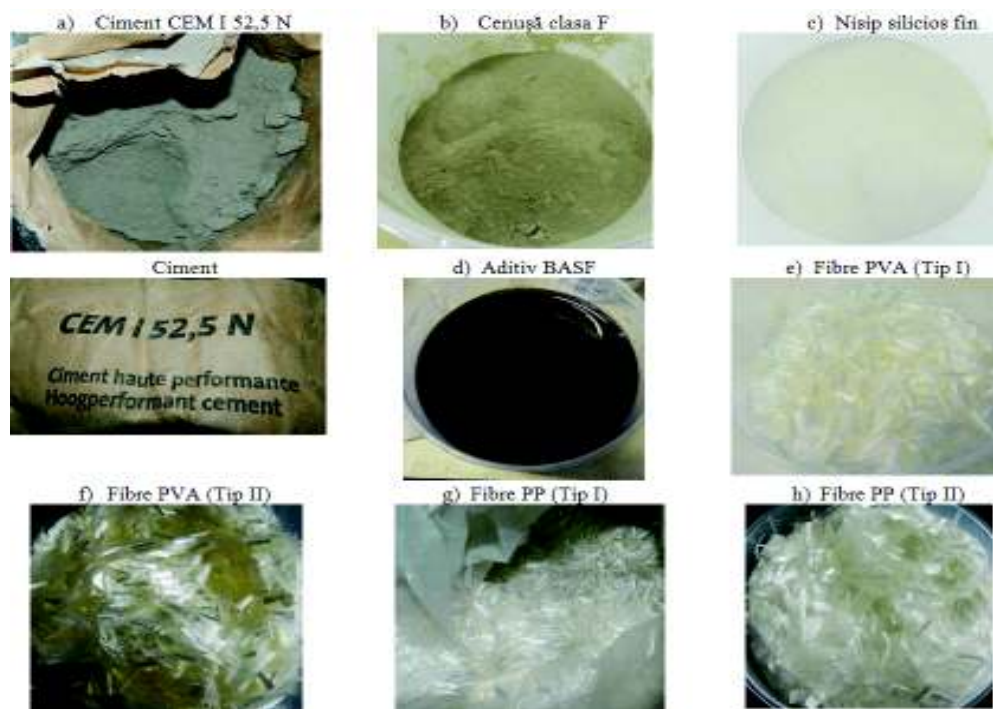


Fig. 4.1. Mortare ECC - materiale componente

4.2.3 Parametrii variabili

Raportul Cenușă / Ciment (FA /C): au fost considerate patru grupuri de compoziții, cu raporturile specifice Cenușă/Ciment (FA/C) diferite: M1 cu FA/C=1.0; M2 cu FA/C=1.2; M3 cu FA/C=1.5; și M4 cu FA/C=2.4.

Fibrele Polimerice: au fost utilizate patru tipuri de fibre polimerice, două tipuri PVA (I și II) și două tipuri PP (I și II), variate în cadrul grupului de compoziții M1 (FA/C = 1.0). Grupul de compoziții M2, M3 și M4 au fost dezvoltate utilizând fibrele considerate cele mai eficiente, respectiv PVA I. Compozițiile ECC și martori, în funcție de tipul și procentul (% din volum) de fibre sunt enumerate mai jos:

- Fibre PVA I (compoziții M 1.2, M 1.3, M 1.4, M 2.2, M3.2 și M4.2);
- Fibre PP I: M 1.5;
- Fibre PP II: M 1.6;
- Fibre PVA II: M 1.7;

Procentul (volumetric) de fibre polimerice - armare dispersă:

- M 1.1 – mortarul referință M1(0% fibre);
- M 1.2 – 0,5 % (fibre PVA I);
- M 1.3 – 1,0 % (fibre PVA I);
- M 1.4 – 2,0 % (fibre PVA I);
- M 1.5 – 2,0 % (fibre PP I);
- M 1.6 – 2,0 % (fibre PP II);
- M 1.7 – 2,0 % (fibre PVA II);
- M 2.1 – mortarul referință M2 (0% fibre);
- M 2.2 – 2,0 % (fibre PVA I);
- M 3.1 – mortarul referință M3 (0% fibre);
- M 3.2 – 2,0 % (fibre PVA I);
- M 4.1 – mortarul referință M4 (0% fibre);
- M 4.2 – 2,0 % (fibre PVA I).

4.2.4 Parametrii constanți

Parametrii constanți din cadrul compozițiilor studiate sunt:

- cantitatea de liant (aproximativ 1220 kg/m^3);
- tipul și cantitatea de nisip silicios fin: 426 kg/m^3 ;
- cantitatea de apă: 365 kg/m^3 ;
- raporturile specifice L/B (conținutul de lichid apă + aditiv, raportat la materialul liant C + FA).

Compozițiile dezvoltate pornind de la M 1.4 includ variația parametrilor anterior menționați, în vederea fundamentării în mod cât mai elocvent a concluziilor cu privire la obiectivele urmărite în acest studiu. Dintre cei patru parametri, creșterea cantității de cenușă de termocentrală (FA) raportată la cantitatea de ciment (C) în matrice, gradat, de la FA/C: 1.0 pentru M1, la 1.2 pentru M2, ulterior 1.5 pentru M3 și apoi 2.4 pentru M4 este fundamentată de cercetările lui Li [75] privind comportamentul dinamic al compozițiilor ECC: rezistența la șoc și evaluarea ductilității în condiții de încercare cu rate ridicate de încărcare. V.C. Li remarcă performanțele nesatisfăcătoare ale PVA ECC M45 privind scăderea dramatică a palierului de autoconsolidare în condiții de solicitare cu rată de încărcare ridicată. Soluția propusă pentru îmbunătățirea performanțelor la solicitări dinamice este creșterea ponderii cenușii (FA) în raport cu cimentul, pentru lubrifierea suplimentară a matricei cementoase și implicit pentru a crește potențialul dezvoltării de microfisuri sub sarcină.

Au fost studiate și compoziții realizate cu procent diminuat de fibre (0.5% din volum, respectiv 1.0 %), însă acestea nu prezintă dezvoltarea microfisurii sub sarcină. Procentul optim de armare dispersă se dovedește a fi 2.0 % din volum. Un procent mai ridicat implică o consistență mai vârtoasă a compozițiilor în stare proaspătă și fără a se obține un aport superior în termeni de rezistență sau ductilitate [30]. Cantitatea de aditiv a fost adaptată corespunzător pentru fiecare compoziție, considerând atât cantitatea de ciment din compoziții cât și tipul de fibre utilizate.

4.2.5 Dozaje specifice

Tabelul 4.2 prezintă dozajele amestecurilor martor și cu fibre pentru compozițiile de bază pentru demersul științific efectuat în cadrul stagiului de doctorat și prezentat în cele ce urmează.

Tabelul 4.3 prezintă o serie de compozițiile complementare (martor și cu fibre), parțial procesate în cadrul demersului de cercetare și componente a unei cercetări viitoare.

Tab. 4.2. Compoziții principale ECC (în funcție de FA/C): M1, M2, M3 și M4

Constituent/Raport	Compoziția							
	M 1.1	M 1.4	M 2.1	M 2.2	M 3.1	M 3.2	M 4.1	M 4.2
Ciment Portland C (kg/m ³)	608	608	560	560	486	486	360	360
Cenușă termocentrală FA (kg/m ³)	608	608	672	672	729	729	864	864
Liant B (kg/m ³)	1216	1216	1232	1232	1215	1215	1224	1224
Raport FA/C	1.0		1.2		1.5		2.4	
Nisip S (kg/m ³)	426	426	426	426	426	426	426	426
Aditiv A (kg/m ³)	3.6	10	3.6	9	3.6	8	3.6	7
Apă W (kg/m ³)	365	365	365	365	365	365	365	365
Lichid L (kg/m ³)	368.6	375	368.6	374	368.6	373	368.6	372
Raport W/C	0.60	0.60	0.65	0.65	0.75	0.75	1.01	1.01
Raport W/B	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Raport L/C	0.61	0.62	0.66	0.67	0.76	0.77	1.02	1.03
Raport L/B	0.30	0.31	0.30	0.30	0.30	0.31	0.30	0.30
Fibre (g)	-	26	-	26	-	26	-	26
Fibre (% din volum)	-	2	-	2	-	2	-	2

Tab. 4.3. Compoziții complementare ECC: M1 (Raport FA/C = 1.0; variația tipului de fibre și a procentului de armare)

Constituentul/Raport	Compoziția						
	M 1.1	M 1.2	M 1.3	M 1.4	M 1.5	M 1.6	M 1.7
Ciment Portland C (kg/m ³)	608	608	608	608	608	608	608
Cenușă de termocentrală FA (kg/m ³)	608	608	608	608	608	608	608
Liant B (kg/m ³)	1216	1216	1216	1216	1216	1216	1216
Nisip S (kg/m ³)	426	426	426	426	426	426	426
Aditiv A (kg/m ³)	3.6	5.2	6.8	10	14	14	14
Apă W (kg/m ³)	365	365	365	365	365	365	365
Lichid L (kg/m ³)	368.6	370.2	371.8	375	379	379	379
Raport W/C	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.61
Raport W/B	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31
Raport L/C	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.62
Raport L/B	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
Tip Fibre	-	PVA I	PVA I	PVAI	PP I	PP II	PVA II
Fibre (g)	-	6.5	13.0	26	30	30	26
Fibre (% din volum)	-	0.5	1.0	2	2	2	2

4.2.6 Secvențe specifice de malaxare

Comparativ cu secvențele inițiale de malaxare, utilizate în cadrul programului experimental anterior menționat (vezi capitolul 3), au fost reduși timpii de malaxare și succesiune adăugării materialelor componente: Materialul liant se amestecă în stare uscată, este adăugată cantitatea de lichid (apă și aditiv supersplastifiant), iar la scurtă durată nisipul silicos fin; este introdusă o pauză la malaxare, după care sunt adăugate fibrele, în aproximativ două - trei etape, în vederea obținerii unui amestec cât mai omogen din punctul de vedere al distribuției acestora în compoziție.

Turnările experimentale s-au realizat cu ajutorul unui malaxor cu paletă (Figura 4.2), în conformitate cu specificațiile EN 196-1 [73], având capacitatea vasului de amestec de 4.75 litri, cu o mișcare de rotație: 140/280 rot/minut (Low speed și High Speed), respectiv o mișcare de revoluție: 61.5/123 rot/minut.



Fig. 4.2. Malaxor cu paletă conform EN 196-1 [73] (Laboratorul Magnel)

Tehnologia de malaxare, specifică turnărilor experimentale de volum redus (de maxim 1.2 l) cuprinde următoarele secvențe tehnologice:

- cimentul (C) + cenușa de termocentrală (FA): - Malaxare uscată, cu viteză redusă, timp de 30 s, pentru omogenizare;
- apa (W) - se adaugă progresiv pe parcursul a 30 s de malaxare cu viteză scăzută; la finalul secvenței se adaugă Aditivul superplastifiant (Spl);
- nisipul (S) – se adaugă progresiv pe parcursul a 30 s de malaxare cu viteză redusă;
- malaxare timp de 30s cu viteză ridicată;
- pauză 30 s, timp în care pereții malaxorului sunt curățați cu racleta de plastic;
- pauză 60 s;
- malaxare 6 0s cu viteză redusă, timp în care progresiv de adaugă cantitatea de fibre;
- malaxare 60 s cu viteză ridicată.

4.2.7 Confecționare epruvete

După finalizarea malaxării compoziția este turnată în cofraje confecționate din OSB, lubrificate în prealabil cu ulei mineral și având dimensiuni specifice tipului de determinare experimentală desemnată:

- **încovoiere cu contact în patru puncte (4PB)** - epruvete de tip cupon cu dimensiunile 160x40x10 mm (vezi Figura 4.3);
- **teste de impact/șoc prin metoda căderii libere (Drop-weight test DWT)** – epruvete de tip placă cu dimensiunile 200x200x15 mm (vezi Figurile 4.4-4.6).

Suplimentar au fost realizate epruvete prismatice standardizate, cu dimensiunile 40x40x160 mm, pentru determinarea rezistenței la încovoiere și la compresiune în conformitate cu EN 1015-11 [77] și EN 196-1 [73].

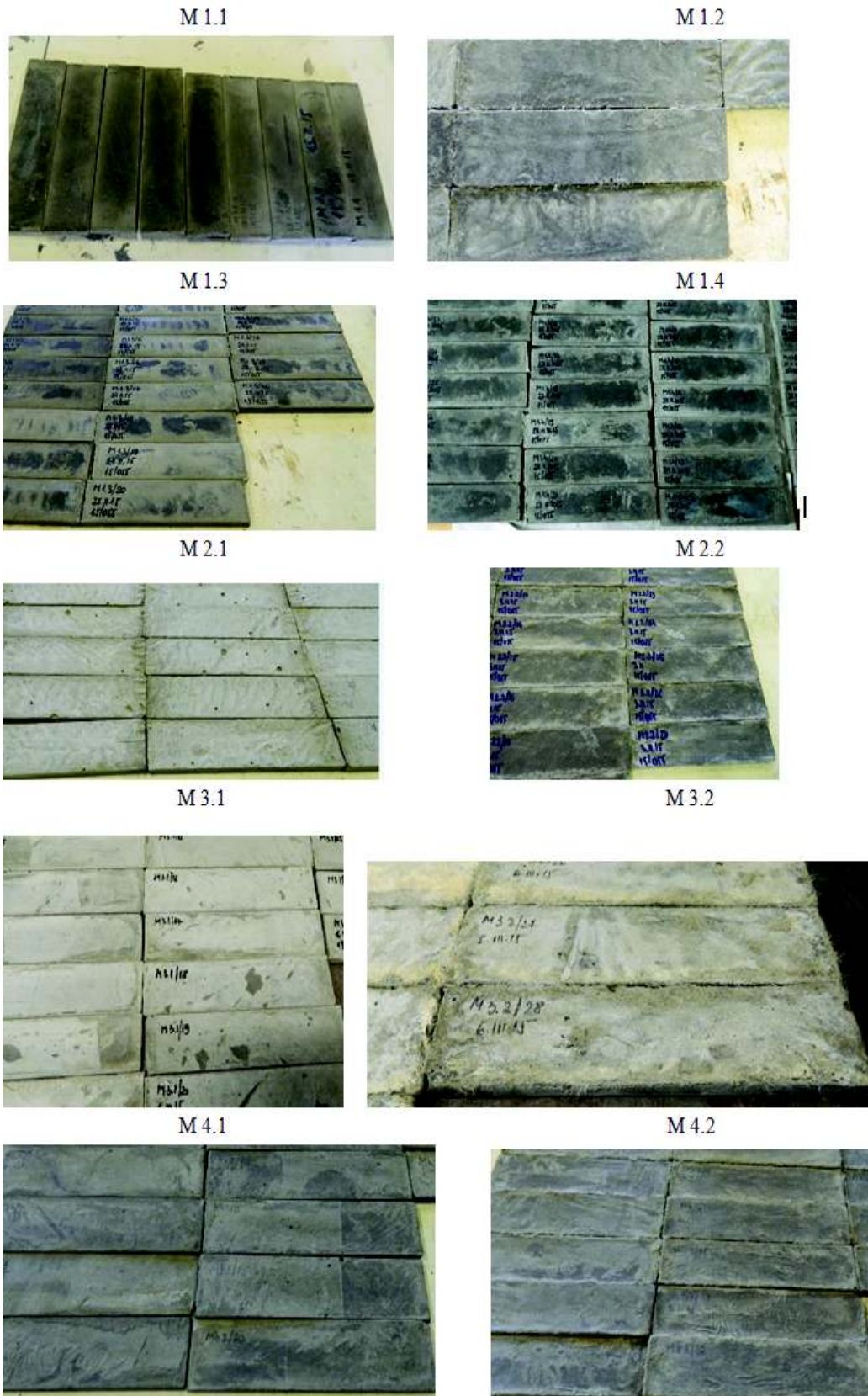


Fig. 4.3. Turnare ECC: epruvete 40x10x160 mm (4 PB)

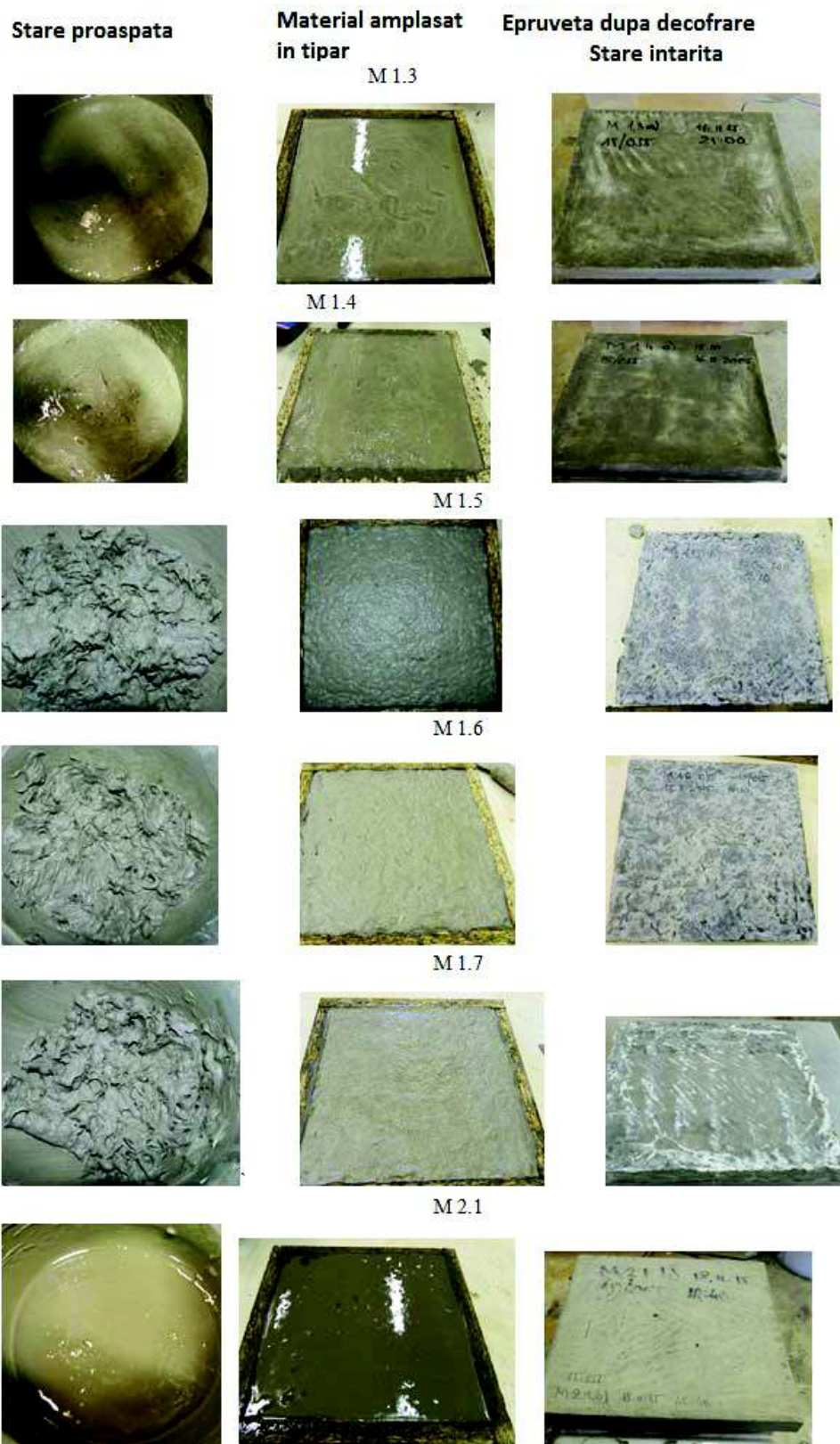


Fig. 4.4. Turnare experimentală ECC: plăci 200x200x15 mm (DWT -1)

Stare proaspata

Material amplasat
in tipar

Epruveta dupa decofrare
Stare intarita

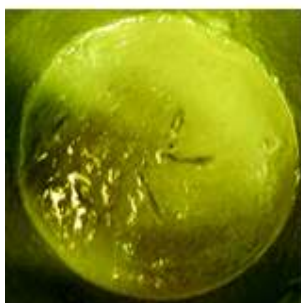
M 2.2



M 3.1



M 3.2



M 4.1



M 4.2



Fig. 4.5. Turnare experimentală ECC: plăci 200x200x15 mm (DWT -2)

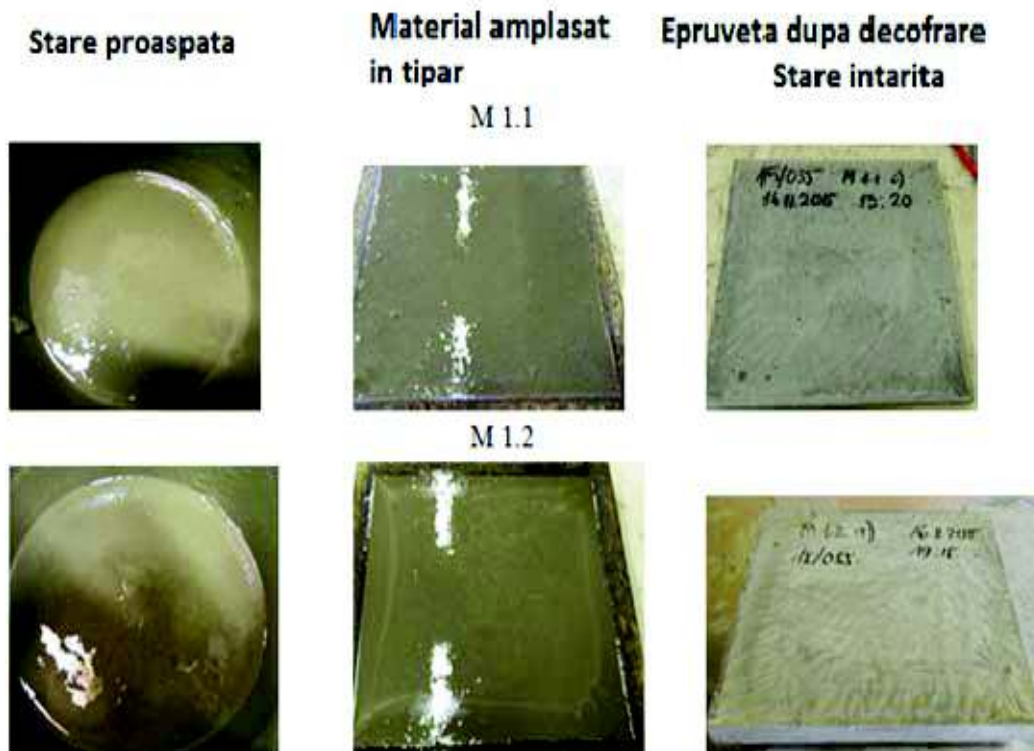


Fig. 4.6. Turnare experimentală ECC: plăci 200x200x15 mm (DWT -3)

Pentru a conserva dispersia cât mai omogenă a fibrelor în compozițiile ECC s-a evitat aplicarea unui număr ridicat de șocuri. Probele astfel realizate sunt învelite în folie de plastic pentru menținerea umidității și sunt condiționate până la decofrare în condiții de o temperatură de $T 21 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ și umiditate relativă $\text{RH } 95 \pm 5 \%$.

Decofrarea s-a realizat după 24 h pentru epruvetele tip cupon. Epruvetele tip placă și cu armătură dispersă au fost decofrate parțial după 24 h, prin îndepărtarea lateralelor tiparului și menținerea plăcii de bază (vezi Figura 4.7), considerându-se insuficient întărite pentru decofrare integrală.

Probele parțial decofrate au fost menținute în condiții similare încă 24 h până la decofrarea totală. Probele martor, fără conținut de fibre polimerice, au permis decofrarea totală la vârsta de 24 h. Păstrarea probelor până la vârstele de testare a fost realizată în aceleași condiții, respectiv temperatura $T 21 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ și umiditatea relativă $\text{RH } 95 \pm 5 \%$ (vezi Figura 4.8).



Fig. 4.7. Epruvetă ECC tip placă, decofrare parțială la 24 h



Fig. 4.8. Epruvetă ECC amplasate în incinta de condiționare cu RH 95±5 %

4.2.8 Caracteristici fizico-mecanice

4.2.8.1 Densitatea aparentă și masa volumică

Densitatea aparentă în stare uscată a fost determinată la vârsta de 28 zile în conformitate cu prevederile cu EN 1015-10 [76], respectiv determinarea volumului s-a realizat prin metoda volumului dislocuit (metoda cântării epruvetei în stare uscată – după uscare la temperatura de 105⁰C, în stare saturată – după imersare la presiune normală până la saturare completă și prin cântărirea hidrostatică a epruvetei saturate în prealabil).

A fost determinată masa volumică a mortarelor imediat după decofrare, utilizând masele plăcilor în urma cântării la decofrare. Determinarea volumului aparent s-a realizat pe baza dimensiunilor prestabilite a epruvetelor,

respectiv 200 x 200 x 15 mm și are un caracter orientativ, metoda fiind mai puțin precisă decât cea a volumului dislocuit.

A fost determinată masa volumică la vârsta de 60 zile, respectiv vârsta testării plăcilor cu dimensiunile 200 x 200 x 15 mm. Condiționarea epruvetelor până la vârsta specificată s-a realizat în condițiile de temperatură $T 21 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ și umiditate relativă $RH 95 \pm 5 \%$. Volumul aparent a fost determinat considerând dimensiunile epruvetelor.

Reprezentarea grafică a variației densității aparente în stare uscată a compozițiilor ECC este prezentată în Figura 4.9.

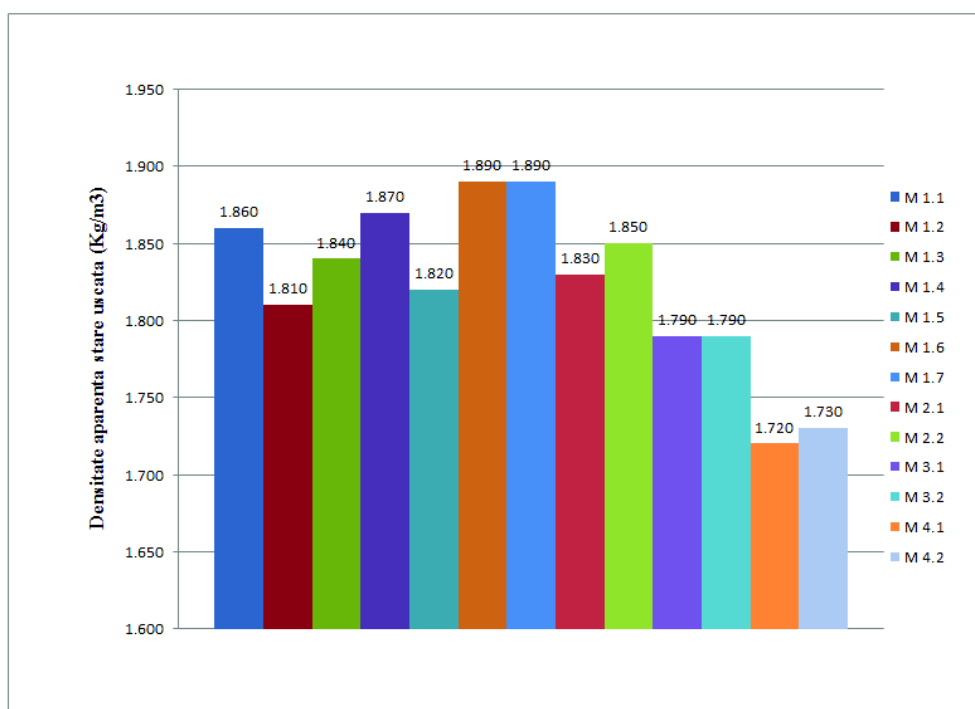


Fig. 4.9. Compoziții ECC: Densitate aparentă în stare uscată

A fost determinată masa volumică la vârsta de 270 zile, respectiv vârsta retestării plăcilor SH cu dimensiunile 200x200x15 mm. Condiționarea epruvetelor până la vârsta de 270 zile s-a realizat în etapele specificate mai jos:

- **etapa I:** (din momentul turnării, decofrare și până la vârsta de 60 zile, la testarea inițială): Expunere la temperatură $T 21 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ și umiditate relativă $RH 95 \pm 5 \%$;

- **etapa II:** (din momentul finalizării etapei I și până la finalizarea celor 28 de cicluri de vindecare SH): expunere la 28 cicluri de vindecare (expunere alternativă aer-apă pentru epruvetele SH, respectiv conservare în condiții de temperatură $T 21 \pm 2$ °C și umiditate relativă RH 60 ± 5 % pentru epruvetele martor);
- **etapa III:** (din momentul finalizării etapei II și până la reevaluarea probelor la vârsta de 270 zile): conservare în condițiile de temperatură $T 21 \pm 2$ °C și umiditate relativă RH 60 ± 5 % pentru toate epruvetele.

Rezultatele determinărilor sunt prezentate în Tabelul 4.4.

Tab. 4.4. Densitate aparentă și mase volumice ale compozițiilor ECC la vârste relevante și condiționări specifice

Determinare (Kg/m ³)	Masa volumică la decofrare	Densitate aparentă în stare uscată	Masa volumică la testare inițială	Masa volumică la reevaluare
Vârsta probei	48 ore	28 zile	60 zile	270 zile
Compoziție ECC				
M 1.1	2060	1860	-	-
M 1.2	2135	1810	-	1920
M 1.3	2140	1840	-	1970
M 1.4	2150	1870	2090	2070
M 1.5	2160	1820	2100	2080
M 1.6	2150	1810	-	1950
M 1.7	2100	1890	-	1990
M 2.1	2050	1830	-	-
M 2.2	2150	1850	2070	1980
M 3.1	2070	1790	-	-
M 3.2	2135	1790	1930	1880
M 4.1	2080	1720	-	-
M 4.2	2120	1730	1880	1830

4.2.8.2 Rezistența la întindere prin încovoiere și rezistența la compresiune

Rezistența la întindere prin încovoiere a fost determinată la vârsta de 28 zile, respectiv 60 zile pentru compozițiile principale, în conformitate cu prevederile cu EN 1015-11 [77] și EN 196-1 [73], utilizând testul de încovoiere în trei puncte (3PB), având rata de încărcare de 50 N/s (0.12 MPa/s).

Rezistența la compresiune a fost determinată la vârsta de 28 zile, respectiv 60 zile pentru compozițiile principale, în conformitate cu prevederile

EN 1015-11 [77] și EN 196-1 [73], având rata de încărcare de 2400 N/s (1.5 MPa/s).

Determinările au fost realizate utilizând epruvete prismatice cu dimensiunile 40x40x160 mm (Figura 4.10).



Fig. 4.10. Compoziții ECC: Epruvete 40 x 40 x 160 mm

Comportarea epruvetelor sub sarcină, atât în cazul determinării rezistenței la întindere prin încovoiere (3PB) cât și în cazul determinării rezistenței la compresiune, confirmă cedarea de tip casant, specifică materialelor cementoase, pentru compozițiile martor (M 1.1, M 2.1, M 3.1 și M 4.1), fără adaos de fibre polimerice în compoziție (vezi Figurile 4.11 și 4.12).

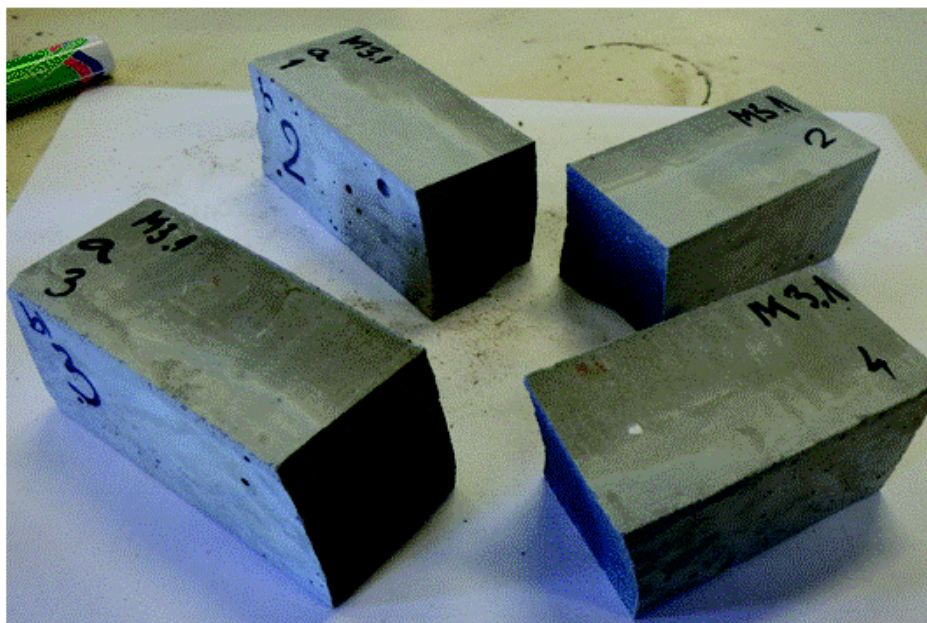


Fig. 4.11. Compoziții martor (fără fibre): Epruvete supuse la 3PB: cedare casantă sub sarcină

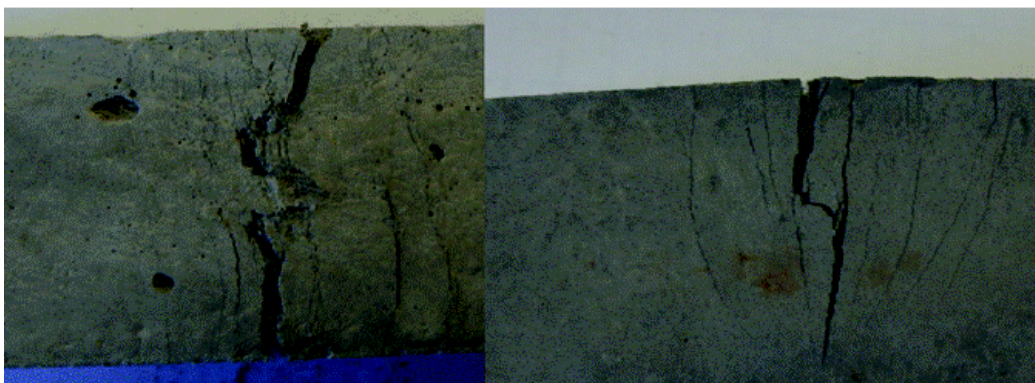


Fig. 4.12. Compoziții ECC: epruvete supuse la 3PB: evidențierea efectului de microfisurare sub sarcină

Adaosul de fibre polimerice în dozajul optim, respectiv 2 % din volum, induce cedarea progresivă prin dezvoltarea microfisurilor pe măsură ce încărcarea crește, fără însă ca și colapsul să implice fragmentarea sau dezintegrarea materialului (vezi Figurile 4.13 și 4.14). Un procent diminuat de fibre, respectiv 0.5 % și 1.0 % induce o contracarare benefică a cedării casante însă nu conferă compozițiilor intervalul de microfisurare multiplă: cedarea se produce prin dezvoltarea unei fisuri de-a lungul secțiunii vulnerabile și lărgirea acesteia odată cu creșterea eforturilor.



Fig. 4.13. Compoziții martor (fără fibre): epruvete supuse la compresiune: cedare casantă sub sarcină

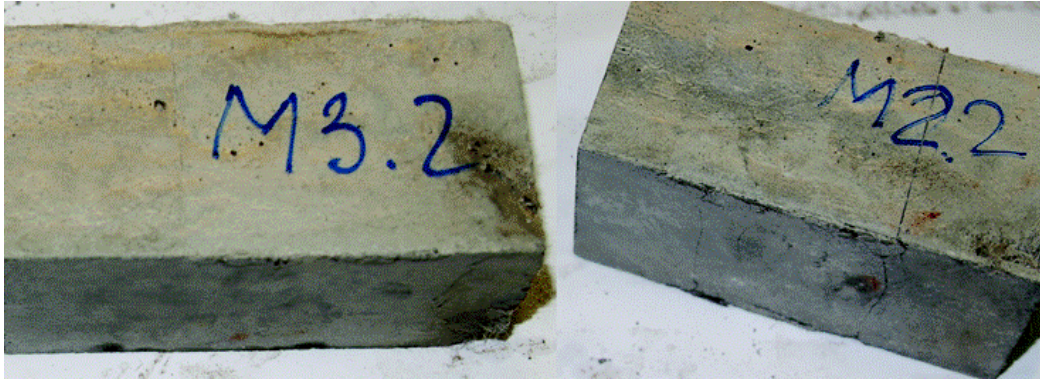


Fig. 4.14. Compoziții ECC: epruvete supuse la 3PB: evidențierea stării de microfisurare sub sarcină

Tab. 4.5. Proprietăți fizico-mecanice ale compozițiilor ECC, la vârsta de 28 zile și respectiv 60 zile; creșteri procentuale de rezistență

Compoziție ECC	Rezistența la compresiune $R_{c,med}$ (N/mm ²)			Rezistența la încovoiere $R_{fi,med}$ (N/mm ²)		
	28 zile	60 zile	Creștere (%)	28 zile	60 zile	Creștere (%)
M 1.1	63.7	72.9	14.5	3.4	3.9	15.2
M 1.2*	64.3	72.8	13.2	5.8	-	-
M 1.3*	61.5	70.7	15.0	7.2	-	-
M 1.4	61.2	70.6	15.3	9.1	10.5	15.7
M 1.5	56.8	66.4	16.9	9.7	10.9	12.2
M 1.6	46.6	55.5	19.2	8.2	11.2	36.7
M 1.7	67.2	81.3	21.0	6.6	7.5	14.2
M 2.1	61.1	78.4	28.2	3.6	4.4	22.9
M 2.2	55.1	70.2	27.4	11.2	13.3	18.1
M 3.1	52.3	64.3	23.0	6.6	7.1	7.2
M 3.2	49.0	61.8	26.2	15.9	17.5	10.0
M 4.1	44.5	49.9	12.0	5.2	6.2	20.3
M 4.2	40.2	44.3	10.4	10.4	11.3	8.9

Notă: Compozițiile secundare M 1.2 și M 1.3 nu au fost testate 3PB la vârsta de 60 zile.

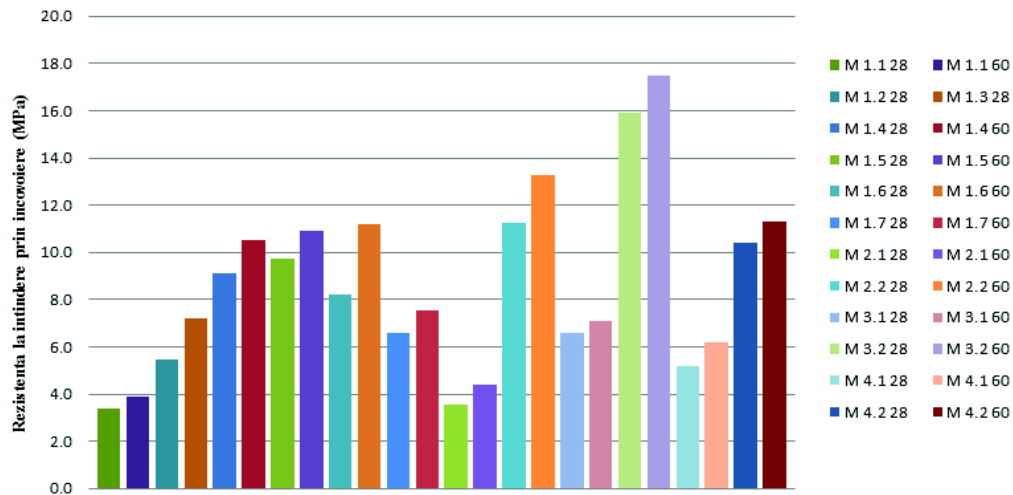


Fig. 4.15. Rezistența la întindere prin încovoiere 3PB, la vârsta de 28 și 60 zile

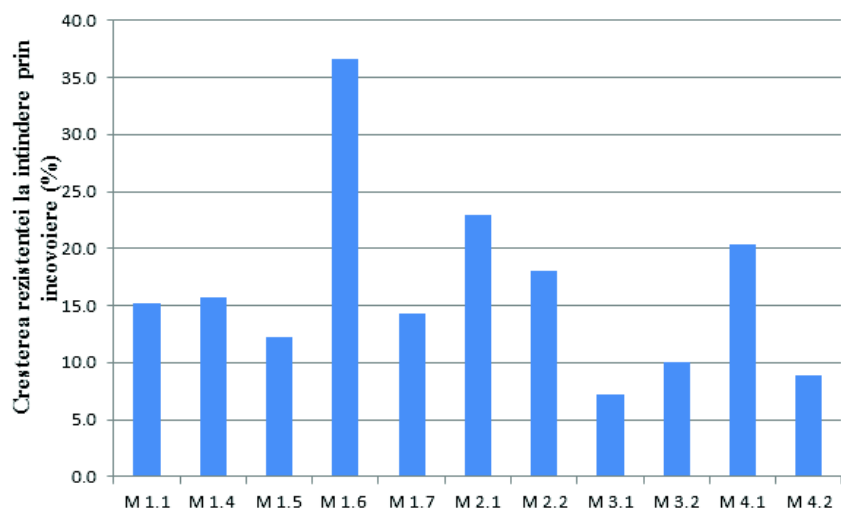


Fig. 4.16. Compoziții ECC: evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere 3PB de la 28 zile la 60 zile

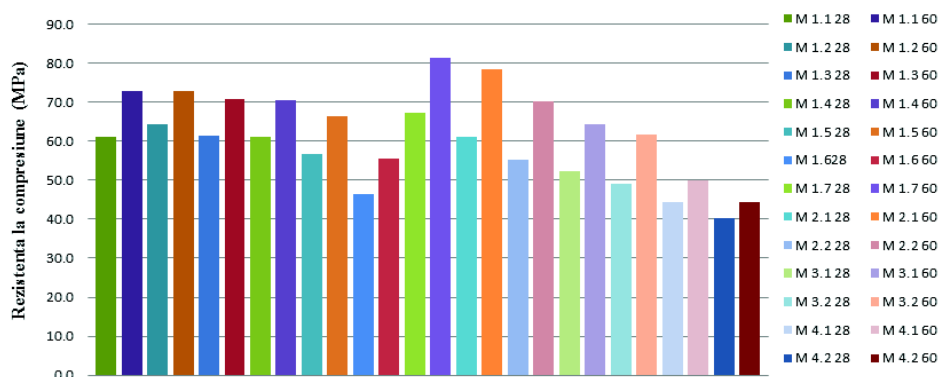


Fig. 4.17. Compoziții ECC: rezistența la compresiune la 28 și 60 zile

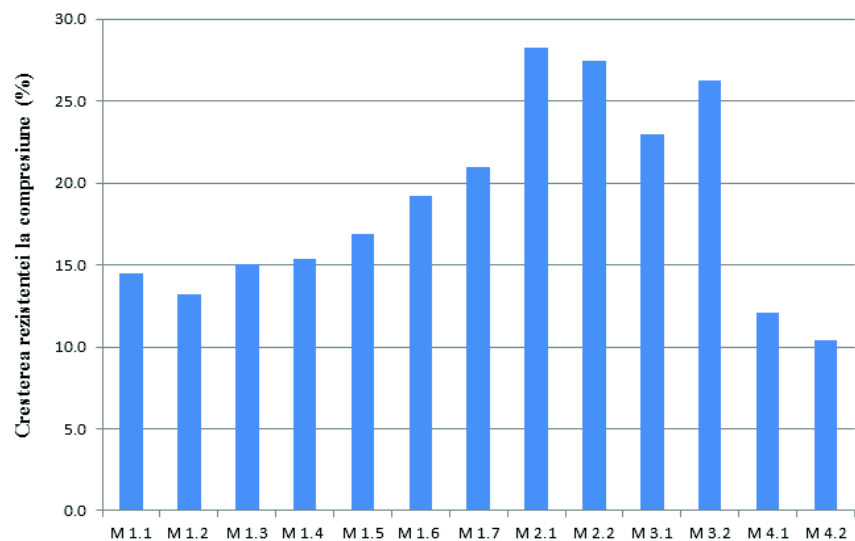


Fig. 4.18. Compoziții ECC: evoluția rezistenței la compresiune de la 28 zile la 60 zile

Rezultatele determinărilor sunt prezentate în Tabelul 4.5, iar performanțele comparative ale compozițiilor dezvoltate cât și evoluția rezistențelor de la vârsta de 28 zile la vârsta de 60 zile sunt prezentate grafic în Figurile 4.15-4.18.

4.2.6.3. Evaluarea inițială a caracteristici fizico-mecanice

Evaluarea inițială a compozițiilor ECC, efectuată în baza caracteristicilor de bază (densități, rezistențe la compresiune, rezistențe la întindere din încovoiere), specifice compozitelor cementoase, confirmă preponderent comportamentul scontat:

- **densitatea aparentă în stare uscată** se situează pe un trend descendent odată cu creșterea procentului de cenușă de termocentrală (FA) în compoziție, de la 1860 kg/m^3 pentru compoziția martor M 1.1 aferentă mortarelor cu raport $FA/C = 1$, la 1830 kg/m^3 pentru compoziția martor M 2.1, la 1790 kg/m^3 pentru compoziția martor M 3.1 și 1730 kg/m^3 pentru compoziția martor M 4.1 (Figura 4.19);

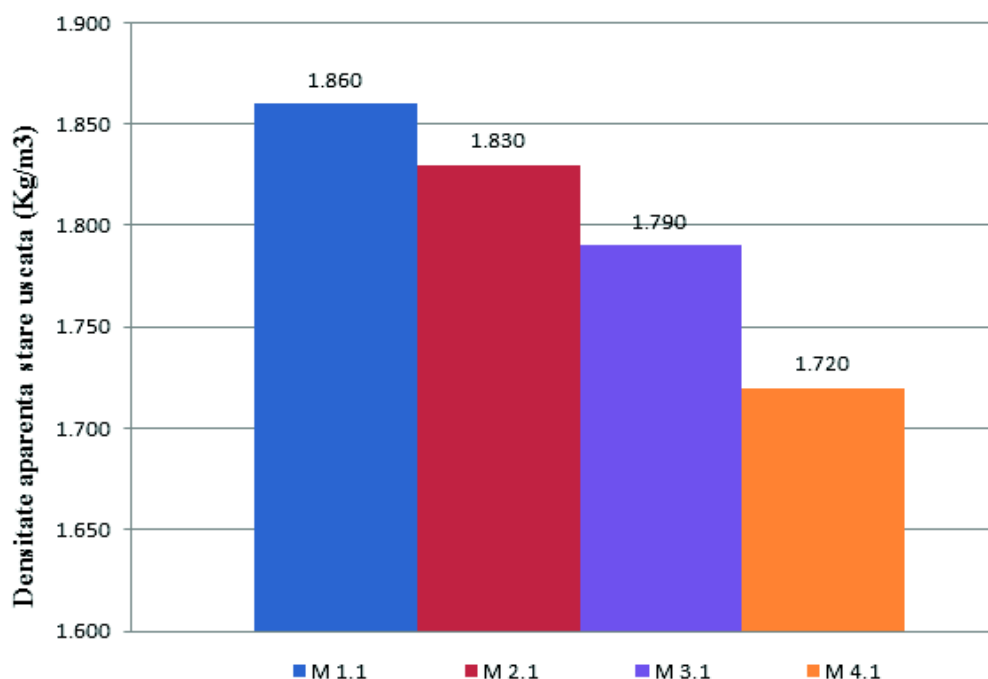


Fig. 4.19. Compoziții martor: evoluția densității aparente în stare uscată funcție de creșterea cantității de FA în compoziții

- densitatea aparentă în stare uscată înregistrează o creștere sensibilă prin adăugarea fibrelor polimerice în procent de 2 % compoziție; un adaos de 0.5 % respectiv 1.0 % din volum fibre PVA I induce o scădere a densității în raport cu compoziția martor; fenomenul poate fi explicat la nivel microstructural, prin analiza evoluției rețelei de pori și a fenomenelor de transport (absorbție capilară, difuziune, etc.) din cadrul matricei cementoase, generalmente guvernate de interacțiunea intimă fibră – matrice cementoasă și implicit de cantitatea de aditiv superplastifiant utilizat pentru reglarea lucrabilității compoziției;
- **rezistența la compresiune** înregistrează *sensibile scăderi la compozițiile cu adaos (2% din volum) de fibre polimerice*, în comparație cu compozițiile martor, fără armătură dispersă; rezultatele confirmă concluziile unor cercetări similare în acest sens [43], iar fenomenul își găsește explicația în faptul că adaosul de fibre alterează sensibil gradul de împachetare al matricei și implicit omogenitatea compoziției, generând volum de goluri și porozitate sporite, cu efect de slăbire a matricei sub sarcina de compresiune; cedarea sub încărcare se face însă progresiv, prin microfisurare, fără dezintegrare bruscă (vezi Figura 4.12), în mod distinct de cedarea casantă specifică mortarelor martor (vezi Figura 4.13);

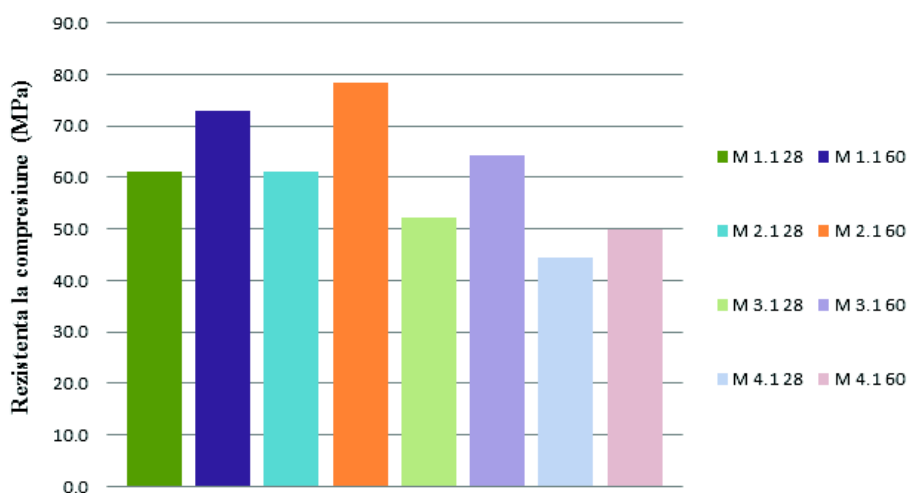


Fig. 4.20. Compoziții martor: evoluția rezistenței la compresiune, la vârsta de 28 zile și 60 zile, funcție de creșterea cantității de FA în compoziții

- rezistența la compresiune înregistrează *scăderi previzibile odată cu reducerea cantității de ciment (C) și creșterea procentului de cenușă de termocentrală (FA) în compoziții* (vezi Figura 4.20);
- în același timp sunt înregistrate *creșteri semnificative de rezistență în intervalul 28-60 zile*; pentru compoziția M 1, caracterizată de raportul FA/C =1.0, atât pentru martor cât și pentru compozițiile cu fibre, creșterea variază între 13 % și 21 %, fiind de aproximativ 15 % pentru compoziția martor și compozițiile cu fibre PVA I (vezi Tabelul 4.5); Compozițiile M 2 și M 3, caracterizate de un conținut majorat de FA, prezintă creșteri mai ridicate de rezistență, în intervalul 23-30%, consecință directă a reacțiile întârziate de hidratare specifice compozițiilor cu cenușă de termocentrală (FA); compoziția M 4 (FA/C=2.4) surprinde însă printr-o creștere moderată de rezistență, respectiv de 12 % pentru martorul M 4.2 și 10 % pentru mortarul ECC;
- compozițiile M 1.6 (fibră PP II) și M 1.7 (fibră PVA II) prezintă creșterile cele mai consistente de performanță la compresiune din categoria M 1;
- **rezistența la întindere prin încovoiere 3PB** înregistrează *creșteri considerabile și previzibile ale mortarelor ECC față de compozițiile martor* (vezi Figura 4.15); în același timp modalitatea de cedare este complet distinctă - casantă la martori (vezi Figura 4.13) și cu dezvoltarea palierului de autoconsolidare sub sarcină prin apariția microfisurilor cu deschidere redusă, controlată, contracarând dezintegrarea și fragmentarea materialului (vezi Figura 4.12);
- totodată sunt înregistrate *creșteri ale R_{ii} odată cu creșterea raportului FA/C în compoziții* (vezi Fig. 4.21): **performanțe spectaculoase sunt atinse de compoziția M3**, atât martor cât și mortar ECC, dovedind un echilibru compozițional, atât în raportul compușilor lianți cât și al tipului (PVA I) și procentului (2 % din volum) de fibre polimerice utilizat;

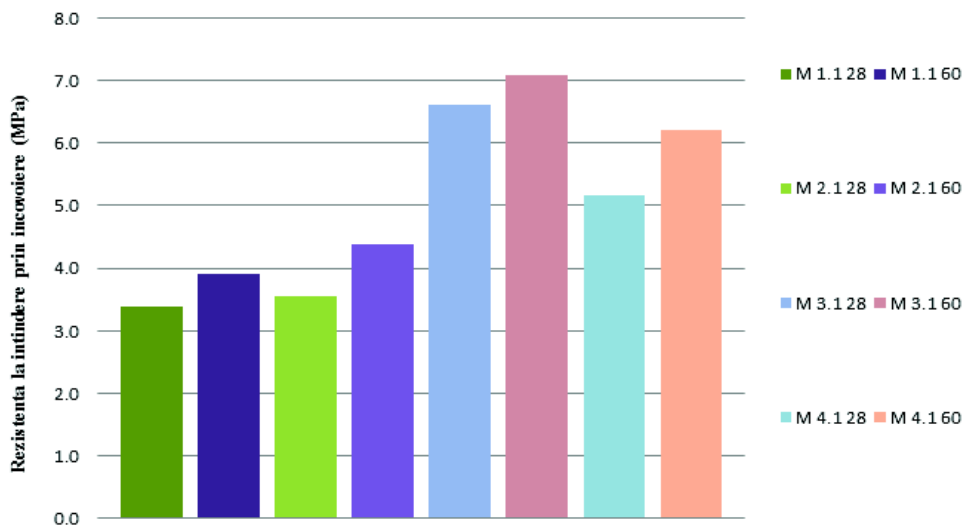


Fig. 4.21. Compoziții mator: evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere 3PB, la vârsta de 28 zile și 60 zile, în funcție de creșterea cantității de FA în compoziții

- rezistența la întindere prin încovoiere 3PB înregistrează creșteri similare celor legate de rezistența la compresiune, de la vârsta de 28 zile la 60 zile: un procent generic de 15 % pentru compozițiile M1, o creștere spectaculoasă pentru M2 (aproximativ 20 %) și o creștere de aproximativ 10 % pentru M 3; compoziția M 4 prezintă o creștere semnificativă pentru matorul M 4.1, respectiv 20% și doar 10 % pentru compoziția ECC M 4.2;
- compoziția M 1.6 (fibră PP II) prezintă o creștere spectaculoasă a rezistenței la întindere prin încovoiere, de aproape 40 %.

5. EVALUAREA COMPOZIȚIILOR ECC PRIN TESTE DE ÎNTINDEREA PRIN ÎNCOVOIERE 4PB

5.1 Metoda de încercare

Evaluarea comportamentului compozitelor ECC la solicitare din impact a fost realizată prin testarea comparativă, **la întindere prin încovoierea în patru puncte (4PB)**, utilizând 4 rate diferite de încărcare.

Testul 4PB este generalmente considerat ca fiind relevant pentru evaluarea compozitelor cementoase de tip ECC [14], [28], punând în evidență capacitatea de dezvoltare sub sarcină a microfisurilor cu deschidere controlată și implicit palierul de autoconsolidare „strain-hardening”, identificat pe curba caracteristică σ - ϵ , ca măsură a ductilității compozitelor.

Epruvete prismatice cu dimensiunile 40x10x160 mm realizate din compozițiile dezvoltate au fost supuse întinderii prin încovoiere 4PB. Încărcarea s-a efectuat utilizând un sistem hidraulic Walter+Bai DB 250/152, cu două forțe care se aplică la treimea deschiderii, rezultând pe treimea mijlocie o stare de solicitare la încovoiere pură (vezi Figura 5.1). Solicitarea epruvetelor a fost realizată sub formă de deplasare verticală

controlată și înregistrarea forței aferente. *Digramele forță-deplasare* ($F-v(t)$), obținute prin intermediul programului software de captare date Proteus[®] 10.1, au fost convertite în *diagrame efort - deformație specifică* $\sigma-\varepsilon$, prin transformarea deplasării verticale în alungirea (deformația specifică) aferentă fibrei inferioare a epruvetelor prismatice încovoiate 4PB. Conversia se realizează considerând geometria epruvetei, schema statică de solicitare și prin utilizarea metodelor trigonometrice specifice.

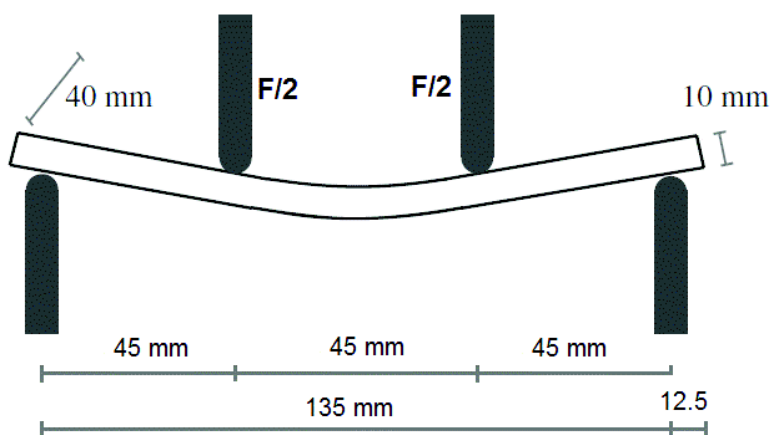


Fig. 5.1. Schema de încărcare la întindere prin încovoiere 4PB a epruvetelor ECC

Ruperea (cedarea), când are loc oprirea încărcării și proba se relaxează (eliberează), este considerată atinsă în momentul în care proba intră pe curba descendentă, aferentă fenomenului de înmuiere („tension softening”), de epuizare a ductilității (prin pierderea capacității de formare a microfisurilor multiple pe măsură ce încărcarea crește). Momentul este caracterizat de identificarea unei *fisuri de rupere*, preponderent singulară (vezi Figura 5.2), care se lărgeste mult peste dimensiunea de deschidere a celorlalte fisuri, semnalând epuizarea intervalului de autoconsolidare, „strain hardening”. Momentul cedării este asociat punctului ($\sigma_u; \varepsilon_{max}$) – efort ultim/deformație maximă sub încărcare, pe curba caracteristică efort - deformație specifică $\sigma-\varepsilon$.

Explicația fenomenului de dezvoltare a rețelei de microfisuri, complementar cu efectul de limitarea deschiderii fisurii (max. $60\mu m$), ca și mecanism de ductilitate în compozit este sintetizată de Snoeck [30]: în condițiile utilizării unui procent (optim) de 2

% fibre polimerice în compoziția cementoasă, apariția unei microfisuri este însoțită de intervenția fibrelor cu așa numitul „*efect de punte*”, prin care efortul de fisurare este preluat de acestea iar deschiderea fisurii este limitată. Starea de eforturi își continuă tendința crescătoare sub sarcină și o nouă microfisură este indusă pe principii identice; procesul continuă până la momentul în care este pierdută capacitatea de legătură a fibrelor, respectiv „*efectul de punte*”, rezistența acestora scăzând sub capacitatea portantă a matricei cementoase. Este momentul în care este atinsă limita de ductilitate prin identificarea *fisurii de rupere* (din rețeaua dezvoltată în material), care își lărgeste consistent deschiderea, marcând cedarea.

Aspecte caracteristice încercării la întindere prin încovoiere 4PB sunt prezentate în Figura 5.2: amplasarea epruvetei în mașina de încercare și deformația sa sub sarcină, dezvoltarea microfisurilor sub încărcare, epruvetă dusă la rupere și evidențierea rețelei de microfisuri.

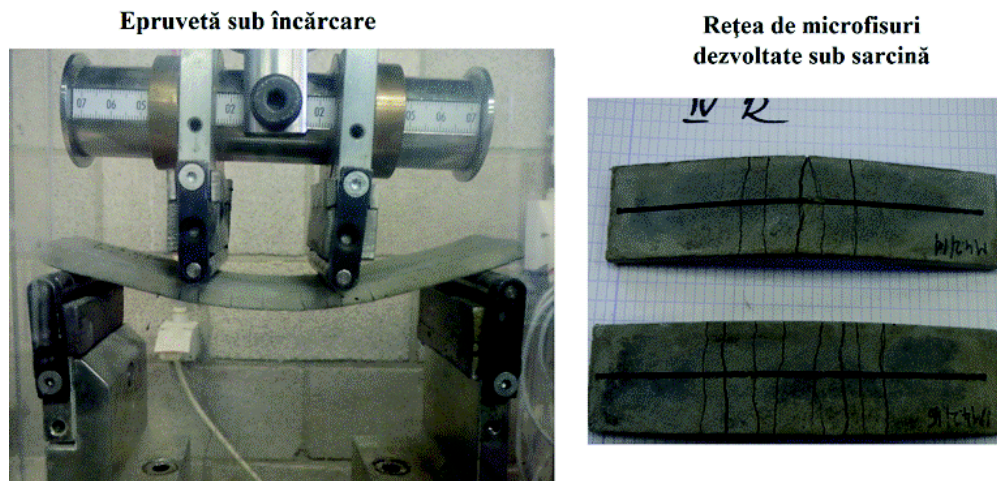


Fig. 5.2. Test 4PB a epruvetelor ECC sub încărcare: evidențierea deformației verticale și formarea rețelei de microfisuri

Ratele de încărcare utilizate sunt exprimate atât în termeni de deplasare verticală cât și prin conversie, în rate de deformație specifică (unități de deformație specifică ϵ pe unitatea de timp). Pentru relevanța studiului au fost alese patru rate de încărcare, caracteristice atât spectrului cvasi-static de încărcare cât și domeniului solicitărilor dinamice (vezi Tabel 5.1).

Tab. 5.1. Rate de încărcare utilizate în cadrul încercării 4PB

Cod rata încărcare	Rata de încărcare (deplasare verticală) (mm/s)	Rata de încărcare (deformație specifică) (unități ϵ/s)	Domeniul de încărcare corespunzător ratei de încărcare [44, 45]
I	0.0011	5.00×10^{-4}	Încărcări în domeniul cvasi-static
II	0.0055	2.50×10^{-3}	
III	0.0276	1.25×10^{-2}	Încărcări dinamice multiciclice (ex. încărcarea din seism)
IV	0.1200	0.55×10^{-1}	Impact (Șoc)

5.2 Parametrii de investigare

Performanța compozitelor ECC supuse la întindere din încovoiere 4PB se realizează prin evaluarea comparativă a următorilor parametrii (vezi Figura 5.3):

- *rezistența la întindere prin încovoiere 4PB*, respectiv efortul maxim atins sub sarcină (*peak strength*), σ_{cu} (corespunzătoare forței maxime indusă în epruvetă F_{cu});
- *rezistența la fisurare*, respectiv efortul aferent producerii primei fisuri în epruvetă, corespunzând primei căderi de forță (first-cracking-strength), σ_{fc} (corespunzător forței F_{fc});
- *modulul de elasticitate* E_t , caracteristic pentru solicitarea 4PB. E_t este evaluat atât ca și *modul tangent*, respectiv panta la curba efort - deformație specifică σ - ϵ , în stadiul inițial al încărcării ($E_{t,loading}$), cât și ca parametru caracteristic relaxării probei după îndepărtarea încărcării ($E_{t,release}$), respectiv panta definită de punctul (σ_u ; ϵ_{max}) – efort ultim/deformație specifică maximă sub încărcare și punctul (0; ϵ_r), (efort nul după descărcare și deformația specifică remanentă);
- *ductilitatea materialului*, evaluată ca și *intervale caracteristice de deformație specifică (strain)* la partea inferioară, întinsă a epruvetelor prismatice 4PB:
 - *deformația specifică maximă* (maximum strain), înregistrată de la începutul încărcării și până în momentul descărcării probei, ϵ_{max} ;
 - *intervalul de autoconsolidare „strain hardening”*, pe parcursul căruia are loc dezvoltarea microfisurării multiple sub sarcină, definit ca și diferența dintre deformația specifică maximă (ϵ_{max}) și deformația aferentă efortului de fisurare

$\sigma_{fc} (\varepsilon_{fc})$, MC;

- intervalul de autoconsolidare „strain hardening” cu creștere de rezistență, pe parcursul căruia are loc microfisurarea multiplă simultan cu creșterea eforturilor σ și este definit ca diferența dintre deformația specifică aferentă efortului maxim atins σ_{cu} , (ε_{cu}) și deformația aferentă efortului de fisurare σ_{fc} (ε_{fc}), MC*.

Suplimentar, evaluarea evoluției materialului sub sarcină, respectiv dezvoltarea rețelei de microfisurare și apoi, cedarea, s-au realizat prin analiză vizuală și microscopică. Au fost înregistrate: numărul de microfisuri dezvoltate, deschiderea medie și maximă de fisurare. Pentru analiza microscopică a fost utilizat un microscop optic Leica S8 APO, dotat cu o cameră de tip DFC 295. Softul de analiză a fisurilor care a fost utilizat este Image J.

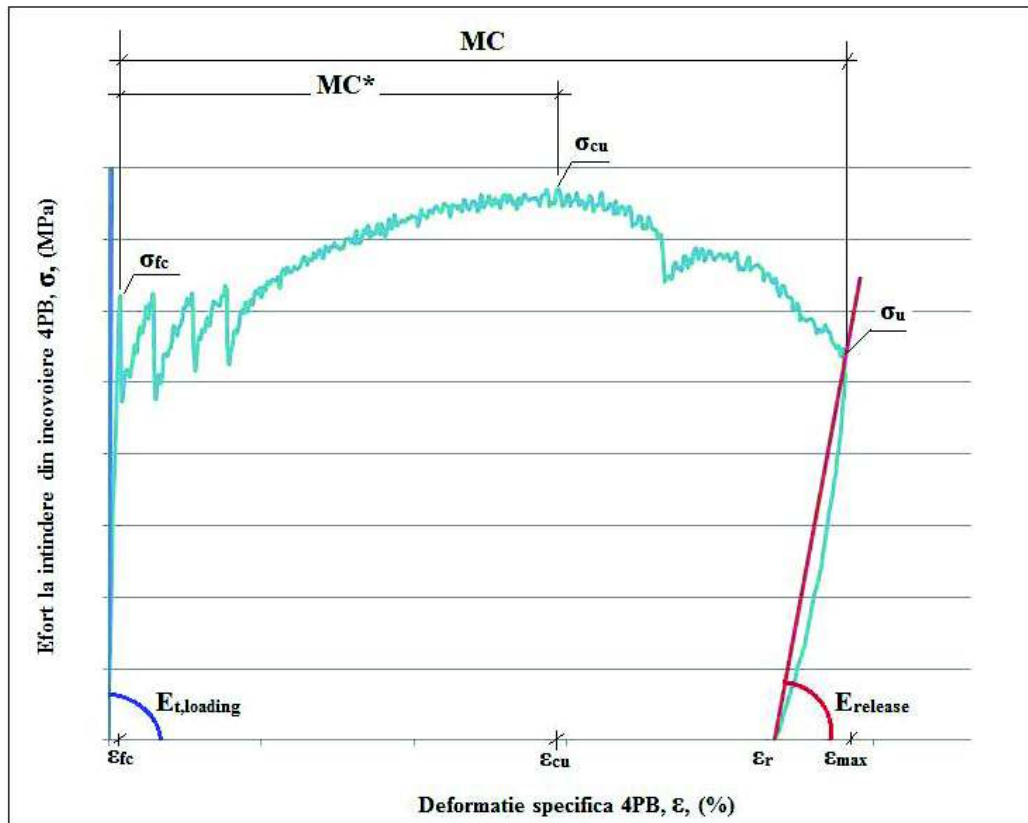


Fig. 5.3. Curba caracteristică σ - ε a epruvetelor ECC supuse la întindere prin încovoiere 4PB; evidențierea parametrilor caracteristici, relevanți

5.3 Evaluarea capacității de autovindecare (SH)

Capacitatea de autovindecare (SH) a compozitelor ECC supuse la întindere din încovoiere 4PB se va evalua din următoarele perspective:

- evoluției deschiderii fisurilor, autosigilării (Self-Sealing) – SS;
- recuperării caracteristicilor fizico-mecanice în raport cu performanțele compozitelor în stare virgină, respectiv autoeepărării (Self-Repairing) – SR.

În acest sens epruvetele cupon cu dimensiunile 40x10x160 mm s-au repartizat în două categorii distincte:

- **epruvete rupte (R):** epruvete încărcate sub sarcină până la epuizarea palierului de autoconsolidare „strain hardening” și intrarea pe curba descendentă aferentă „tension softening”, când este înregistrată ruperea;
- **epruvete de autovindecare (SH):** epruvete încărcate sub sarcină până la atingerea unei deplasări verticale corespunzătoare unei deformații specifice de aproximativ 1 % la partea inferioară a epruvetei; descărcarea se face cu o viteză de 5 N/s.

După analiza vizuală și microscopică aferentă, epruvetele SH au fost supuse unui număr de 28 cicluri de condiționare (alternanță aer – apă) pentru inducerea mecanismelor specifice de autovindecare (SH), urmând ca ulterior să fie retestate până la rupere.

5.3.1 Condiționarea cu efect de autovindecare (SH)

Studii experimentale referitoare la inducere efectului de vindecare autogenă în materialele cementoase indică diferite condiționări posibile în acest sens [28]:

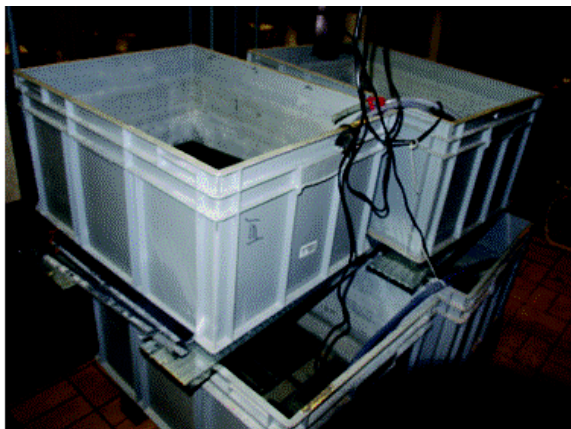
- expunere continuă, pentru perioade prestabilite (7, 28, 56, 90, etc. zile) în mediu cu temperatura variind în jurul valorii de 21 °C și umiditate relativă RH = 60% sau RH > 90%;
- cicluri alternative apă - aer, pentru perioade prestabilite (7, 28, 56, 90, etc. zile) în mediu cu temperatura variind în jurul valorii de 21 °C; expunerile la mediul umed / uscat pot varia: 23/1 h, 16/8 h, 12/12 h etc.

Rezultatele obținute de studiile întreprinse de-a lungul timpului confirmă necesitatea apei în stare lichidă ca și garant al inducerii proceselor fizico-chimice de vindecare autogenă [53]. Pentru prezentul studiu a fost aleasă alternanța apă / aer în raport 1/1, simulând alternanța ploaie/ uscare specifică climatului temperat, respectiv:

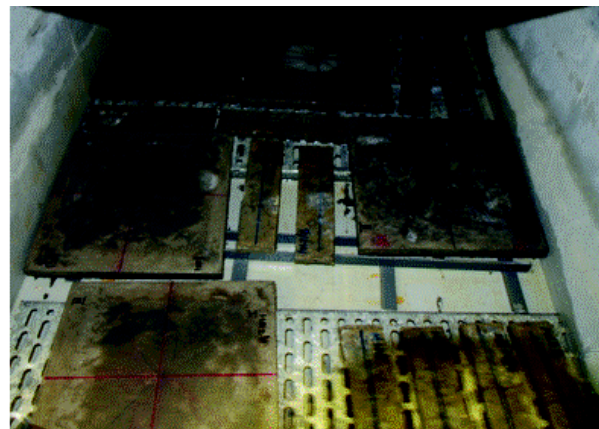
- *epruvetele sunt menținute în apă potabilă, la temperatura de 20 ± 2 °C, timp de 12 h;*
- *epruvetele sunt menținute în aer, în condițiile: $T 20 \pm 2$ °C; $RH 60 \pm 5$ % timp de 12 h.*

Expunerea probelor la ciclurile de condiționare se realizează în incintă cu condiții controlate: Temperatura $T 20 \pm 2$ °C; Umiditatea relativă $RH 60 \pm 5$ %.

După inducerea stării de fisurare, respectiv rupere, epruvetele SH și respectiv R sunt amplasate pe grătare, în perechi de bazine de plastic: primul conține un strat de apă de min 20 cm, pentru asigurarea imersării complete a epruvetelor din interiorul său, cel de-al doilea fiind fără conținut de apă. Printru-un sistem automat de pompare, la intervale de 12 ore, apa potabilă migrează dinspre bazinul umed spre cel uscat, în acest fel fiind realizată alternanța apă/aer. Epruvetele sunt amplasate pe grătare cu fața fisurată în sus, pentru a facilita expunerea secțiunilor degradate condiționării necesare, pentru a asigura drenarea completă a apei din fisuri pe parcursul expunerii la aer și pentru a realiza o expunere cât mai uniformă condiționării prescrise (Figura 5.4).



Dispozitiv automat pentru efectuarea ciclurilor de AutoVindecare (SH)



Epruvete expuse ciclurilor de AutoVindecare (SH)

Fig. 5.4. Efectuarea ciclurilor de autovindecare (SH)

5.3.2 Capacitatea de autovindecare (SH) – parametrii investigați

5.3.2.1 Capacitatea de autosigilare (Self-Sealing) SS

După expunerea la cele 28 de cicluri de condiționare, atât epruvetele SH cât și cele R au fost analizate vizual și microscopic pentru stabilirea gradului de eficiență privind închiderea autogenă a microfisurilor (closing efficiency), prin raportarea deschiderii fisurilor analizate, după condiționarea SH, la deschiderea lor inițială a fisurii, măsurată imediat după încercare. Se menționează că evaluarea imagistică a fisurilor este realizată la suprafața acestora.

În vederea evaluării deschiderii fisurilor, respectiv a evoluției lor și implicit a gradului de închidere, a fost utilizat microscopul optic Leica S8 APO, dotat cu o cameră de tip DFC 295, iar softul de analiză a dimensiunilor de fisură, utilizat în procesarea imaginilor captate la microscop este Image J.

5.3.2.2 Capacitatea de autoreparare (Self-Repairing) SR

După expunerea la cele 28 de cicluri de condiționare epruvetele SH au fost retestate în condiții identice testului inițial, utilizând ratele de încărcare prestabilite. Testarea în această etapă a presupus ducerea epruvetelor la rupere.

Au fost efectuate două tipuri de comparații:

- în cadrul epruvetelor SH, între performanțele obținute în ciclul de preîncărcare (I, $v=1.5\text{mm}$) și ciclul secundar, de rupere (II, SH);
- între epruvetele R, testate la rupere la vârsta de 28 zile și epruvetele SH, considerând suprapunerea celor două cicluri, de preîncărcare (I) și încărcare secundară (II).

Parametrii investigați în această etapă sunt similari celor menționați la 5.2, cu observația că aceștia sunt evidențiați pentru atât pentru ciclul de preîncărcare (I, $v=1.5\text{mm}$) cât și pentru ciclul secundar, de preîncărcare până la rupere (II, SH) (vezi Figura 5.5).

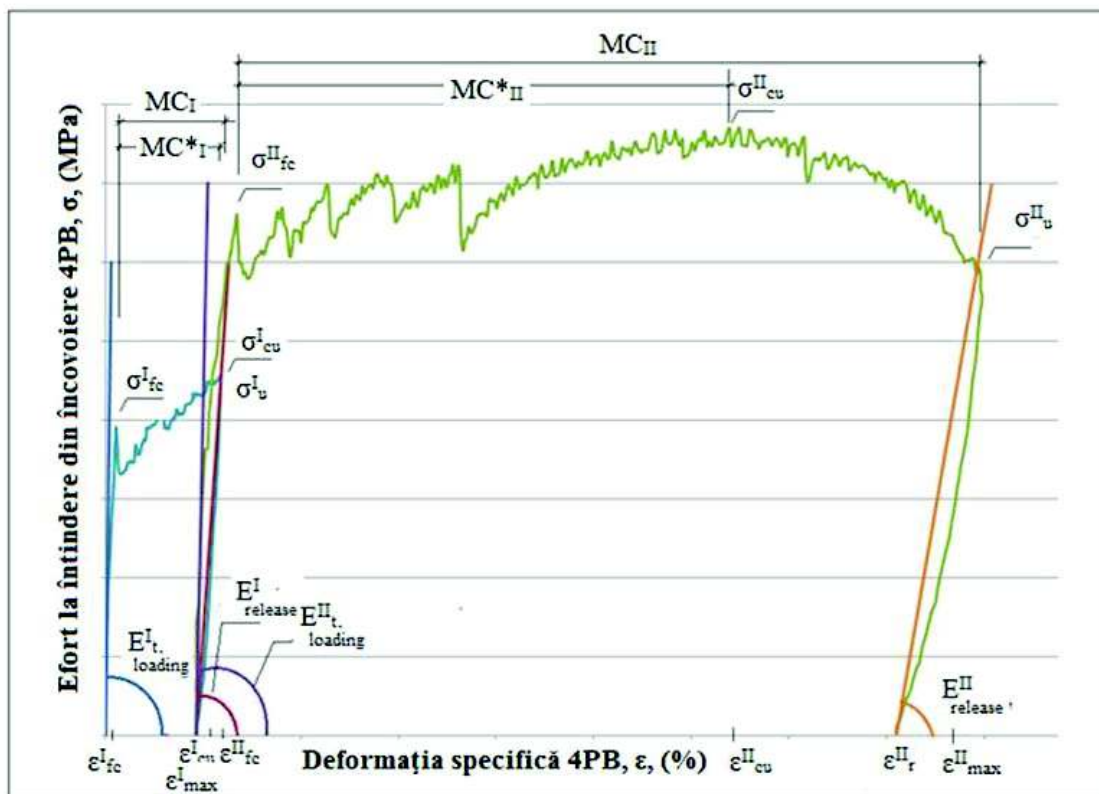


Fig. 5.5. Curba specifică efort - deformație σ - ϵ a epruvetelor ECC SH supuse la întindere prin încovoiere 4PB, ciclu preîncărcare (I) și expunere la 28 cicluri de autovindecare și reîncărcare (II) până la cedare; parametrii caracteristici

Evaluarea capacității de autoreparare (SR) este evaluată prin raportarea parametrilor E , σ_{fc} , σ_{cu} , MC și MC^* , rezultați în ciclul de reîncărcare (II, SH) la cei obținuți în ciclul inițial, de preîncărcare. Este efectuată o comparație a caracteristicilor E , σ_{fc} , σ_{cu} , MC și MC^* aferente epruvetelor SH în evoluția lor în ciclul de reîncărcare (II, SH) cu caracteristicile epruvetelor R, solicitate într-un ciclu singular până la rupere. Această comparație, secundară, a epruvetelor SH și R are un caracter relativ distinct din perspectiva evaluării pure a capacității SH a materialului, datorat diferenței între vârstele de testare: 28 zile pentru epruvetele R și 60 zile pentru epruvetele SH. Rezistența la întindere prin încovoiere 3PB și rezistența la compresiune, determinate la aceste vârste (vezi capitolul 4) semnalează o evoluție crescătoare, de la 28 la 60 zile fapt ce indică influența vârstei de testare. Comparația este însă relevantă pentru evaluarea comportamentului generic al compozitului ECC prefisurat, vindecat în mod autogen și

retestat, în raport cu comportamentul de referință al compozitelor cementoase, considerat la 28 zile. Teste viitoare efectuate pe materialul virgin la vârsta de 60 și alte vârste relevante vor întregi evaluarea comportării celor mai performante compoziții ECC dezvoltate în prezentul studiu.

Relațiile de calcul pentru evaluarea capacității autoreparare (SR) sunt dezvoltate:

- prin raportarea parametrilor obținuți după efectuarea ciclului de reîncărcare (II, SH) la parametrii de preîncărcare (I, $v=1.5\text{mm}$) pentru comparații în cadrul probelor SH;
- prin raportarea parametrilor obținuți după efectuarea ciclului de reîncărcare (II, SH) la parametrii dezvoltați în ciclul de încărcare completă (R), pentru comparații între epruvetele R – SH.

Relațiile de calcul sunt prezentate în continuare:

- **recuperarea elasticității (SR - E)**

- *proba SH:*

$$SR - E^{SH} = 100 \times \frac{E_{t,loading}^{II}}{E_{t,loading}^I} (\%) \quad (5.1)$$

- *proba SH vs R:*

$$SR - E^{SH-R} = 100 \times \frac{E_{t,loading}^{II}}{E_{t,loading}} (\%) \quad (5.2)$$

- **recuperarea rezistenței la fisurare (SR - σ_{fc})**

- *proba SH:*

$$SR - \sigma_{fc}^{SH} = 100 \times \frac{\sigma_{fc}^{II}}{\sigma_{fc}^I} (\%) \quad (5.3)$$

- *proba SH vs R:*

$$SR - \sigma_{fc}^{SH-R} = 100 \times \frac{\sigma_{fc}^{II}}{\sigma_{fc}} (\%) \quad (5.4)$$

▪ recuperarea rezistenței la întindere prin încovoiere 4PB ($SR - \sigma_{cu}$)

- *proba SH:*

$$SR - \sigma_{cu}^{SH} = 100 \times \frac{\sigma_{cu}^{II}}{\sigma_{cu}^I} (\%) \quad (5.5)$$

- *proba SH vs R:*

$$SR - \sigma_{cu}^{SH-R} = 100 \times \frac{\sigma_{cu}^{II}}{\sigma_{cu}} (\%) \quad (5.6)$$

▪ Recuperarea capacității de microfisurare ($SR - MC$; $SR-MC^*$)

- *proba SH:*

$$SR - MC^{SH} = 100 \times \frac{MC_{II}}{MC_I} (\%) \quad (5.7)$$

- *proba SH vs R:*

$$SR - MC^{SH-R} = 100 \times \frac{MC_{II}}{MC} (\%) \quad (5.8)$$

- *proba SH:*

$$SR - MC^{*SH} = 100 \times \frac{MC_{II}}{MC_I} (\%) \quad (5.9)$$

- *proba SH vs R:*

$$SR - MC^{*SH-R} = 100 \times \frac{MC_{II}}{MC} (\%) \quad (5.10)$$

5.4 Comportarea la diferite rate de încărcare

5.4.1 Compoziția mator M 1.1

Amestecul M 1.1 (vezi capitolul 4, Tabelul 4.2) reprezintă matorul grupului de mortare M 1, caracterizate de raport egal între cantitatea de Ciment (C) și Cenușă (FA)

din compoziție.



Fig. 5.6. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție martor M 1.1, înainte și după încercare

Epruvetele realizate din această compoziție (Figura 5.6) au fost supuse încercării la întindere prin încovoiere 4PB la vârsta de 28 zile, utilizând ratele de încărcare I, II și III. Cedarea s-a produs brusc și casant, instantaneu cu inițierea și propagarea fisurii de rupere.

Evoluția mortarelor martor M 1.1 sub sarcină sunt prezentate mai jos, atât prin intermediul curbelor specifice efort - deformație σ - ϵ (vezi Figura 5.7) cât și prin valorile rezultate, respectiv efort maxim și deformație specifică corespunzătoare. Sinteza rezultatelor este prezentată în Tabelul 5.2.

Tab. 5.2. Compoziția martor M 1.1: rezistența la întindere prin încovoiere 4PB și deformații specifice aferente

Rata de încărcare	Forța de rupere P (kN)	Rezistența la întindere prin încovoiere σ_{fc} (MPa)	Deplasarea verticală v (mm)	Deformația specifică ϵ_{max} (%)
I	0.19	6.4	0.14	0.06
II	0.22	7.5	0.13	0.06
III	0.23	8.7	0.17	0.07
IV	-	-	-	-

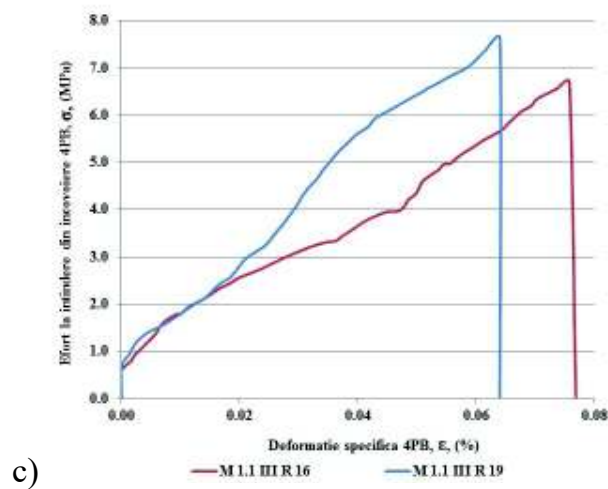
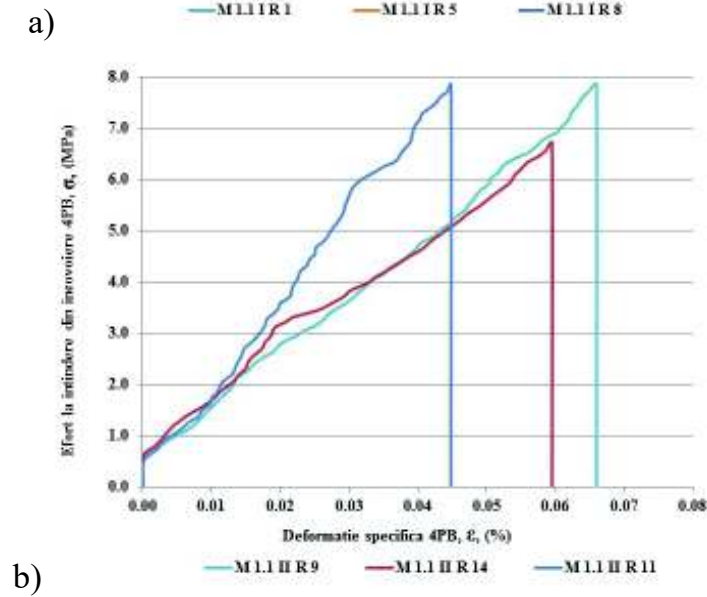
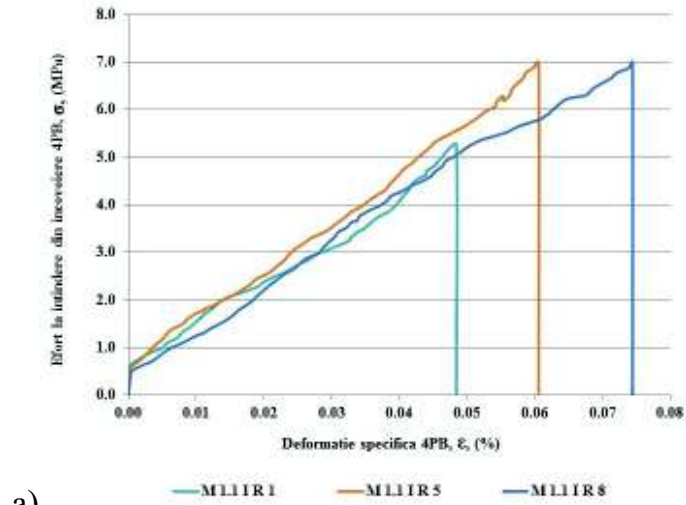


Fig. 5.7. Epruvete martor M 1.1: diagramele σ - ε la 4PB utilizând ratele de încărcare: a) I; b) II și c) III.

5.4.2 Compoziția ECC M 1.4

M 1.4 (vezi capitolul 4, Tabel 4.2) reprezintă compoziția realizată cu 2% (din volum) fibre PVA, lubrefiate cu ulei mineral și caracterizate prin raport egal între cantitatea de Ciment (C) și Cenușă (FA).

Epruvetele realizate din această compoziție (Figura 5.8) au fost supuse încercării la întindere prin încovoiere 4PB la vârsta de 28 zile, utilizând ratele de încărcare I, II, III și IV. Aplicarea încărcării se face până în momentul cedării, consemnat la epuizarea palierului de autoconsolidare MC, interval caracterizat de apariția și formarea microfisurilor (Figura 5.9). Parametrii relevanți testului la întindere prin încovoiere 4PB și deformațiile specifice aferente sunt prezentate mai jos, prin intermediul diagramelor caracteristice σ - ε (vezi Figurile 5.10 și 5.11) cât și prin valorile rezultate, caracteristici mecanice (Tabelul 5.3), caracteristici de elasticitate și ductilitate (Tabelul 5.4), respectiv fisuri (Tabelul 5.5).



Fig. 5.8. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.4



Fig. 5.9. Epruvetă prismatică 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.4, după cedare

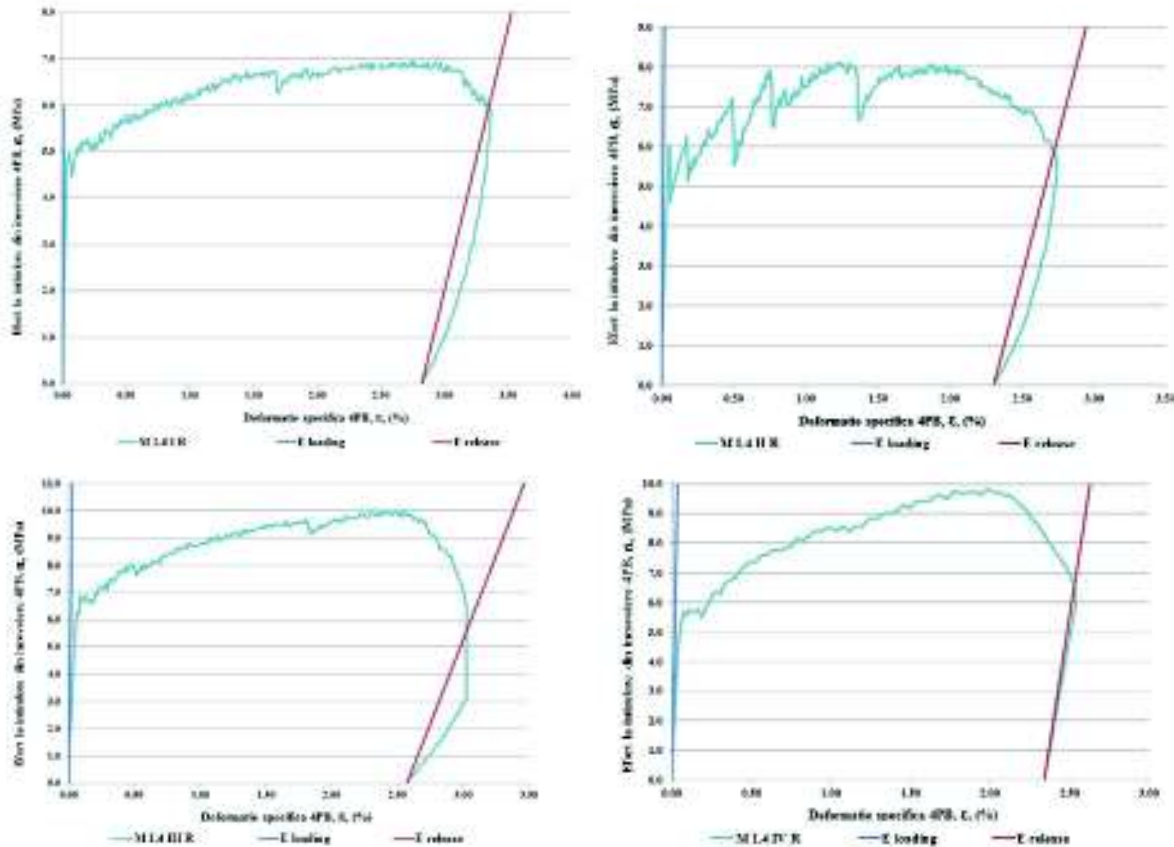


Fig. 5.10. ECC M 1.4: diagrame σ - ε la 4PB sub diferite rate de încărcare

Tab. 5.3. Compoziția consacrată ECC M 1.4: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Inițierea microfisurării				Încărcare maxima			
	F_{fc} (kN)	σ_{fc} (MPa)	v_{fc} (mm)	ε_{fc} (%)	F_{cu} (kN)	σ_{cu} (MPa)	v_{cu} (mm)	ε_{cu} (%)
I	0.156	4.98	0.101	0.050	0.219	6.96	5.50	2.75
II	0.182	6.03	0.112	0.051	0.245	8.10	2.66	1.25
III	0.130	6.86	0.265	0.095	0.190	10.00	6.18	2.50
IV	0.166	5.69	0.170	0.075	0.286	9.80	4.18	1.98

Tab. 5.4. Compoziția consacrată ECC M 1.4: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Ductilitate (deformații specifice maxime și reziduale; eforturi aferente; interval MC)						Elasticitate Modul de elasticitate	
	v_{max} (mm)	ε_{max} (%)	σ_u (mm)	ε_r (%)	MC (%)	MC* (%)	$E_{t,loading}$ (GPa)	$E_{t,release}$ (GPa)
I	6.62	3.37	5.91	2.83	3.32	2.70	47.9	1.1
II	5.58	2.75	5.84	2.31	2.70	1.20	48.5	1.4
III	7.50	3.10	5.55	2.58	3.00	2.40	35.4	1.2
IV	5.27	2.54	6.58	2.34	2.46	1.91	28.5	3.5

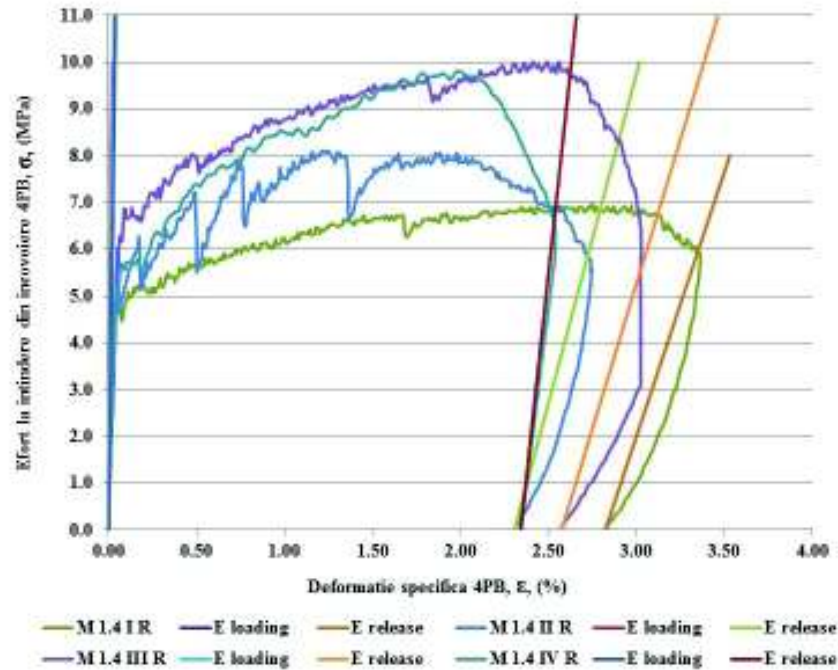


Fig. 5.11. ECC M 1.4: diagrame σ - ε suprapuse la 4PB sub diferite rate de încărcare

Tab. 5.5. Compoziția consacrată ECC M 1.4: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB la cedare (rupere)

Rata de încărcare	Interval MC						Autosigilare SS	
	Nr. fisuri	w_{max} (μm)	w_{med} (μm)	w_{min} (μm)	Microfisuri (<60 - 80 μm) w_{med} (μm)	Microfisuri (>60 μm) w_{med} (μm)	Fisuri închise parțial	Fisuri închise total
I	10	666.1	112.8	22.4	39.8	302.5	2	8
II	6	578.9	180.4	73.4	79	281.8	2	4
III	15	450.4	65	8.0	34.2	74.2	5	10
IV	8	1298.7	206.5	9.6	25.6	83.6	2	6

Analiza stării de fisurare sub încărcarea până la cedare și ulterior eficiența procesului de Autosigilare (SS) este efectuată pentru compoziția consacrată M 1.4 pentru toate cele patru de rate de încărcare considerate (vezi Figura 5.12). Numărul de microfisuri dezvoltate pe parcursul ciclului de încărcare variază în intervalul 6-15, iar eficiența procesului de autovindecare din punct de vedere al închiderii acestora (SS) este considerabilă, după cum se poate observa prin analiza microscopică: microfisurile cu deschiderea $w < 80 \mu\text{m}$ prezintă autosigilare completă, iar cele ce depășesc deschiderea de $100 \mu\text{m}$ prezintă produși de precipitare consistenți care diminuează deschiderea inițială.

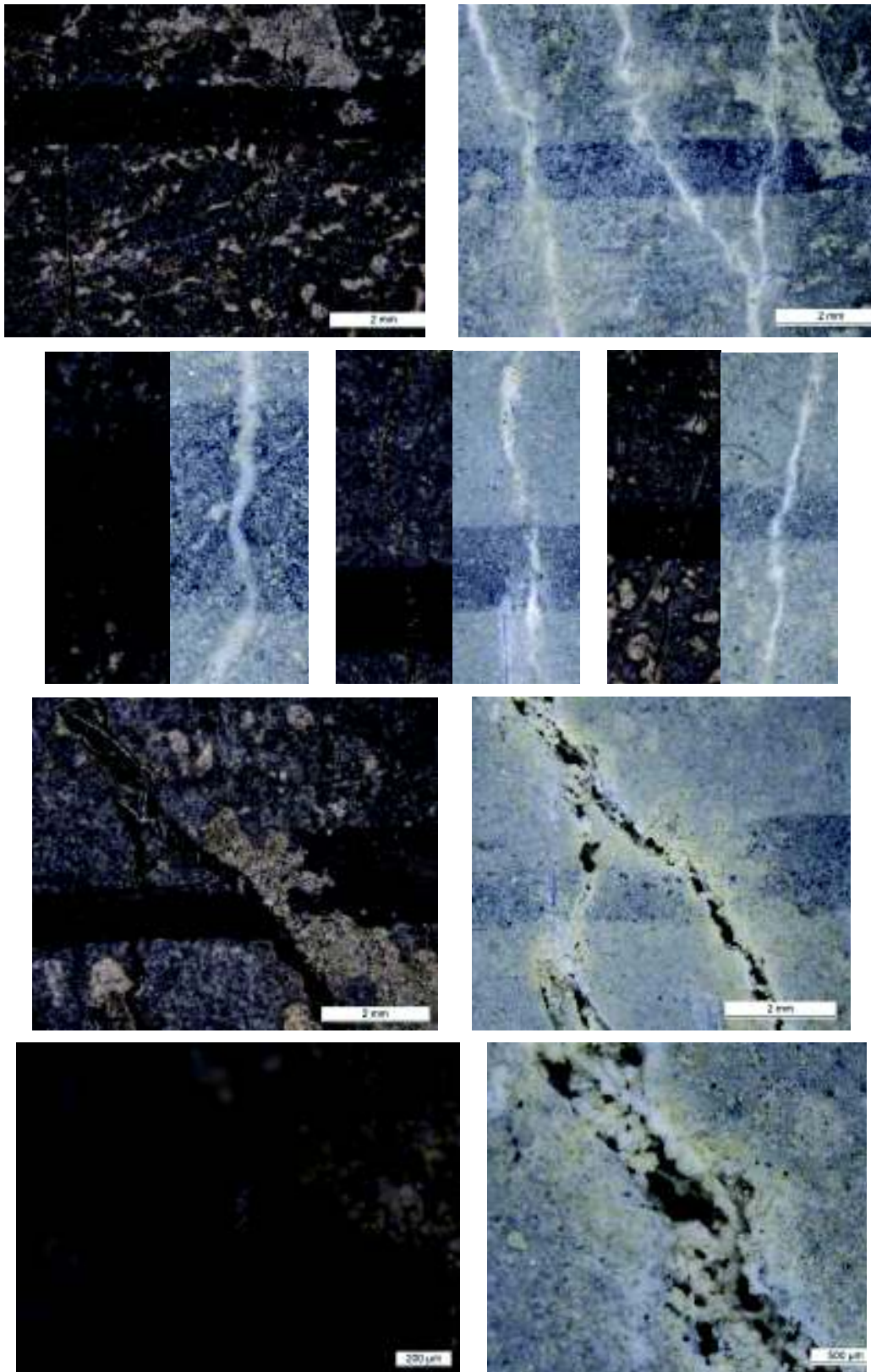


Fig. 5.12. ECC M 1.4: evoluția fisurilor după expunere la ciclurile de autovindecare: fisuri sigilate integral și fisuri sigilate parțial

Compoziția M 1.4 dovedește performanțe dinamice considerabile sub aspectul menținerii capacității de dezvoltare a microfisurilor multiple sub sarcină, caracteristică cu sensibilitate moderată în raport cu de rata de încărcare utilizată. Deschiderea fisurii aferentă cedării se dovedește consistent mai ridicată în cazul aplicării rapide a sarcinii (Rata IV), însă microfisurile adiacente se mențin în intervale dimensionale optime, care favorizează închiderea lor. Rata I și rata II pot fi caracterizate prin apariția, pe lângă fisura de rupere, a minim 1-2 fisuri sau ramificații mari, cu dimensiunea de peste 300 μm , fapt cu influență directă asupra deschiderii medii de fisurare. Ratele rapide de încărcare (III și IV) induc o singură macrofisură de cedare și dimensiuni semnificativ reduse ale microfisurilor adiacente. Acestea pot fi privite ca și indicii privind capacitatea materialului de a performa optim sub sarcini dinamice.

5.4.3 Compoziția ECC M 1.5

M 1.5 (vezi capitolul 4, Tabel 4.2) este o compoziție complementară realizată cu 2% (din volum) fibre PP I, caracterizată prin raport egal între cantitatea de Ciment (C) și Cenușă (FA).

Epruvetele cu această compoziție (vezi Figura 5.13) au fost supuse încercării la întindere prin încovoiere 4PB la vârsta de 28 zile, utilizând ratele de încărcare I, II III și IV. Încărcarea s-a aplicat până la cedare, consemnată la epuizarea palierului de autoconsolidare MC, caracterizat de apariția și formarea microfisurilor (Figura 5.14).



Fig. 5.13. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.5

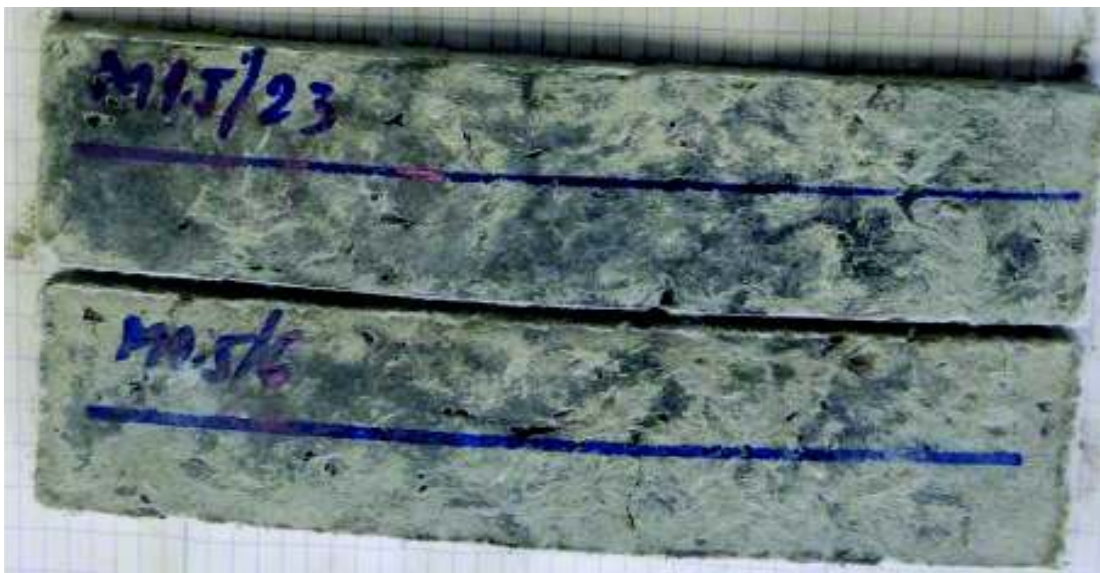


Fig. 5.14. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 1.5, după cedare

Parametrii relevanți testului la întindere prin încovoiere 4PB și deformațiile specifice aferente sunt prezentate mai jos, prin intermediul diagramelor caracteristice σ - ϵ (vezi Figurile 5.15 și 5.16) cât și prin valorile rezultate, caracteristici mecanice (Tabelul 5.6), caracteristici de elasticitate și ductilitate (Tabelul 5.7), respectiv fisuri (Tabelul 5.8).

Tab. 5.6. Compoziția complementară ECC M 1.5: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Inițierea microfisurării				Încărcare maxima			
	F_{fc} (kN)	σ_{fc} (MPa)	v_{fc} (mm)	ϵ_{fc} (%)	F_{cu} (kN)	σ_{cu} (MPa)	v_{cu} (mm)	ϵ_{cu} (%)
I	0.108	5.35	0.127	0.05	0.128	6.37	2.86	1.12
II	0.114	5.68	0.108	0.04	0.154	7.68	3.06	1.20
III	0.139	5.43	0.134	0.06	0.171	6.70	1.86	0.79
IV	0.132	6.15	0.280	0.11	0.181	8.44	2.05	0.81

Tab. 5.7. Compoziția consacrată ECC M 1.5: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Ductilitate (deformații specifice maxime și reziduale; eforturi aferente; interval MC)						Elasticitate Modul de elasticitate	
	v_{max} (mm)	ϵ_{max} (%)	σ_u (mm)	ϵ_r (%)	MC (%)	MC* (%)	$E_{t,loading}$ (GPa)	$E_{t,release}$ (GPa)
I	4.70	1.90	4.74	1.55	1.85	1.08	37.7	1.4
II	6.87	2.88	5.53	2.26	2.84	1.16	30.8	0.9
III	3.93	1.74	4.82	1.34	1.69	0.74	29.3	1.2
IV	4.93	2.05	5.56	1.54	1.95	0.70	31.3	1.1

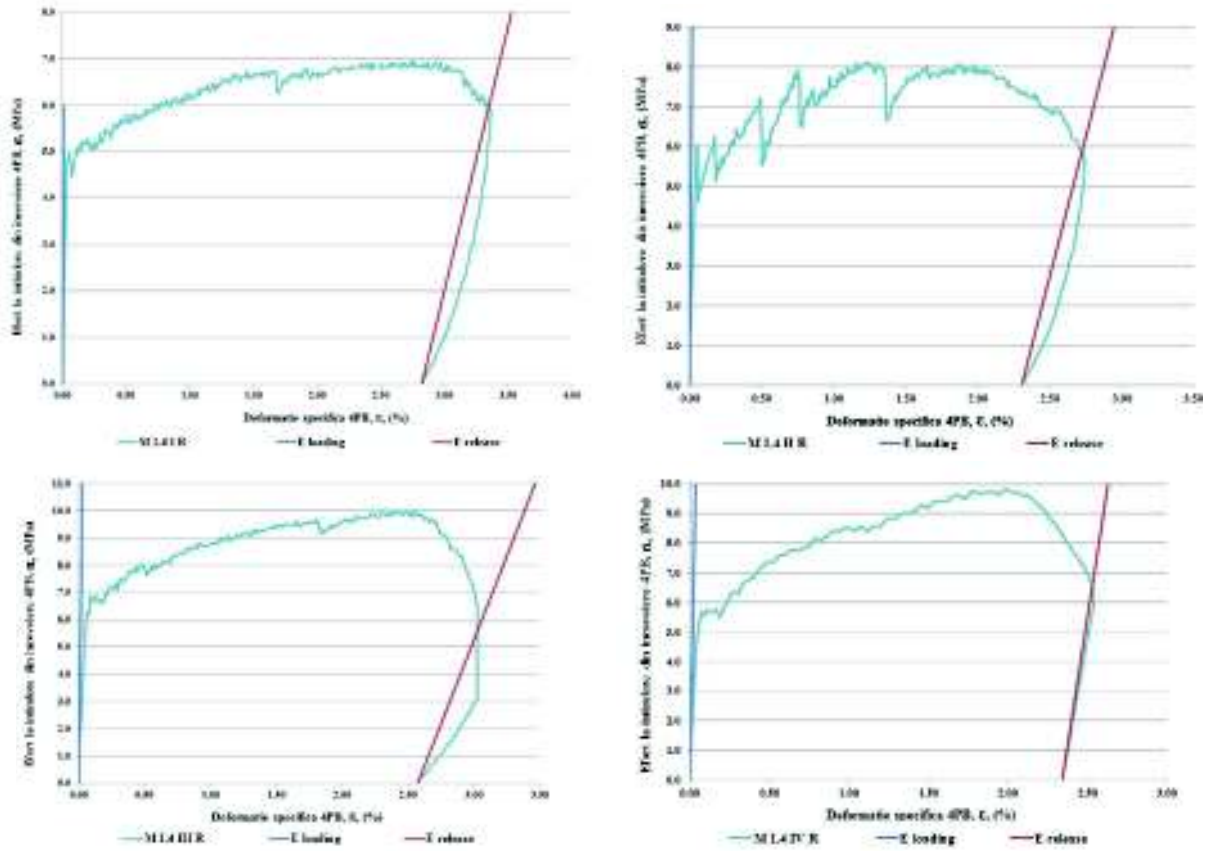


Fig. 5.15. ECC M 1.5: diagrame σ - ϵ la 4PB sub diferite rate de încărcare

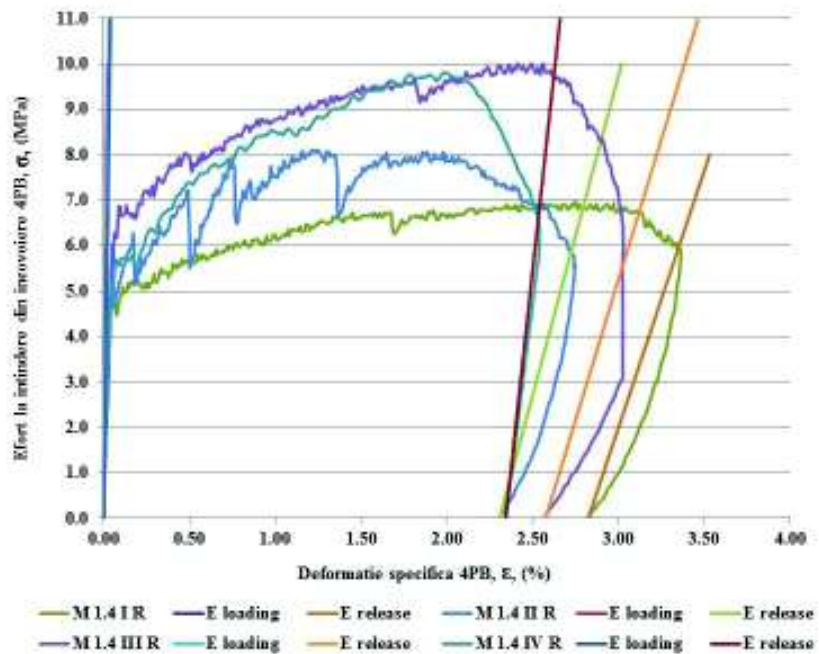


Fig. 5.16. ECC M 1.5 : diagrame σ - ϵ suprapuse la 4PB sub diferite rate de încărcare

Tab. 5.8. Compoziția complementară ECC M 1.5: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB, ciclul de încărcare până la rupere R, sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Interval MC						Autosigilare SS	
	Nr. fisuri	w_{max} (μm)	w_{med} (μm)	w_{min} (μm)	Microfisuri (<60 - 80 μm) w_{med} (μm)	Microfisuri (>60 μm) w_{med} (μm)	Fisuri închise parțial	Fisuri închise total
I	9	502.5	45.2	17.2	35.2	112.4	4	5
II	10	849.1	59.6	25.3	49.6	86.3	8	2
III	10	503.8	49.1	16.9	26.5	79.3	6	4
IV	11	595.3	27.0	13.0	27.0	-	4	7

Analiza stării de fisurare sub încărcarea până la cedare și ulterior eficiența procesului de Autosigilare (SS) este efectuată pentru compoziția complementară M 1.5 pentru toate cele patru de rate de încărcare considerate (vezi Figura 5.17). Numărul de microfisuri dezvoltate pe parcursul ciclului de încărcare până la rupere se menține constant pentru toate cele patru rate de încărcare investigate, respectiv 9-11 fisuri. Rețeaua de microfisuri diferă de compoziția consacrată M 1.4 prin dezvoltarea unor nuclee sau aglomerări de ramificații, cu dimensiuni ce variază între 7-15 (μm), conexe fisurilor specifice (4-8). Eficiența autosigilării (SS) este 100% pentru deschideri de aprox. 30-40 μm . Probele aferente ratelor II și III prezintă un procent redus de închidere a fisurilor, cu dezvoltări sărace de produși de precipitare în fisurile cu deschideri mai mare (>80 μm), însă acest fenomen este mai degrabă conex caracterului eterogen al matricei cementoase decât modalității de inducere a stării de fisurare. Fisura de rupere este preponderent singulară, cu deschideri de 600-800 μm , dar dezvoltarea ei include ramificații cu deschideri de 80-300 μm , de-a lungul direcției transversale de propagare; microramificații cu dimensiuni ce variază între 7-15 (μm) sunt omniprezente în imediata vecinătate și legate de aceasta, cu efect de preluare energetic a eforturilor dezvoltate în probă.

Compoziția complementară M 1.5 este stabilă în sensul performanțelor dinamice, cu sensibilitate scăzută la variația vitezei de încărcare, cu menținere a capacității de dezvoltare a microfisurilor (MC) și implicit al caracterului ductil.

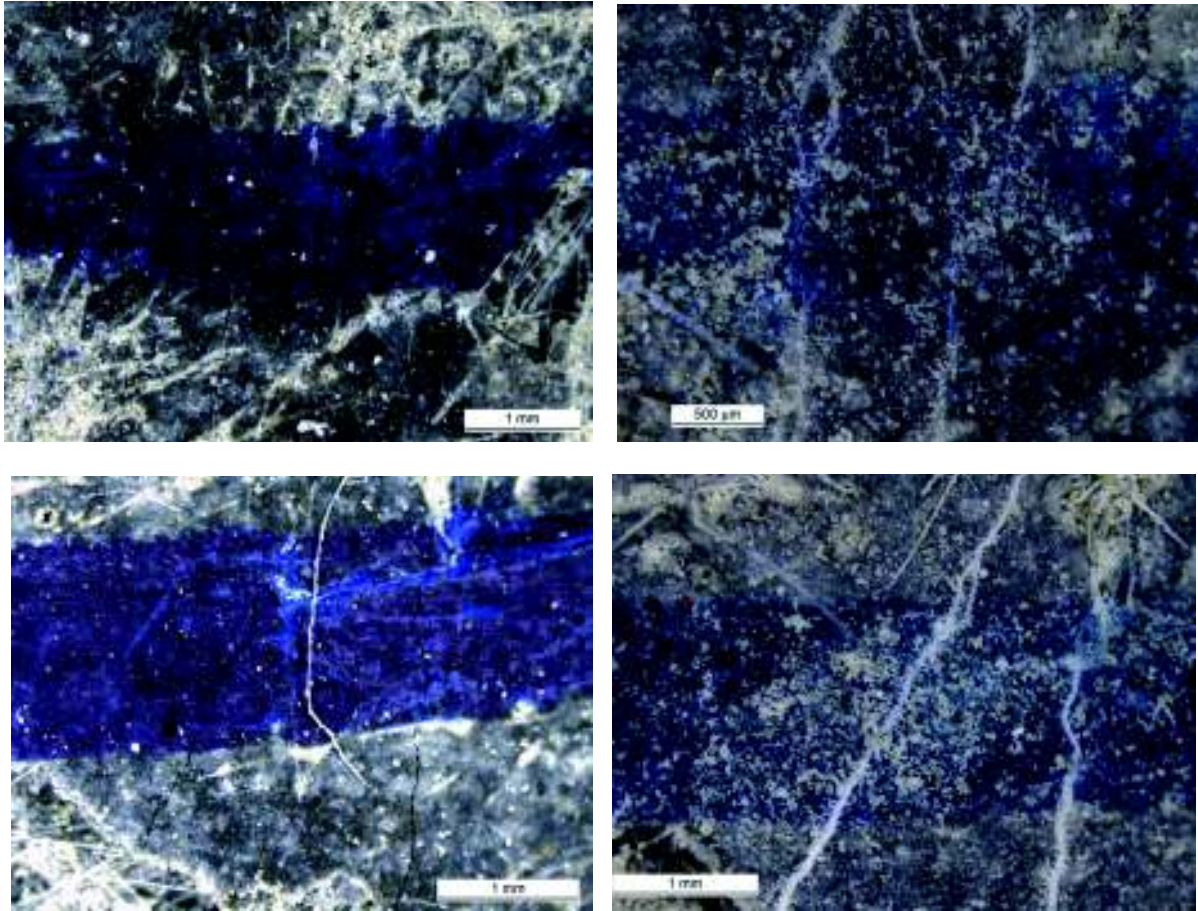


Fig. 5.17. ECC M 1.5: evoluția fisurilor după expunere la ciclurile de autovindecare: fisuri sigilate integral și fisuri sigilate parțial

5.4.4 Compoziția mator M 4.1

Amestecul M 4.1 (vezi capitolul 4, Tabelul 4.2) este amestecul mator al grupului de mortare M 4, caracterizate de raportul în compoziție, între cantitatea de cenușă (FA) și ciment (C), $FA/C = 2.4$.

Epruvetele realizate din această compoziție (vezi Figura 5.18) au fost supuse încercării la întindere prin încovoiere 4PB la vârsta de 28 zile, utilizând ratele de încărcare I și II. Cedarea s-a produs brusc și casant, instantaneu cu inițierea și propagarea fisurii de rupere (vezi Figura 5.19), similar epruvetelor M 1.1R. Comportarea mortarelor mator M 4.1 sub sarcină sunt prezentate prin curbele caracteristice efort - deformație σ - ϵ (Figura 5.20) cât și prin valorile rezultate, respectiv efort maxim și deformație specifică corespunzătoare. Sinteza rezultatelor este prezentată în Tabelul 5.9.



Fig. 5.18. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție mortar M 4.1

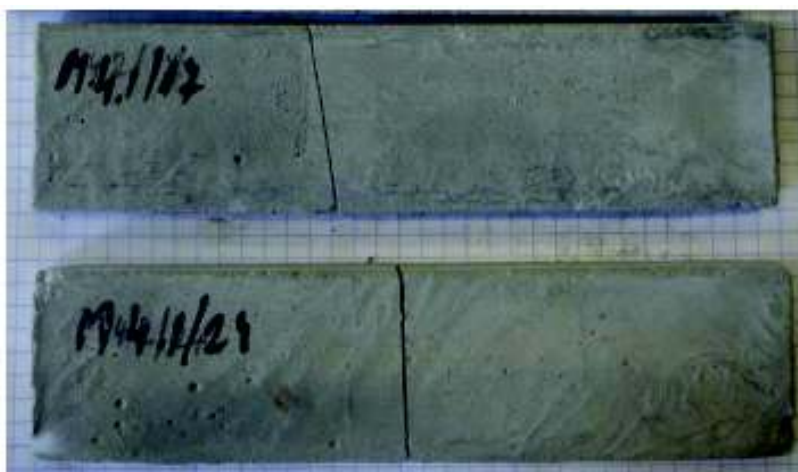


Fig. 5.19. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție mortar M 4.1, după cedare

Tab. 5.9. Compoziția mortar M 4.1: rezistența la întindere prin încovoiere 4PB și deformații specifice aferente

Rata de încărcare	Forța de rupere P (kN)	Rezistența la întindere prin încovoiere σ_{fc} (MPa)	Deplasarea verticală v (mm)	Deformația specifică ϵ_{max} (%)
I	0.13	5.8	0.14	0.05
II	0.11	5.6	0.11	0.06
III	-	-	-	-
IV	-	-	-	-

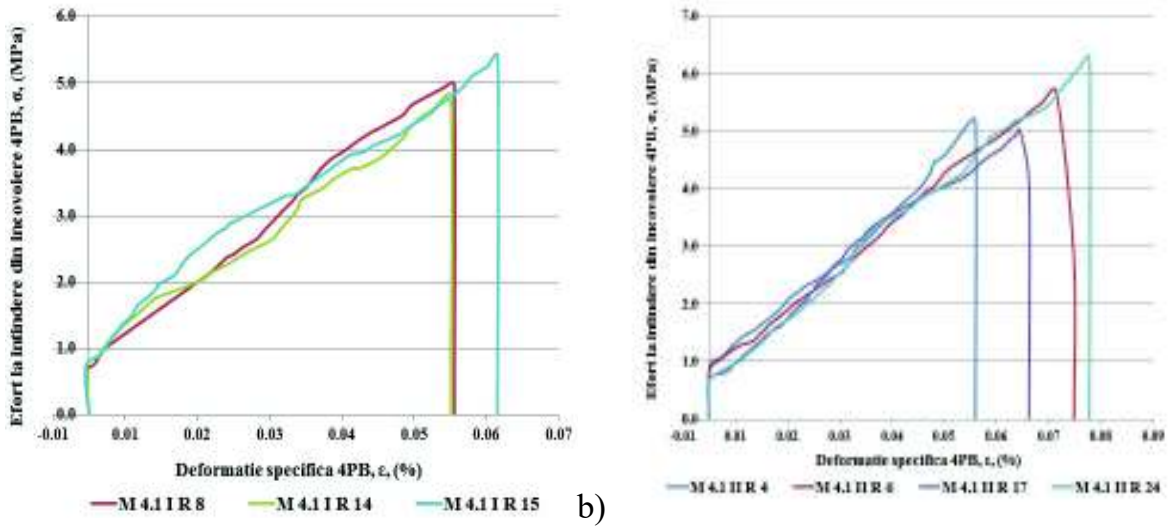


Fig. 5.20. Epruvete martor M 4.1: diagramele σ - ε la 4PB utilizând ratele de încărcare: a) I; b) II

5.4.5 Compoziția ECC M 4.2

Amestecul M 4.2(vezi capitolul 4, Tabel 4.2) reprezintă compoziția realizată cu 2 % (din volum) fibre PVA, lubrefiate cu ulei mineral și caracterizate de raportul în compoziție, între cantitatea de Cenușă (FA) și Ciment (C), $FA/C = 2.4$.

Epruvetele realizate din această compoziție (Figura 5.21) au fost supuse încercării la întindere prin încovoiere 4PB la vârsta de 28 zile, utilizând ratele de încărcare I, II III și IV, similar epruvetelor M 1.4 R și M 1.5 R, până în momentul cedării (Figura 5.22).



Fig. 5.21. Epruvete prismatice 10x40x160 mm, compoziție ECC M 4.2



Fig. 5.22. Epruvetă prismatică 10x40x160 mm, compoziție ECC M 4.2, după cedare

Parametrii relevanți testului la întindere prin încovoiere 4PB și deformațiile specifice aferente sunt prezentate mai jos, prin intermediul diagramelor caracteristice σ - ϵ (vezi Figurile 5.23 și 5.24) cât și prin valorile rezultate, caracteristici mecanice (Tabelul 5.10), caracteristici de elasticitate și ductilitate (Tabelul 5.11), respectiv fisuri (Tabelul 5.12).

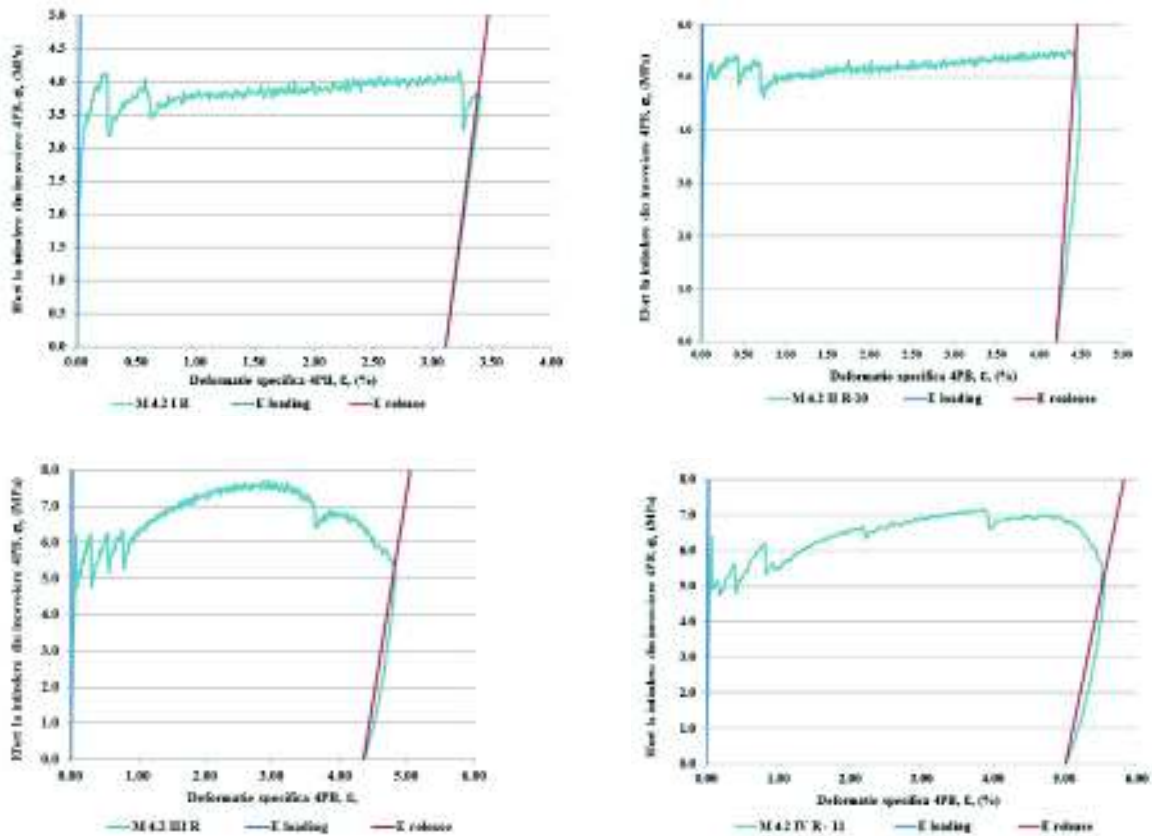


Fig. 5.23. ECC M 4.2: diagrame σ - ϵ la 4PB sub diferite rate de încărcare

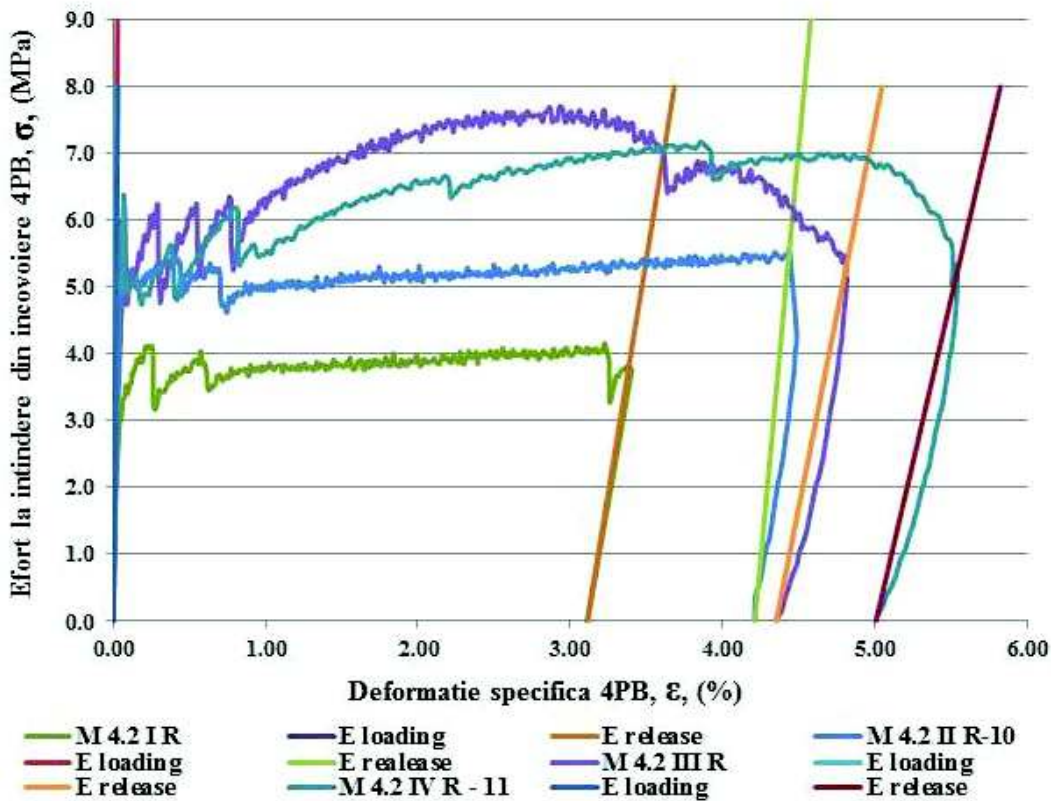


Fig. 5.24. ECC M 4.2 : diagrame σ - ϵ suprapuse la 4PB sub diferite rate de încărcare

Tab. 5.10. Compoziția ECC M 4.2: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Inițierea microfisurării				Încărcare maxima			
	F_{fc} (kN)	σ_{fc} (MPa)	v_{fc} (mm)	ϵ_{fc} (%)	F_{cu} (kN)	σ_{cu} (MPa)	v_{cu} (mm)	ϵ_{cu} (%)
I	0.0667	4.11	0.632	0.21	0.0675	4.16	8.23	3.23
II	0.069	5.25	0.356	0.11	0.073	5.55	11.65	4.44
III	0.148	6.20	0.189	0.08	0.183	7.70	6.56	2.94
IV	0.121	6.35	0.194	0.07	0.137	7.17	9.09	3.87

Tab. 5.11. Compoziția ECC M 4.2: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Ductilitate (deformații specifice maxime și reziduale; eforturi aferente; interval MC)						Elasticitate Modul de elasticitate	
	v_{max} (mm)	ϵ_{max} (%)	σ_u (mm)	ϵ_r (%)	MC (%)	MC* (%)	$E_{t,loading}$ (GPa)	$E_{t,release}$ (GPa)
I	8.63	3.41	3.82	3.11	3.20	3.02	17.3	1.4
II	11.75	4.49	5.55	4.22	4.38	4.33	30.9	2.5
III	10.19	4.82	5.28	4.36	4.74	2.87	36.6	1.2
IV	12.42	5.54	5.21	5.02	5.47	3.8	26.1	1.0

Tab. 5.12. Compoziția principală ECC M 4.2: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB, ciclul de încărcare până la rupere R, sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Interval MC						Autosigilare SS	
	Nr. fisuri	w_{max} (μm)	w_{med} (μm)	w_{min} (μm)	Microfisuri (<60 - 80 μm) w_{med} c	Microfisuri (>70-200 μm) w_{med} (μm)	Fisuri închise parțial	Fisuri închise total
I	5	943.4	236.0	57.5	60.7	117.1	4	1
II	8	542.2 462.8	288.3	72.4	-	130.3	7	1
III	8	1181.7	279.8	18.0	31.6	83.2	8	-
IV	8	1041.8	293.8	59.4	66.0	115.6	8	-

Analiza stării de fisurare sub încărcarea până la cedare și ulterior eficiența procesului de Autosigilare (SS) este efectuată pentru compoziția principală M 4.2 pentru toate cele patru de rate de încărcare considerate (vezi Figura 5.25). Numărul de microfisuri dezvoltate pe parcursul ciclului de încărcare până la rupere se menține constant pentru toate cele patru rate de încărcare investigate, respectiv 5-8 fisuri. Rețeaua de microfisuri diferă de compozițiile anterior analizate, M 1.4 și respectiv M 4.2: fisurile prezintă deschideri substanțial mai mari, atât din punct de vedere al deschiderii medii, minime sau de rupere. Rețeaua de ramificații este semnificativ mai redusă, comparativ atât cu compoziția M 1.4 dar preponderent M 1.5. Sub aspectul capacității de autosigilare (SS), compoziția M 4.2 înregistrează performanțe net inferioare: gradul complet de închidere se înregistrează la puține microfisuri, majoritatea prezentând aglomerări de produși de precipitare, însă insuficienți pentru închiderea completă a microfisurilor, care însă prezintă deschideri mult mai mari decât cele dezvoltate în cadrul compozițiilor anterioare. Fenomenul însă își găsește explicația în procentul considerabil de cenușă (FA) ca și material liant în matrice. Cenușa prezintă un caracter pozzolanic lent și întârziat în comparație cu cimentul, prin urmare dezvoltarea produșilor de precipitare și mai ales a produșilor de hidratare continuă, valoroși pentru recuperarea mecanică a materialului, este așteptată să se producă mai târziu, în comparație cu compozițiile caracterizate de un raport echilibrat, de FA:C = 1. Studii suplimentare de evaluare a eficienței SS la vârste mai târzii, pentru compoziția M 4.2 sunt considerate direcții de viitor esențiale, derivate ale prezentului studiu. Ca și concluzie, aglomerările de produși pe buza, pereții fisurilor precum și pe fibrele dispuse transversal pe deschiderea fisurii sunt indicii clare ale potențialului de generare SS.

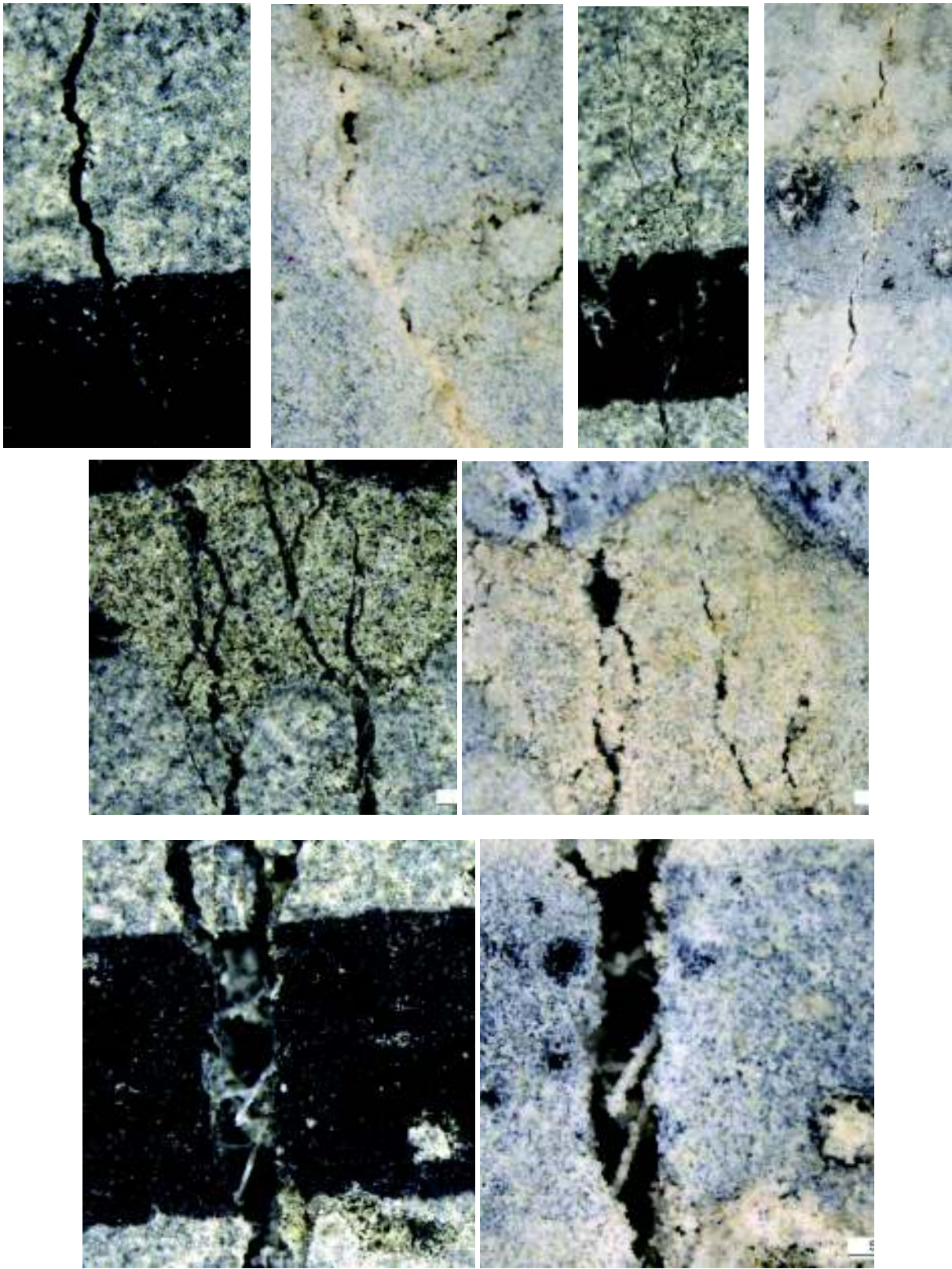


Fig. 5.25. ECC M 4.2: evoluția fisurilor după expunere la ciclurile de autovindecare: fisuri sigilate integral și fisuri sigilate parțial

Deschiderea mare a fisurilor își poate găsi explicația în gradul ridicat de lubrefiere al matricii, fapt indus de două componente:

- procentul ridicat de cenușă de termocentrală (FA), material liant recunoscut pentru acest efect esențial în inducerea efectului de microfisurare multiplă sub sarcină, specific ECC;
- utilizarea fibrelor PVA lubrefiate cu ulei mineral, care diminuează suplimentar aderența lor la matrice și permit deschiderea succesiunii de microfisuri.

Combinarea acestor factori conferă matricii o elasticitate sporită și implicit ductilitate sporită în comparație cu compozițiile anterioare. Rezistența la compresiune este implicit mai redusă, însă handicapul înregistrat la vârste fragede este compensat la vârste mai îndelungate, când cenușa devine activă și își aduce aportul în domeniul tenacității matricii. În consecință, se poate considera că amestecul M 4.2 dezvoltă capacități superioare de dezvoltarea microfisurii și ductilitate sub sarcină, independent de rata de încărcare aleasă.

5.5 Capacitatea de autovindecare (SH)

5.5.1 Compoziția ECC M 1.4

Epruvetele M 1.4 SH au fost supuse unei încărcări inițiale de întindere prin încovoiere 4PB, în vederea inducerii unei stări inițiale de degradare / fisurare (I, $v = 1.5\text{mm}$). După efectuarea ciclurilor de condiționare epruvetele SH au fost retestate în condiții identice, până la consemnarea cedării (II, SH), respectându-se rata de încărcare utilizată în testul inițial. Parametrii relevanți celor două cicluri de încercare la întindere prin încovoiere 4PB, (I, $v=1.5$ și II, SH) sunt prezentate mai jos, prin intermediul diagramelor caracteristice σ - ε aferente celor două cicluri de încercare (vezi Figurile 5.26 și 5.27) cât și prin valorile rezultate, caracteristici mecanice (Tabelul 5.13), fisuri (Tabelul 5.14 și Tabelul 5.15), caracteristici de elasticitate și ductilitate (Tabelul 5.16), respectiv recuperarea acestor parametri prin comparațiile specifice (vezi cap. 5.3.2.2 și Tabelul 5.17).

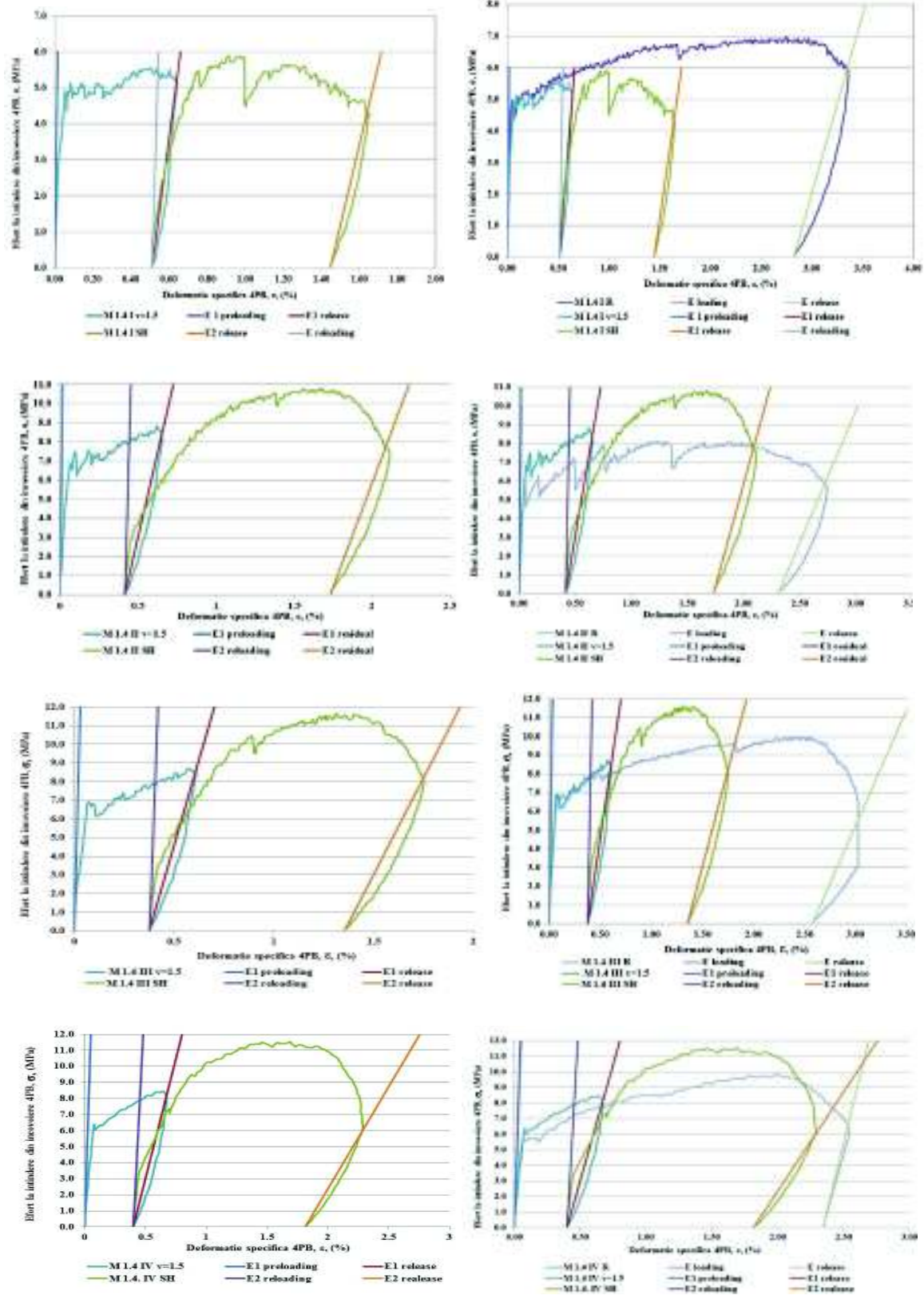


Fig. 5.26. ECC M 1.4, SH: diagrame σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare; stânga: curba SH; dreapta: suprapunerea diagramelor R - SH

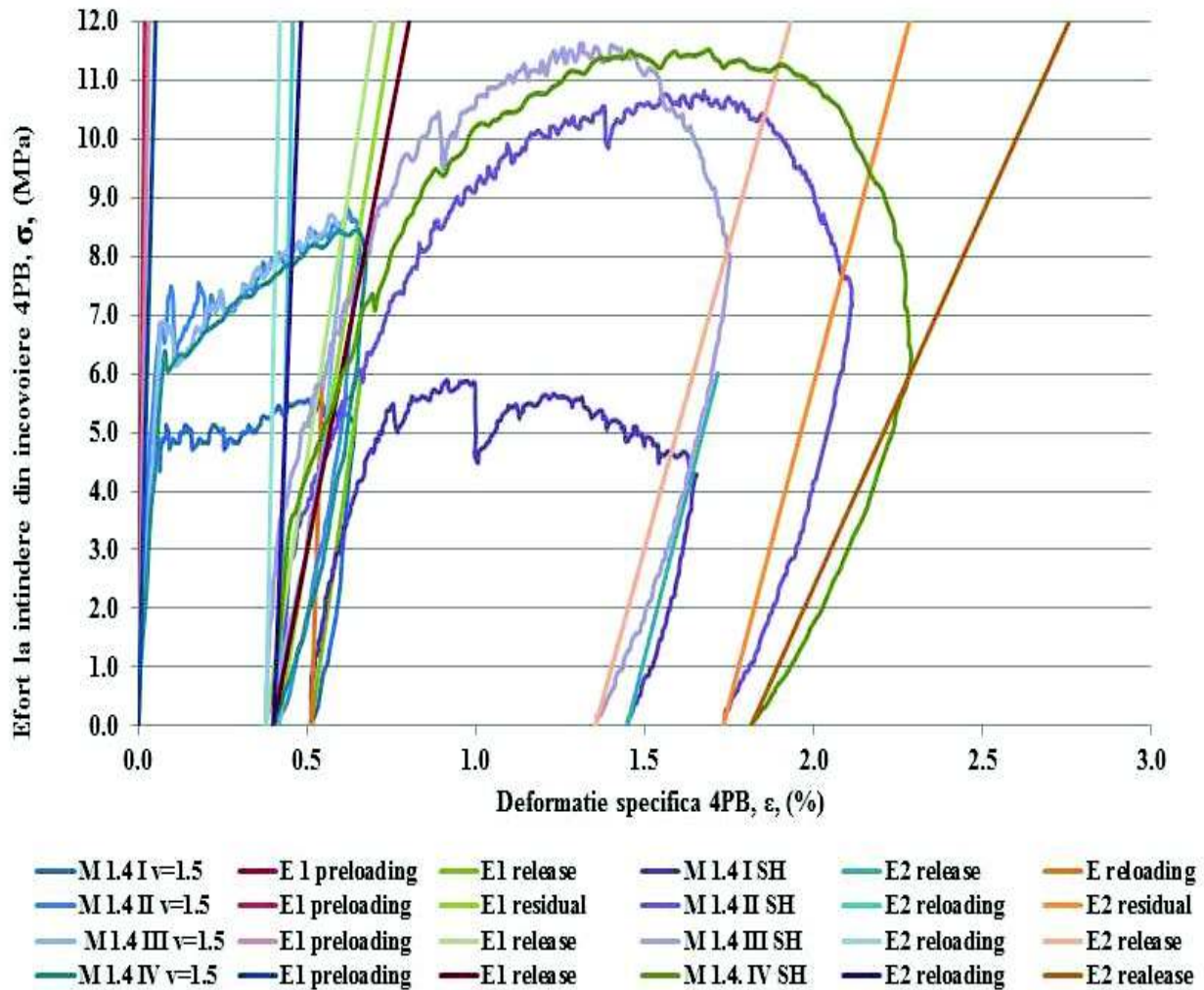


Fig. 5.27. ECC M 1.4 SH: diagrame suprapuse σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare

Tab. 5.13. Compoziția ECC M 1.4, SH: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH)

Rata de încărcare	Ciclu de încărcare	Inițierea microfisurării				Încărcare maxima			
		F_{fc} (kN)	σ_{fc} (MPa)	v_{fc} (mm)	ε_{fc} (%)	F_{cu} (kN)	σ_{cu} (MPa)	v_{cu} (mm)	ε_{cu} (%)
I	I, $v=1.5$	0.124	4.80	0.125	0.05	0.144	5.56	1.185	0.50
	II, SH	0.142	5.48	0.558	0.75	0.153	5.89	0.935	0.91
II	I, $v=1.5$	0.183	6.85	0.152	0.06	0.236	8.83	1.427	0.62
	II, SH	0.162	6.06	0.558	0.66	0.289	10.82	2.820	1.67
III	I, $v=1.5$	0.158	6.88	0.192	0.08	0.200	8.70	1.428	0.58
	II, SH	0.223	9.73	1.027	0.79	0.267	11.62	2.270	1.31
IV	I, $v=1.5$	0.170	6.39	0.186	0.08	0.224	8.45	1.50	0.65
	II, SH	0.195	7.35	0.690	0.70	0.305	11.52	2.91	1.69

Tab. 5.14. Compoziția ECC M 1.4, SH: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm), evaluare SS după ciclurile de vindecare și efectuarea ciclului secundar de reîncărcare până la rupere(II, SH)

Rata de încărcare	I, $v=1.5$	Autosigilare SS		II, SH		
	Nr. fisuri inițiale n	Fisuri închise total	Fisuri închise parțial	Fisuri (total) N*	Fisuri noi	Fisuri inițiale închise după SH, II
I	2	2	-	4	2	-
II	4	3	1	7	3	-
III	4	4	-	7	3	-
IV	6	6	-	11	5	3

Tab. 5.15. Compoziția ECC M 1.4: Analiza comparativă asupra stării de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: Proba SH (ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și ciclul de reîncărcare până la rupere, II, SH) față de proba R(ciclu complet de încărcare până la rupere, R)

Rata de încărcare	Proba SH									
	I, $v=1.5$				Autosigilare SS		II, SH			
	n	W_{max} (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)	Fisuri închise parțial	Fisuri închise total	N*	W_{max} (Rupere) (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)
IV	6	32.5	21.5	10.5	-	6	11	386.7	63.6	8.2
	Proba R									
					Fisuri închise parțial	Fisuri închise total	N	W_{max} (Rupere) (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)
				2	6	8	1298.7	206.5	9.6	

Tab. 5.16. Compoziția ECC M 1.4, Epruvete SH: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH)

Rata de încărcare	Ciclu de încărcare	Ductilitate (deformații specifice maxime și reziduale; eforturi aferente; interval MC)						Elasticitate Modul de elasticitate	
		v_{max} (mm)	ϵ_{max} (%)	σ_u (mm)	ϵ_r (%)	MC (%)	MC* (%)	$E_{t,loading}$ (GPa)	$E_{t,release}$ (GPa)
I	I, $v=1.5$	1.501	0.64	5.25	0.51	0.59	0.45	40.5	4
	II, SH	2.61	1.65	4.29	1.44	0.91	0.16	18.4	2.2
II	I, $v=1.5$	1.505	0.65	8.38	0.41	0.59	0.55	63.3	3.5
	II, SH	3.757	2.12	7.64	1.73	1.46	1.02	28.9	2.2
III	I, $v=1.5$	1.508	0.61	8.56	0.38	0.53	0.50	39.9	3.7
	II, SH	3.295	1.75	8.07	1.35	0.97	0.52	29.0	2.1
IV	I, $v=1.5$	1.555	0.67	8.11	0.4	0.59	0.57	23.7	3.0
	II, SH	4.166	2.29	5.92	1.81	1.59	0.99	14.7	1.3

Tab. 5.17. Compoziția ECC M 1.4, epruvete SH: recuperarea procentuală a caracteristicilor de rezistență, ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Recuperarea proprietăților de rezistență (%)				Recuperarea proprietăților de ductilitate (%)				Recuperarea proprietăților de elasticitate	
	Rezistența la fisurare		Rezistența la întindere 4PB		MC		MC*		$E_{t,loading}$	
I	$SR-\sigma_{fc}^{SH}$	114.2	$SR-\sigma_{cu}^{SH}$	106.0	$SR-MC^{SH}$	153.6	$SR-MC^{*SH}$	35.6	$SR-E^{SH}$	45.6
	$SR-\sigma_{fc}^{SH-R}$	110.2	$SR-\sigma_{cu}^{SH-R}$	84.6	$SR-MC^{SH-R}$	27.3	$SR-MC^{*SH-R}$	6.0	$SR-E^{SH-R}$	38.5
II	$SR-\sigma_{fc}^{SH}$	88.5	$SR-\sigma_{cu}^{SH}$	122.5	$SR-MC^{SH}$	247.8	$SR-MC^{*SH}$	183.3	$SR-E^{SH}$	45.6
	$SR-\sigma_{fc}^{SH-R}$	100.5	$SR-\sigma_{cu}^{SH-R}$	133.6	$SR-MC^{SH-R}$	54.2	$SR-MC^{*SH-R}$	84.9	$SR-E^{SH-R}$	59.5
III	$SR-\sigma_{fc}^{SH}$	141.6	$SR-\sigma_{cu}^{SH}$	133.6	$SR-MC^{SH}$	181.2	$SR-MC^{*SH}$	103.8	$SR-E^{SH}$	72.7
	$SR-\sigma_{fc}^{SH-R}$	141.8	$SR-\sigma_{cu}^{SH-R}$	116.2	$SR-MC^{SH-R}$	32.1	$SR-MC^{*SH-R}$	21.6	$SR-E^{SH-R}$	82.0
IV	$SR-\sigma_{fc}^{SH}$	115.0	$SR-\sigma_{cu}^{SH}$	136.4	$SR-MC^{SH}$	268.0	$SR-MC^{*SH}$	174.6	$SR-E^{SH}$	62.3
	$SR-\sigma_{fc}^{SH-R}$	129.2	$SR-\sigma_{cu}^{SH-R}$	117.5	$SR-MC^{SH-R}$	64.7	$SR-MC^{*SH-R}$	52.4	$SR-E^{SH-R}$	51.7

Analiza comportamentului probei SH, (încărcată în ciclul inițial până la atingerea unei deplasări verticale $v = 1.5\text{mm}$, expusă ciclurilor SH și reîncărcată în ciclul secundar până a rupere se face și comparativ, prin raportare la proba R (încărcată până la rupere în ciclul inițial, la vârsta de 28 zile). Este evaluată performanța probelor testate cu rată de încărcare maximă (IV, Tabelul 5.15). Analiza stării de fisurare pune în evidență performanța corespunzătoare a compozitului M 1.4, capabil să-și mențină chiar la vârste mai înaintate (60 zile) capacitatea de a dezvolta microfisurila solicitări cu rate ridicate de încărcare, cu dimensiuni comparabile celor dezvoltate în ciclul de rupere la 28 zile. 5 microfisuri noi se deschid în cursul ciclului de reîncărcare (II, SH), având o dimensiune medie de $17.1\ \mu\text{m}$, asigurând dezvoltarea palierului de autoconsolidare MC. Suplimentar, analiza fisurilor inițiale ($n = 6$) indică un procent de 100% sigilare în urma expunerii la ciclurile de autovindecare SH, rezultat previzibil prin prisma dimensiunilor reduse a deschiderii acestora. Retestarea arată că un procent de 50% dintre fisurile inițiale rămân închise pe parcursul retestării, dovedind capacitate de autovindecare în profunzime a fisurii, prin dezvoltarea unor produși de precipitare valoroși, cu aderență ridicată la pereții acestora, capabilă să reziste eforturilor noi induse sub sarcină. Alte 3 fisuri inițiale, închise complet în urma ciclurilor SH, se redeschid sub sarcină: una va deveni fisura de

rupere ($w_{med}=366.7 \mu m$) însă celelalte două prezintă deschiderea finală majorată cu aprox. 50% față de cea inițială (Fisura C1 prezintă o deschidere medie finală de $78.2 \mu m$, față de cea inițială de $32.5 \mu m$, iar Fisura C2 prezintă o deschidere medie finală de $43.5 \mu m$, față de cea inițială de $23.2 \mu m$). Se remarcă reducere semnificativă a fisurii corespunzătoare ruperii ($w_{med}=366.7 \mu m$) din ciclul II, SH față de dimensiunea acesteia în proba R, respectiv ($w_{med}=1298.7 \mu m$); acest fapt poate fi indiciul unei echilibrări perpetue, fizice și mecanice a matricei, în timp și sub diferite cicluri de încărcare / descărcare / vindecare / reîncărcare, caracteristice situației reale din cadrul unei exploatari structurale normale.

5.5.2 Compoziția ECC M 1.5

Epruvetele M 1.5 SH au fost evaluate similar epruvetelor ECC M 1.4 SH, iar parametrii relevanți celor două cicluri de încercare la întindere prin încovoiere 4PB, (I, $v=1.5$ și II, SH) sunt prezentate mai jos, prin intermediul diagramelor caracteristice $\sigma-\varepsilon$ aferente celor două cicluri de încercare (vezi Figurile 5.28 și 5.29) cât și prin valorile rezultate, caracteristici mecanice (Tabelul 5.18), fisuri (Tabelul 5.19 și Tabelul 5.20), caracteristici de elasticitate și ductilitate (Tabelul 5.21), respectiv recuperarea acestor parametri prin comparațiile specifice (Vezi cap. 5.3.2.2, Tabelul 5.22).

Tab. 5.18. Compoziția ECC M 1.5, SH: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclul inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH)

Rata de încărcare	Ciclul de încărcare	Inițierea microfisurării				Încărcare maxima			
		F_{fc} (kN)	σ_{fc} (MPa)	v_{fc} (mm)	ε_{fc} (%)	F_{cu} (kN)	σ_{cu} (MPa)	v_{cu} (mm)	ε_{cu} (%)
I	I, $v=1.5$	0.082	4.31	0.098	0.03	0.085	4.46	1.063	0.39
	II, SH	0.134	7.08	1.082	0.82	0.134	7.08	1.082	0.82
II	I, $v=1.5$	0.094	4.41	0.102	0.04	0.121	5.72	1.430	0.55
	II, SH	0.097	4.58	0.386	0.55	0.163	7.67	2.184	1.26
III	I, $v=1.5$	0.115	4.82	0.099	0.04	0.166	6.97	1.074	0.44
	II, SH	0.152	6.40	0.631	0.65	0.211	8.89	1.905	1.18
IV	I, $v=1.5$	0.149	7.14	0.158	0.06	0.150	7.22	1.403	0.54
	II, SH	0.177	8.50	1.366	0.88	0.201	9.67	3.435	1.73

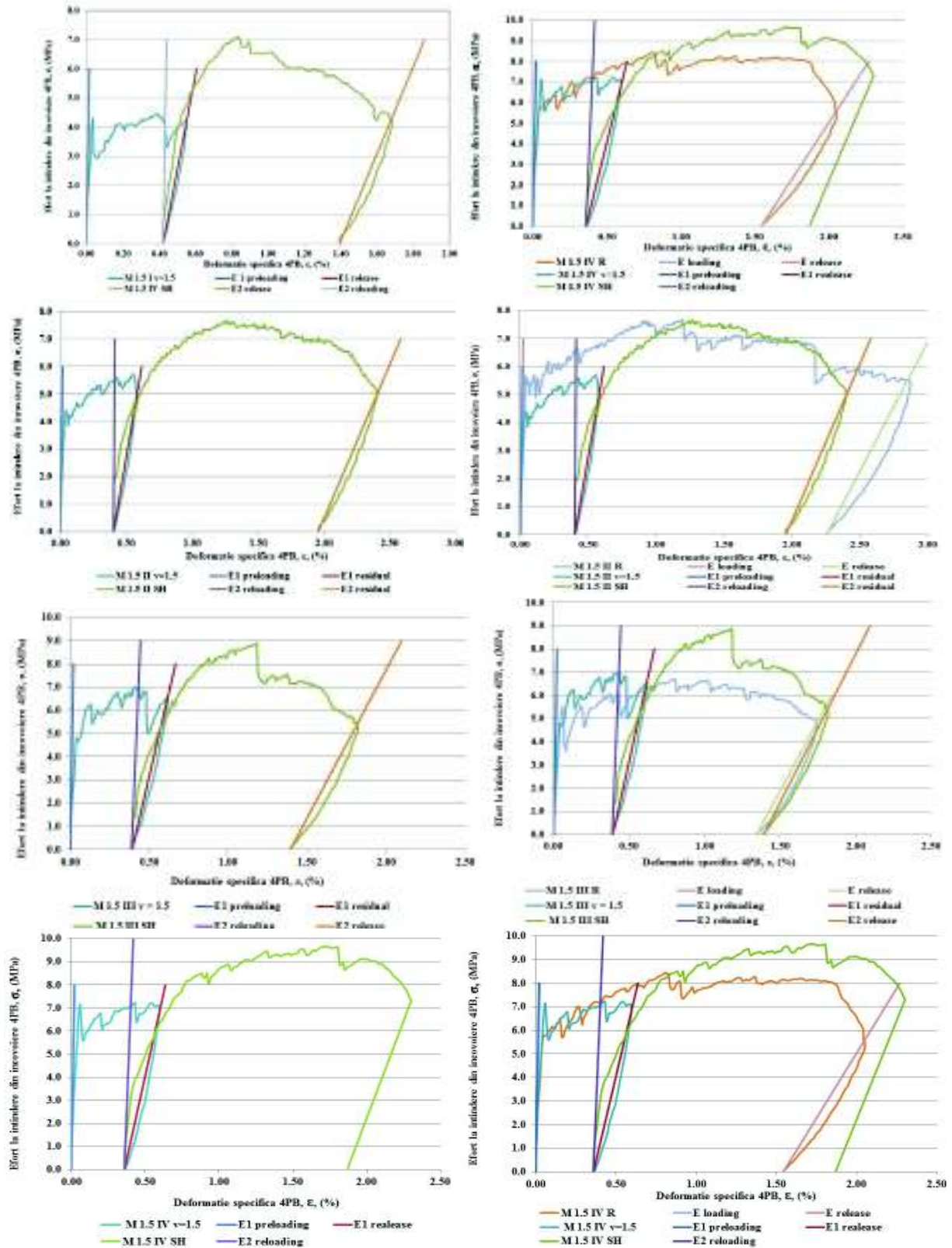


Fig. 5.28. ECC M 1.5, SH: diagrame σ - ϵ la 4PB la diferite rate de încărcare; stânga: curba SH; dreapta: suprapunerea diagraamelor R - SH

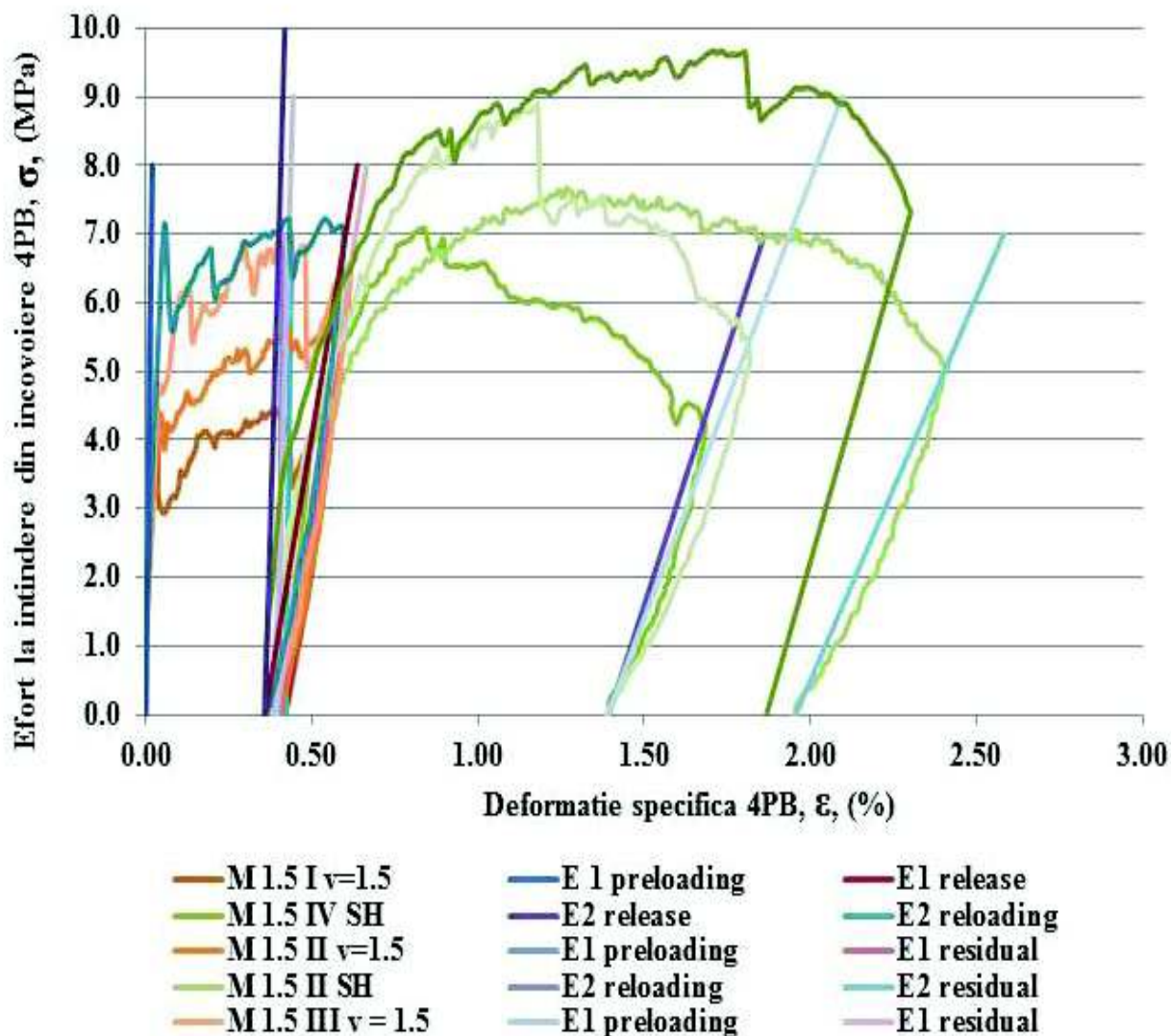


Fig. 5.29. ECC M 1.5 SH: diagrame suprapuse σ - ϵ la 4PB la diferite rate de încărcare

Tab. 5.19. Compoziția ECC M 1.5, SH: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: ciclul inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm), evaluare SS după ciclurile de vindecare și efectuarea ciclului secundar de reîncărcare până la rupere (II, SH)

Rata de încărcare	I, $v=1.5$	Autosigare SS		II, SH		
	Nr. fisuri inițiale n	Fisuri închise total	Fisuri închise parțial	Fisuri (total) N*	Fisuri noi	Fisuri inițiale închise după SH, II
I	2	-	2	6	4	-
II	4	3	1	8	4	-
III	6	4	2	10	4	-
IV	6	5	6	18	12	1

Tab. 5.20. Compoziția ECC M 1.5: Analiza comparativă asupra stării de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: Proba SH (ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și ciclul de reîncărcare până la rupere, II, SH) față de proba R(ciclu complet de încărcare până la rupere, R)

Rata de încărcare	Proba SH									
	I, $v=1.5$				Autosigilare SS		II, SH			
	n	W_{max} (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)	Fisuri închise parțial	Fisuri închise total	N*	W_{max} (Rupere) (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)
IV	6	64.9	25.8	9.6	1	5	18	577.9	24.6	8.4
	Proba R									
					Fisuri închise parțial	Fisuri închise total	N	W_{max} (Rupere) (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)
				4	7	11		595.3	27.0	13.0

Tab. 5.21. Compoziția ECC M 1.5, Epruvete SH: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH)

Rata de încărcare	Ciclu de încărcare	Ductilitate (deformații specifice maxime și reziduale; eforturi aferente; interval MC)						Elasticitate Modul de elasticitate	
		v_{max} (mm)	ϵ_{max} (%)	σ_u (mm)	ϵ_r (%)	MC (%)	MC* (%)	$E_{t,loading}$ (GPa)	$E_{t,release}$ (GPa)
I	I, $v=1.5$	1.501	0.55	4.25	0.42	0.52	0.35	39.3	3.2
	II, SH	3.304	1.26	4.24	1.39	0.45	0.00	36.7	1.5
II	I, $v=1.5$	1.500	0.58	5.03	0.40	0.54	0.52	37.0	2.8
	II, SH	4.854	2.41	5.06	1.96	1.86	0.714	68.3	1.1
III	I, $v=1.5$	1.505	0.62	6.59	0.39	0.58	0.40	37.9	2.9
	II, SH	3.357	1.82	5.42	1.39	1.17	0.53	16.0	1.3
IV	I, $v=1.5$	1.550	0.60	6.84	0.36	0.54	0.48	39.1	2.9
	II, SH	4.678	2.31	7.32	1.87	1.43	0.85	16.7	1.7

Performanța probei M 1.5 SH, (încărcată în ciclul inițial până la atingerea unei deplasări verticale $v = 1.5$ mm, expusă ciclurilor SH și reîncărcată în ciclul secundar până a rupere include și analiza comparativă, prin raportare la proba M 1.5 R (încărcată până la rupere în ciclul inițial, la vârsta de 28 zile). Analiza comparativă vizează probele testate cu rată de încărcare maximă (IV) și pune în evidență capacitatea susținută a compozitului M 1.5 de a-și menține, la vârste mai înaintate (60 zile) și după expunerea la ciclurile de

Tab. 5.22. Compoziția ECC M 1.5, epruvete SH: recuperarea procentuală a caracteristicilor de rezistență, ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare

Rata de încărcare	Recuperarea proprietăților de rezistență (%)				Recuperarea proprietăților de Ductilitate (%)				Recuperarea proprietăților de elasticitate	
	Rezistența la fisurare		Rezistența la întindere 4PB		MC		MC*		$E_{t,loading}$	
I	SR- σ_{fc}^{SH}	164.4	SR- σ_{cu}^{SH}	158.8	SR-MC ^{SH}	86.3	SR-MC* ^{SH}	0.0	SR-E ^{SH}	93.3
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	132.4	SR- σ_{cu}^{SH-R}	111.1	SR-MC ^{SH-R}	24.1	SR-MC* ^{SH-R}	0.0	SR-E ^{SH-R}	97.2
II	SR- σ_{fc}^{SH}	103.8	SR- σ_{cu}^{SH}	134.0	SR-MC ^{SH}	342.8	SR-MC* ^{SH}	138.3	SR-E ^{SH}	184.6
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	80.6	SR- σ_{cu}^{SH-R}	99.8	SR-MC ^{SH-R}	65.7	SR-MC* ^{SH-R}	61.7	SR-E ^{SH-R}	221.7
III	SR- σ_{fc}^{SH}	132.9	SR- σ_{cu}^{SH}	127.4	SR-MC ^{SH}	202.7	SR-MC* ^{SH}	134.1	SR-E ^{SH}	42.3
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	118.0	SR- σ_{cu}^{SH-R}	132.7	SR-MC ^{SH-R}	69.4	SR-MC* ^{SH-R}	72.2	SR-E ^{SH-R}	54.7
IV	SR- σ_{fc}^{SH}	119.0	SR- σ_{cu}^{SH}	133.9	SR-MC ^{SH}	266.2	SR-MC* ^{SH}	177.3	SR-E ^{SH}	42.7
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	138.3	SR- σ_{cu}^{SH-R}	114.6	SR-MC ^{SH-R}	73.6	SR-MC* ^{SH-R}	121.2	SR-E ^{SH-R}	53.3

inducere a vindecării autogene, de a dezvolta microfisuri la solicitări cu rate ridicate de încărcare; acestea prezintă deschideri comparabile celor dezvoltate în ciclul de rupere la 28 zile (Tabelul 2.20). Un număr ridicat de 12 microfisuri noi se deschid în cursul ciclului de reîncărcare (II, SH), având o deschidere medie de 19.9 μm și asigurând dezvoltarea palierului de autoconsolidare MC. Suplimentar, analiza fisurilor inițiale (n = 6) indică un procent de sigilare (SS) ridicat (închiderea totală a 5 fisuri din 6 deschise) în urma expunerii la ciclurile de autovindecare SH, rezultat previzibil prin prisma dimensiunilor reduse a deschiderii acestora. Retestarea produce deschiderea a 12 microfisuri și ramificații aferente, deschiderea parțială a unor microfisuri inițiale (care prezintă deschideri cu dimensiuni reduse în ciclul II, SH comparativ cu ciclul inițial: Fisura C1 are o deschidere inițială medie de 39 μm , prezintă sigilare integrală și la retestare se deschide doar până la valoare de 28 μm ; Ramificația R3 are o deschidere inițială medie de 10.1 μm , prezintă sigilare integrală și la retestare se prezintă o deschidere 8.4 μm ;) Fisura C6 are o deschidere inițială medie de 64.9 μm , prezintă

sigilare aproape completă și la retestare se deschide doar până la valoarea medie de 53.5 μm). Fisura C4 se menține integral închisă și după retestarea până la rupere a probei. Acest fapt confirmă, la fel ca și în cazul compoziției consacrate M 1.4, un grad superior al potențialului SH, de autovindecare în profunzime a fisurii, prin dezvoltarea unor produși de precipitare valoroși, cu aderență ridicată la pereții acestora, capabilă să reziste eforturilor noi induse sub sarcină. Fisura de rupere, cu o deschidere de 577.9 se stabilizează parțial de-a lungul unei fisuri inițiale, parțial prezintă traseu nou.

5.5.3 Compoziția ECC M 4.2

Epruvetele M 4.2 SH au fost evaluate similar epruvetelor ECC M 1.4 SH și ECC M 1.5 SH, iar parametrii relevanți celor două cicluri de încercare la întindere prin încovoiere 4PB, (I, $v=1.5$ și II, SH) sunt prezentate mai jos, prin intermediul diagramelor caracteristice σ - ε aferente celor două cicluri de încercare (vezi Figurile 5.30 și 5.31) cât și prin valorile rezultate, caracteristici mecanice (Tabelul 5.23), fisuri (Tabelul 5.24 și Tabelul 5.25), caracteristici de elasticitate și ductilitate (Tabelul 5.26), respectiv recuperarea acestor parametri prin comparațiile specifice (vezi cap. 5.3.2.2 și Tabelul 5.27).

Tab. 5.23. Compoziția ECC M 4.2, SH: caracteristici de rezistență la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclul inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH)

Rata de încărcare	Ciclul de încărcare	Inițierea microfisurării				Încărcare maxima			
		F_{fc} (kN)	σ_{fc} (MPa)	v_{fc} (mm)	ε_{fc} (%)	F_{cu} (kN)	σ_{cu} (MPa)	v_{cu} (mm)	ε_{cu} (%)
I	I, $v=1.5$	0.085	3.91	0.138	0.53	0.100	4.57	1.502	0.59
	II, SH	0.144	6.61	6.45	3.25	0.168	7.70	6.452	3.25
II	I, $v=1.5$	0.130	5.27	1.17	0.70	0.132	5.36	1.494	0.62
	II, SH	0.184	7.46	0.797	0.81	0.189	7.68	6.673	3.53
III	I, $v=1.5$	0.125	5.61	0.183	0.07	0.127	5.70	1.199	0.47
	II, SH	0.159	7.13	0.937	0.81	0.175	7.85	2.601	1.49
IV	I, $v=1.5$	0.114	5.96	0.204	0.07	0.114	5.96	0.204	0.07
	II, SH	0.124	6.49	1.11	0.79	0.159	8.33	5.619	2.64

Tab. 5.24. Compoziția ECC M 4.2, SH: starea de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm), evaluare SS după ciclurile de vindecare și efectuarea ciclului secundar de reîncărcare până la rupere(II, SH)

Rata de încărcare	I, $v=1.5$	Autosigilare SS		II, SH		
	Nr. fisuri inițiale n	Fisuri închise total	Fisuri închise parțial	Fisuri (total) N*	Fisuri noi	Fisuri inițiale închise după SH, II
I	2	-	2	6	4	-
II	3	-	3	8	5	-
III	3	-	3	7	4	-
IV	4	-	4	14	10	-

Tab. 5.25. Compoziția ECC M 4.2: Analiza comparativă asupra stării de fisurare la întindere prin încovoiere 4PB: Proba SH (ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și ciclul de reîncărcare până la rupere, II, SH) față de proba R(ciclu complet de încărcare până la rupere, R):

Rata de încărcare	Proba SH									
	I, $v=1.5$				Autosigilare SS		II, SH			
	n	W_{max} (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)	Fisuri închise parțial	Fisuri închise total	N*	W_{max} (Rupere) (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)
IV	4	39.3	28.6	7.4	-	6	14	628.9	131.4	20.7
	Proba R									
					Fisuri închise parțial	Fisuri închise total	N	W_{max} (Rupere) (μm)	W_{med} (μm)	W_{min} (μm)
				8	-	8	1041.8	293.8	59.4	

Analiza comportamentului probei M 4.2 SH, (încărcată în ciclul inițial până la atingerea unei deplasări verticale $v = 1.5$ mm, expusă ciclurilor SH și reîncărcată în ciclul secundar până a rupere se face și comparativ, prin raportare la proba R (încărcată până la rupere în ciclul inițial, la vârsta de 28 zile); sunt considerate de asemenea si amestecurile anterior evaluate, M 1.4 și respectiv M 1.5. Analiza comparativă vizează probele testate cu rată de încărcare maximă (IV) și evidențiază comportamentul distinct al compoziției M 4.2, în comparație cu M 1.4 și M 1.5, și respectiv un potențial latent de Autovindecare (SH). Testarea inițială până la rupere, efectuată pe epruvetele R, indică o deschidere mare a fisurilor, atât sub aspectul deschiderii medii de fisurare, deschiderii minime, dar și al

deschiderii fisurii de rupere, cu mult peste valorile înregistrate în cazul amestecurilor M 1.4 și M 1.5. Analiza microscopică efectuată post expunerii ciclurilor SH indică demararea întârziată a dezvoltării produșilor de precipitare pe pereții fisurilor. Procentul SS este clar inferior în comparație cu compozițiile M 1.4 și M 1.5.

Tab. 5.26. Compoziția ECC M 4.2, Epruvete SH: caracteristici de ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare; ciclu inițial de încărcare (I, $v=1.5$ mm) și reîncărcare (II, SH):

Rata de încărcare	Ciclul de încărcare	Ductilitate (deformații specifice maxime și reziduale; eforturi aferente; interval MC)						Elasticitate Modul de elasticitate	
		V_{max} (mm)	ϵ_{max} (%)	σ_u (mm)	ϵ_r (%)	MC (%)	MC* (%)	$E_{t,loading}$ (GPa)	$E_{t,release}$ (GPa)
I	I, $v=1.5$	1.502	0.59	4.56	0.46	0.54	0.54	21.4	3.6
	II, SH	8.968	4.49	5.87	4.05	3.82	2.58	11.8	1.4
II	I, $v=1.5$	1.504	0.63	5.34	0.48	0.56	0.55	33.1	3.7
	II, SH	9.060	4.77	6.28	4.30	3.95	2.72	7.1	1.4
III	I, $v=1.5$	1.503	0.60	5.19	0.44	0.53	0.40	24.3	3.2
	II, SH	8.223	4.12	5.12	3.73	3.32	0.70	38.0	1.4
IV	I, $v=1.5$	1.539	0.60	5.03	0.38	0.50	0.0	26.9	2.7
	II, SH	8.755	4.09	4.93	3.60	3.30	1.85	31.6	1.01

Tab. 5.27. Compoziția ECC M 4.2, epruvete SH: recuperarea procentuală a caracteristicilor de rezistență, ductilitate și elasticitate la întindere prin încovoiere 4PB sub diferite rate de încărcare:

Rata de încărcare	Recuperarea proprietăților de rezistență (%)				Recuperarea proprietăților de Ductilitate (%)				Recuperarea proprietăților de elasticitate	
	Rezistența la fisurare		Rezistența la întindere 4PB		MC		MC*		$E_{t,loading}$	
I	SR- σ_{fc}^{SH}	169.0	SR- σ_{cu}^{SH}	168.5	SR-MC ^{SH}	708.7	SR-MC* ^{SH}	478.3	SR-E ^{SH}	55.4
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	160.8	SR- σ_{cu}^{SH-R}	185.2	SR-MC ^{SH-R}	119.4	SR-MC* ^{SH-R}	85.4	SR-E ^{SH-R}	68.5
II	SR- σ_{fc}^{SH}	141.7	SR- σ_{cu}^{SH}	143.3	SR-MC ^{SH}	709.0	SR-MC* ^{SH}	491.0	SR-E ^{SH}	21.5
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	142.2	SR- σ_{cu}^{SH-R}	138.4	SR-MC ^{SH-R}	90.2	SR-MC* ^{SH-R}	62.7	SR-E ^{SH-R}	23.1
III	SR- σ_{fc}^{SH}	127.2	SR- σ_{cu}^{SH}	137.8	SR-MC ^{SH}	628.8	SR-MC* ^{SH}	170.9	SR-E ^{SH}	156.6
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	114.9	SR- σ_{cu}^{SH-R}	101.9	SR-MC ^{SH-R}	69.9	SR-MC* ^{SH-R}	24.0	SR-E ^{SH-R}	104.0
IV	SR- σ_{fc}^{SH}	108.9	SR- σ_{cu}^{SH}	139.7	SR-MC ^{SH}	665.3	SR-MC* ^{SH}	-	SR-E ^{SH}	117.3
	SR- σ_{fc}^{SH-R}	111.9	SR- σ_{cu}^{SH-R}	100.7	SR-MC ^{SH-R}	44.7	SR-MC* ^{SH-R}	34.6	SR-E ^{SH-R}	121.2

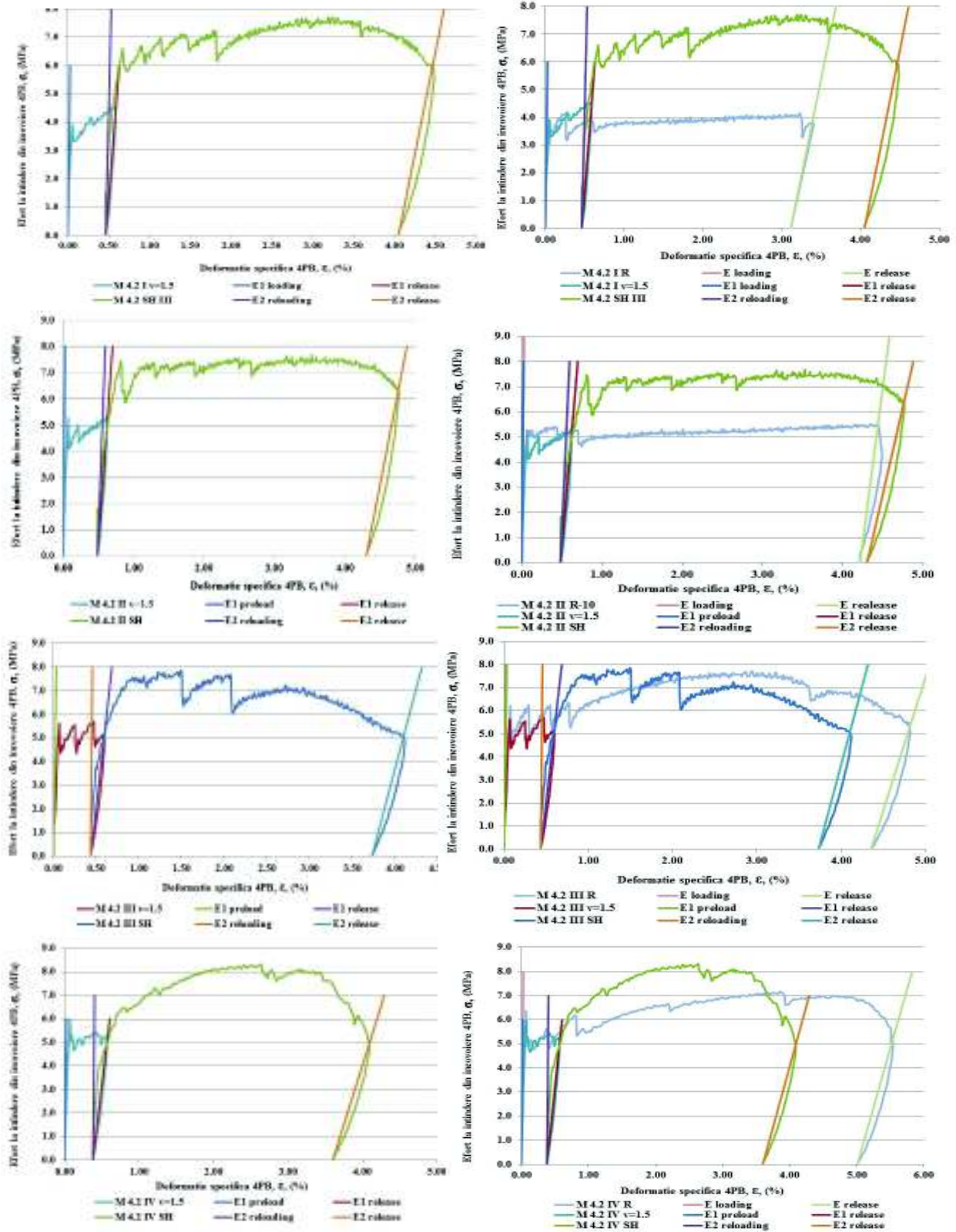


Fig. 5.30. ECC M 4.2, SH: diagrame σ - ϵ la 4PB la diferite rate de încărcare; stânga: curba SH; dreapta: suprapunerea diagramelor R - SH

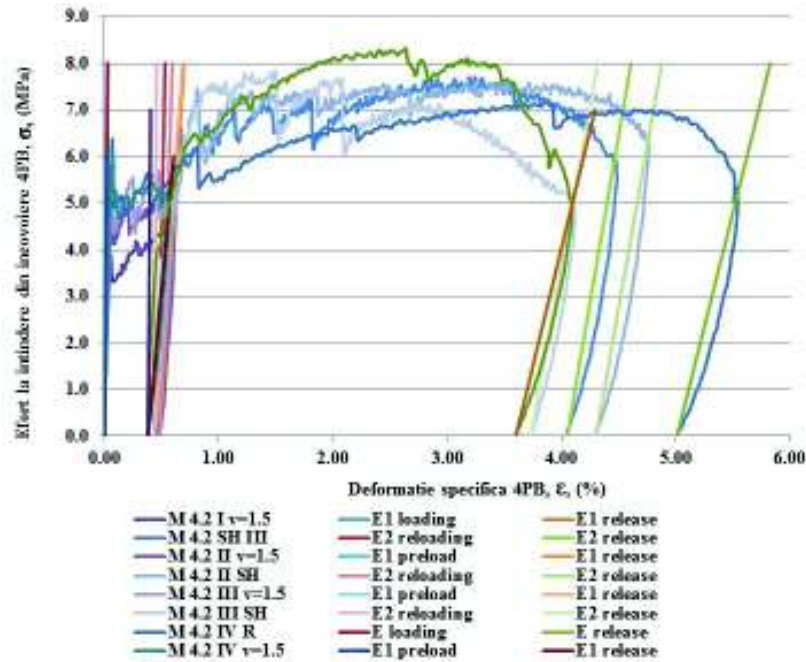


Fig. 5.31. ECC M 4.2 SH: diagrame suprapuse σ - ε la 4PB la diferite rate de încărcare

Efectuarea ciclului inițial de încărcare (I, $v=1.5$) asupra probelor SH indică o echilibrare din punct de vedere a deschiderii fisurilor generale, comparabile cu cele dezvoltate de compozitul M 1.4. Numărul inițial de microfisuri (n) este mai redus, însă rata rapidă de încărcare aduce o creștere în acest sens: 4 microfisuri, comparativ cu 2 sau 3 generate de ratele inferioare. Analiza capacității SS a probelor M 4.2 SH nu produce surprize, microfisurile inițiale nu sunt închise, se remarcă doar demararea procesului generării produșilor de precipitare și hidratare continuă, incomplet însă la vârsta efectuării analizei.

Retestarea probelor M 4.2 SH confirmă însă potențialul superior al compozitului de menținere a performanțelor de generare al microfisurării și implicit ductilității. Ciclul II de rupere sub rata IV generează un număr de 10 microfisuri noi și indică un grad de echilibrare în timp al materialului sub aspectul dimensiunii de deschidere a microfisurilor: media generală coboară de la 293.8 μm , înregistrată pe proba R la 28 zile, la 131.4 μm ; de asemenea, fisura de rupere prezintă o deschidere de aprox. 630 μm la retestare, comparativ cu cea de aprox. 1050 μm la 28 zile. Materialul câștigă în domeniul

rezistenței, conservându-și însă elasticitatea necesară ductilității (Figura 5.30 și Figura 5.31).

Analiza vizuală reprezentativă, cuprinzând evoluția fisurii sub sarcină pentru epruvetele SH studiate, respectiv stadiul inițial, după aplicare ciclului de preîncărcare, stadiul după condiționarea SH și apoi stadiul după retestarea la rupere, este detaliată în Anexa 5.1.

6. EVALUAREA COMPOZIȚIILOR ECC PRIN TESTE DE IMPACT

6.1 Fundamentarea cercetării

Solicitările dinamice au un mod diferit de acționare asupra structurilor în comparație cu cele natură statică. Implicit, solicitările dinamice induc efecte diferite în sfera stării de eforturi și deformații din elementele structurale afectate: se propagă pe durate extrem de scurte, aproape instantaneu, cu rate de efort/deformare ridicate și determină un puternic și brusc transfer de flux energetic, convertit în unde rapide de efort în volumul corpului țintă și putând cauza colaps brusc și fragil.

În ultimii ani se constată o creștere efectivă a incidenței acestui tip de solicitări, generată pe de o parte de încălzirea globală (sub formă de tornade, vânturi puternice și schimbări climatice adiacente), cutremure de pământ, acțiuni umane (războaie, risc generalizat de atacuri teroriste, etc.). Astfel, cerințele de securitate ale infrastructurii la acțiuni accidentale au crescut inevitabil, determinând o nevoie sporită de analiză a fenomenelor conexe acestora, pentru dezvoltarea metodelor optime de dimensionare și prevenție în sfera lor de efect, atât sub forma optimizării proiectării structurale cât și în domeniul de dezvoltare a unor materiale noi, cu caracteristici intrinseci de performanță la încărcări accidentale.

În debutul secolului XX, armata s-a arătat direct interesată cu preponderență de cercetarea solicitărilor accidentale din categoria șocului (impact) de tip balistic, suflul exploziei [79], etc.. Ulterior, dezvoltarea industriei nucleare [80], [81] a lărgit inevitabil sfera de interes aferentă studiilor pentru identificarea unor soluții vizând protecția sporită a centralelor de profil, cu precădere a miezului reactoarelor nucleare, împotriva unor eventuale accidente cu consecințe catastrofale (vezi accidentele de la Cernobîl-1986 [82] și Fukushima-2011 [83]). În același timp, structurile strategice, de tipul podurilor, drumurilor suspendate, viaductelor tunelurilor, barajelor, etc., al căror colaps subit ar produce efecte catastrofale, trebuie dimensionate în sfera protecției la acțiuni accidentale, implicit șoc, determinând astfel lărgirea sferei de interes în acest topic [80]. Potrivit lui Banthia [84], [85] pot fi identificate două categorii majore de solicitări din impact:

- cu acțiune concentrată local, cum ar fi de exemplu efectul unei rachete ce străpunge un perete (acest tip de impact face obiectul prezentului capitol);
- cu acțiune globală, general distribuită asupra elementului/elementelor structurale sau chiar asupra structurii în ansamblu, cum este efectul unei sarcini explosive detonată într-o încăpere.

Încărcările accidentale de tip șoc (impact) creează în structura solicitată o suprapunere de efecte fizice și mecanice, guvernate de rata ridicată efort/deformație și implicit valul de energie pe care structura trebuie să-l disipeze într-un interval scurt de timp. Răspunsul acesteia, global sau local, în funcție de factori precum interacțiunea proprietăților fizico-mecanice ale materialelor, geometria și ansamblul structural, etc., este caracterizat prin capacitatea structurii de a absorbi și disipa, în mod eficient și rapid, energia survenită prin impact [86], [87]. Trebuie subliniat că sunt de dorit structuri rezistente, cu răspunsuri care asigure siguranța vizavi de colapsul global sau local, cu rate de degradare cât mai reduse.

La modul general, impactul poate fi definit ca și interacțiunea fizică dintre două corpuri, dintre care cel puțin unul aflat în mișcare: un corp caracterizat de masa sa (de impact, care lovește) și un alt corp, definit de asemenea de masa sa (supus impactului,

afectat de șoc, ținta), interacțiune ce se petrece sub influența directă a unor condiții: de viteză, geometrice sau caracteristici de material specifice celor două corpuri implicate. Spre deosebire de sarcina seismică, multiciclică, impactul este caracterizat printr-un ciclu singular, efectul de impact multiplu (sau în lanț) obținându-se în condițiile mai multor corpuri de impact.

6.2 Solicitarea de impact local

6.2.1 Ipotezele fundamentale ale impactului ideal elastic într-un sistem conservativ de forțe

6.2.1.1 Conservarea impulsului

În fizica Newtoniană (clasică) *impulsul* unei mase m care se deplasează cu viteza v este definit ca și produsul dintre masa unui obiect în mișcare și viteza cu care acesta se deplasează [88]:

$$p = m \times v \quad (6.1)$$

Ipoteza de conservare a impulsului poate fi enunțată considerând:

- *principiul acțiunii și reacțiunii (a treia lege a lui Newton)*: coliziunea a două corpuri este caracterizată prin prezența unei perechi de forțe, egale și de sens contrar, care acționează asupra celor două obiecte:

$$F_1 = -F_2 \quad (6.2)$$

- *a treia lege de mișcare a lui Newton*: accelerația unui corp sub acțiunea unei forțe este direct proporțională cu mărimea forței și având același semn (sens) și invers proporțională cu masa obiectului; legea poate fi scrisă analitic sub forma

$$F = m \times a = m \frac{dv}{dt} \quad (6.3)$$

Din relația (6.3) rezultă

$$F \times dt = m \times dv \quad (6.4)$$

Iar integrarea relației conduce la

$$\int_{\Delta t} F dt = m \int_{\Delta v} dv = m \Delta v \quad (6.5)$$

Integrala forței funcție de timp reprezintă *variația impulsului*, definită ca și produs între masa obiectului și variația vitezei sale de deplasare.

Pe parcursul contactului ca rezultat al impactului dintre două corpuri de mase m_1 și m_2 , asupra acestora acționează o forță variabilă în timp, $F = f(t)$. Aplicând cele două legi newtoniene rezultă ipoteza de conservare a impulsului exprimată prin relația:

$$m_1 \Delta v_1 + m_2 \Delta v_2 = 0 \quad (6.6)$$

unde: Δv_1 și Δv_2 sunt variația vitezelor celor două corpuri pe parcursul impactului.

6.2.1.2 Conservarea energiei

Energia potențială E_p este definită ca și energia rezultată din poziția unui corp. Ca și exemplificare se menționează *energia potențială gravitațională* (vezi Figura 6.1): masa corpului de impact m , situat la înălțimea h de corpul țintă, înglobează energie potențială generată de masa sa amendată cu valoarea accelerației gravitaționale (ce determină căderea verticală) și de asemenea înălțimea de cădere.

$$E_p = mgh \quad (6.7)$$

Energia cinetică E_c reprezintă energia de mișcare, generând și întreținând mișcarea, spre exemplu translația (vezi Fig. 6.1) unui corp dintr-un punct în altul. Este o mărime scalară ce depinde de masa corpului m și de viteza sa de deplasare v :

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad (6.8)$$

Considerând cazul simplificat al unui corp care lovește prin cădere liberă, sub acțiune strict gravitațională, *un corp staționar* (având viteza zero în sistemul relativ unde cuplul este amplasat, respectiv masă și rigiditate infinite), energia potențială inițială E_p se transformă integral în energie cinetică E_c în momentul impactului.

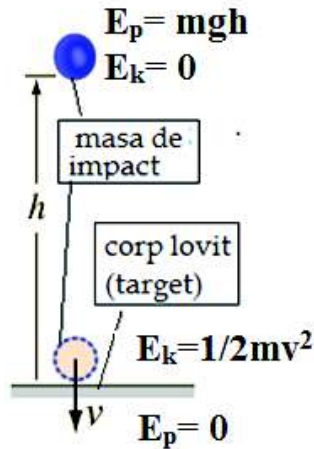


Fig. 6.1. Impact gravitațional (cădere liberă): conservarea energiei

Ecuția de conservare a energiei este

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6.9)$$

După impact viteza masei rămâne aceeași și energia cinetică a masei se va transforma treptat integral în energie potențială gravitațională.

6.2.2 Impactul local și indicatori de autovindecare (SH)

În cazul încercării standard la impact (drop weight test), în care corpul de masă m_1 (bilă metalică) este lăsată să cadă liber de la înălțimea h_1 peste masa m_2 (placă realizată din compoziții ECC) aflată în repaus, ipotezele ciocnirii ideal elastice nu pot fi considerate integral. Figura 6.2 pune în evidență sub formă grafică secvențele și etapele esențiale ale încercării. Energia cinetică a corpului de impact va fi parțial disipată prin intermediul frecării (inerente, spre exemplu cu aerul sau prin contact adiacent cu alte corpuri), iar parțial va fi transferată corpului țintă, sub formă de unde de eforturi radiante în masa acestuia, cauzând deformații elastice și inelastice.

Din momentul lansării corpului de masă m_1 (momentul t_0), și până în momentul dinaintea contactului (momentul t_1), energia potențială gravitațională a masei m_1 se transformă în căldură ca urmare a frecării cu aerul și tubul de ghidare și în energie cinetică. O ipoteză simplificatoare, perfect acceptabilă, este neglijarea frecării pe durata

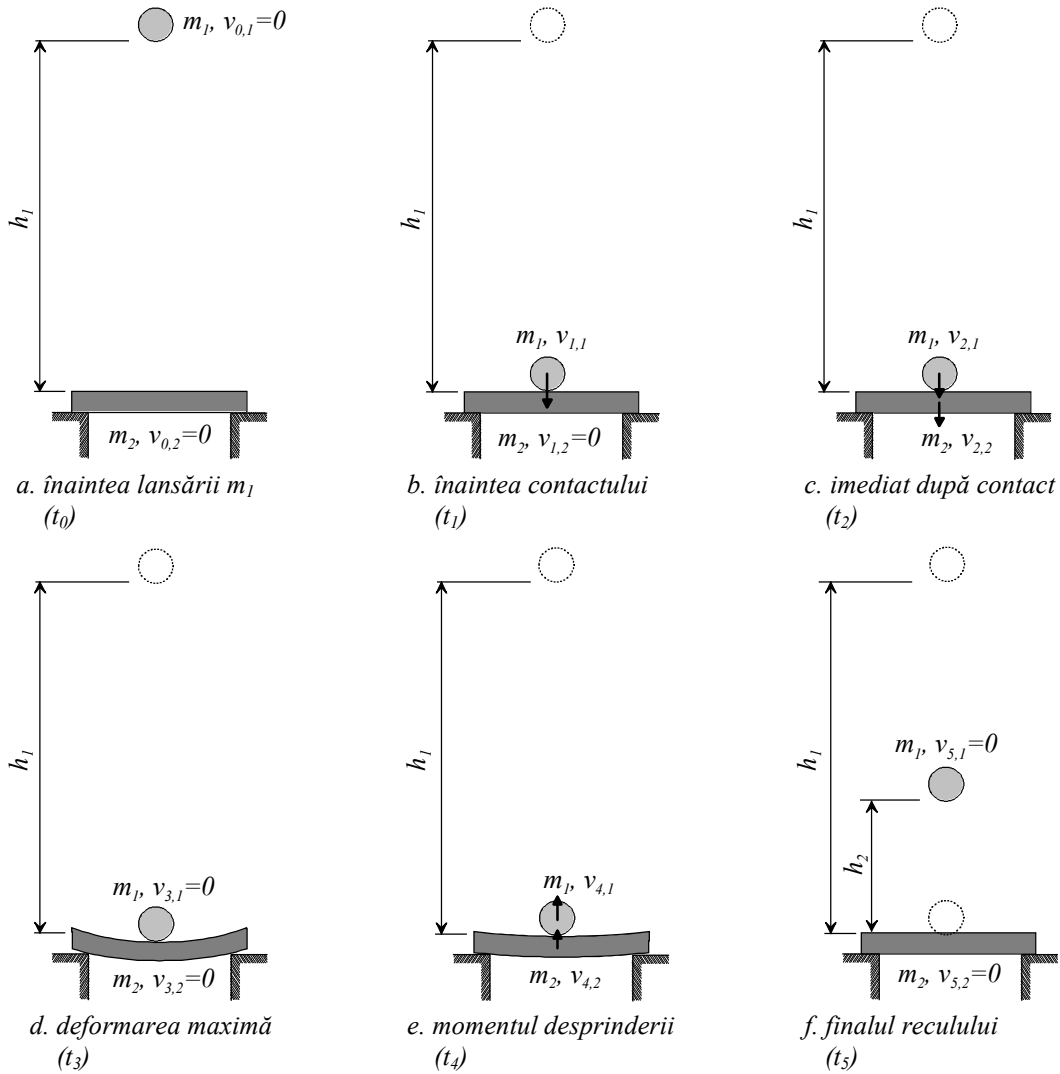


Fig. 6.2. Secvențe esențiale ale încercării la șoc (impact local)

căderii și respectiv reculului. Astfel, energia potențială gravitațională a masei m_1 se transformă integral în energie cinetică până în momentul imediat premergător contactului dintre cele două corpuri:

$$m_1 g h_1 = \frac{1}{2} m_1 v_{1,1}^2 \quad (6.10)$$

O altă ipoteză acceptabilă este indeformabilitatea corpului de masă m_1 (bilă metalică) față de corpul de masă m_2 (epruvetă ECC). Din momentul realizării contactului (momentul t_2) și până la atingerea săgeții corpului de masă m_2 (momentul t_3), energia cinetică a masei m_1 se transformă în energie potențială de deformare (elastică și

inelastică) a corpului m_2 . În continuare, până în momentul desprinderii (momentul t_4), cea mai mare parte a energiei potențiale de deformare elastică se transformă în energie cinetică transmisă masei m_1 , generând reculul acesteia. Astfel, se poate considera practic că în acest moment $v_{4,2}=0$. La finalul reculului (momentul t_5) avem:

$$\frac{1}{2} m_1 v_{4,1}^2 = m_1 g h_2 \quad (6.11)$$

La finalul ciclului, se poate considera că diferența de energie potențială gravitațională se regăsește în energia potențială de deformare inelastică a epruvetei ECC. Din relațiile (6.10) și (6.11)

$$\begin{aligned} v_{1,1} &= \sqrt{2gh_1} \\ v_{4,1} &= \sqrt{2gh_2} \end{aligned} \quad (6.12)$$

și ca principal parametru de cuantificare a capacității de autoreparare (SR), respectiv autovindecare (SH), se consideră variația indicelui de restituire

$$cr = \frac{v_{4,1}}{v_{1,1}} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (6.13)$$

care furnizează informații clare cu privire la refacerea potențialului de deformare inelastică a materialului și a capacității de disipare a energiei. Așa cum se prezintă în 6.3.3, alți indicatori ai capacității de autoreparare (SR) se referă la evoluția deplasărilor înregistrate. Capacitatea de autosigilare se cuantifică în continuare prin evoluția fisurilor stabilită prin măsurători digitale/optice.

6.3 Teste de impact/șoc prin metoda căderii libere (DWT)

6.3.1 Metoda de încercare

Evaluarea comportamentului compozitelor ECC la solicitarea din impact/șoc a fost realizată prin metoda căderii libere (drop weight test - DWT), a epruvetelor de tip placă cu dimensiunile 20×200×13 mm (vezi Figura 6.4) [87], [89]. Grosimea prestabilită (inițială) a plăcilor (înălțime tipar de turnare probe, grosime probe la decofrare) este $t \sim 15$ mm, după cum s-a menționat în capitolul 4 (vezi Figura 6.3).



Fig. 6.3. Epruvete ECC tip placă cu dimensiunile 200×200×15, după decofrare

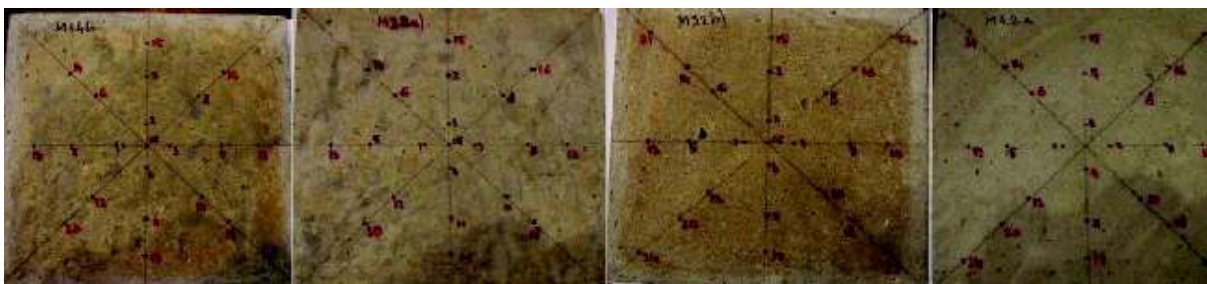


Fig. 6.4. Epruvete ECC tip placă cu dimensiunile 200×200×13 mm pentru încercarea la impact (șoc), după nivelare

Înainte de efectuarea testelor de impact, fața superioară a epruvetelor este prelucrată prin nivelare cu disc diamantat, pentru eliminarea rugozităților și denivelărilor inerente din faza de turnare/decofrare, care ar putea avea influențe asupra acurateții testului (Figura 6.4). Grosimea plăcilor după prelucrare este $t_f = 13 \pm 0.7$ mm.

Procedura de încercare (DWT) are la bază următoarele reglementări tehnice:

- EN ISO 10545-5: Plăci și dale ceramice. Partea 5: Determinarea rezistenței la impact prin măsurarea coeficientului de restituire [90];
- NBN B 27-005: Produse ceramice; Determinarea rezistenței la impact [91];
- ACI Committee 544. (1989), Measurement of properties of fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal 583-593 [92].

Procedura de încercare la șoc a plăcilor ECC utilizând principiul căderii gravitaționale (DWT) a fost adaptată considerând metodele anterior menționate și este descrisă mai jos. Standul de încercare la impact/șoc (DWT) este prezentat în Figura 6.5.

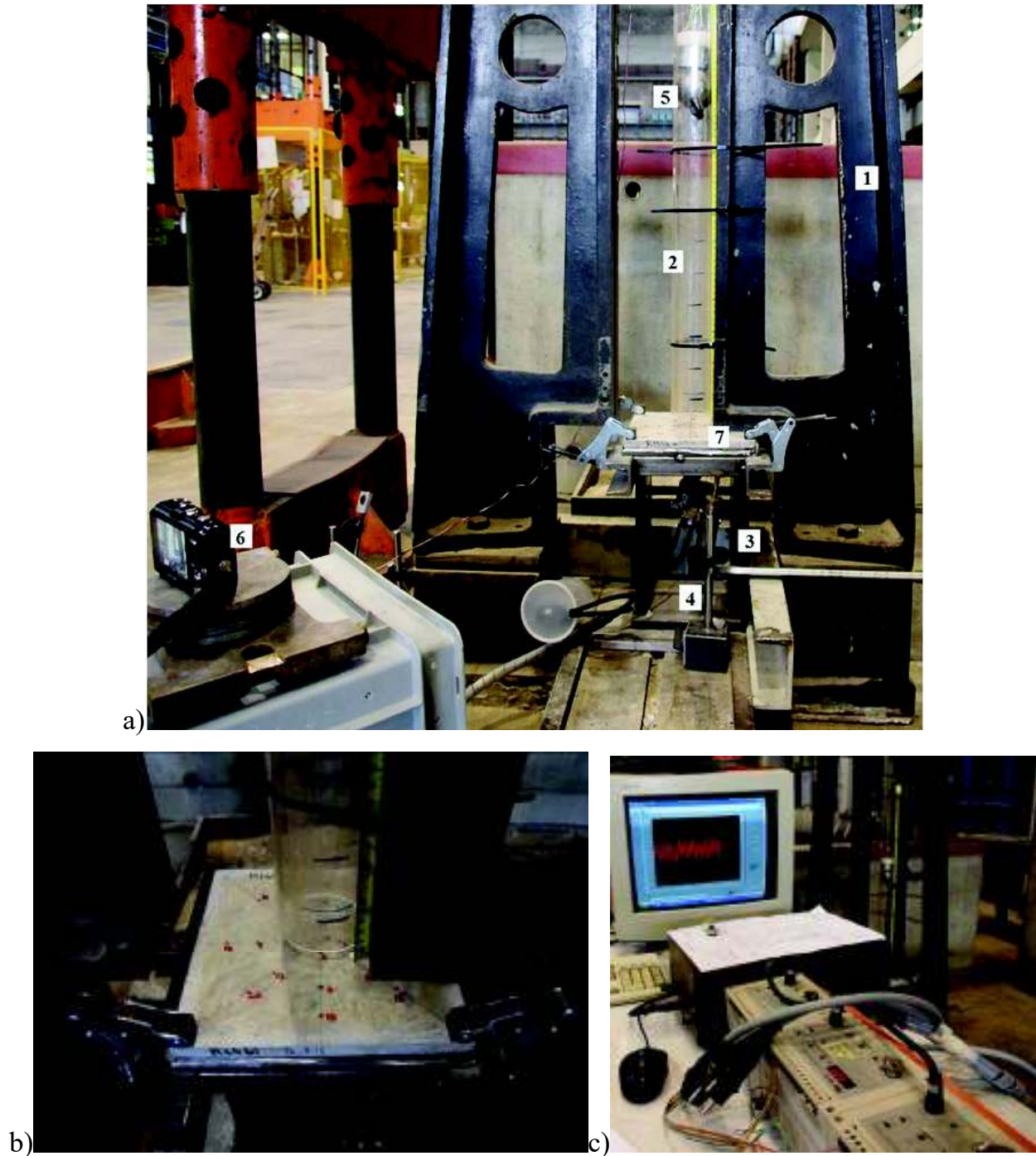


Fig. 6.5. Stand pentru încercarea la impact (șoc): a) imagine de ansamblu; b) detaliu rezemare probă ; c) dispozitiv captare date privind evoluția săgeții sub sarcină

Legendă:

- 1 – Cadru metalic rigid;
- 2 – Dispozitiv de ghidaj al bilei metalice (corpul de impact): tub de PVC transparent;
- 3 – Cadru metalic rigid pentru rezemarea epruvetei supuse la șoc;
- 4 – Dispozitiv laser pentru înregistrarea evoluției săgeții pe parcursul interacțiunii dintre corpul de impact și epruveta ECC;
- 5 – Corpul de impact, bilă de oțel cu diametrul $\Phi = 63.0$ mm și masa $M = 1000$ g;
- 6 – Aparat foto/video cu opțiunea HSC (High Speed Camera);
- 7- Epruvetă ECC amplasată în standul de încercare.

Echipamentul de testare a plăcilor ECC la șoc constă dintr-un cadru metalic rigid (1) care permite fixarea tubului din PVC transparent (2), cu rol de ghidaj al corpului de impact (5), care constă într-o bilă metalică cu diametrul $\Phi = 63.0$ mm și masa de 1000 g. Corpul de impact este lansat succesiv de la înălțimi prestabilite, marcate pe tubul de ghidaj, lovind epruveta ECC de tip placă (7), rezemată perimetral pe contur, pe șina metalică perimetrală cu lățimea de 10 mm. Pentru fixare și evitarea unui recul neconcludent, care implică nu doar corpul de impact ci și epruveta, aceasta este fixată cu câte patru clame la fiecare colț (Figura 6.3, b). Fiecare lovitură de impact este înregistrată cu ajutorul unei camere (6) cu opțiunea HSC (High Speed Camera), respectiv 240 cadre pe secundă, ce permite surprinderea înălțimii de recul al corpului de impact, ca urmare al șocului produs. În același timp variația săgeții pe durata șocului și imediat post lovire este înregistrat cu un dispozitiv laser amplasat la mijlocul epruvetei și conectat la o stație PC; Frecvența înregistrărilor laser este de 500 Hz, suficientă pentru surprinderea vârfului de deplasare în epruvetă (săgeata instantanee) și revenirea spre starea inițială (reveniri elastice). Înregistrările privind săgeata remanentă se fac utilizând același dispozitiv laser, la timpi prestabiliți, aproximativ 1 minut după finalizarea loviturii și re poziționarea epruvetei în condițiile inițiale: rezemare perimetrală și prindere cu clame în cele patru colțuri.

Evaluarea evoluției fisurile este înregistrată vizual, cu ajutorul lupei și riglei de fisuri (Figura 6.6) cât și microscopic (aleatoriu), pentru un grad de precizie sporit și confirmare a evaluării vizuale. În acest sens fost utilizat, la fel ca și în cazul analizei epruvetelor ECC la încercarea 4PB, un microscop optic Leica S8 APO, dotat cu o cameră de tip DFC 295, iar softul de analiză a fisurilor care a fost utilizat este Image J.

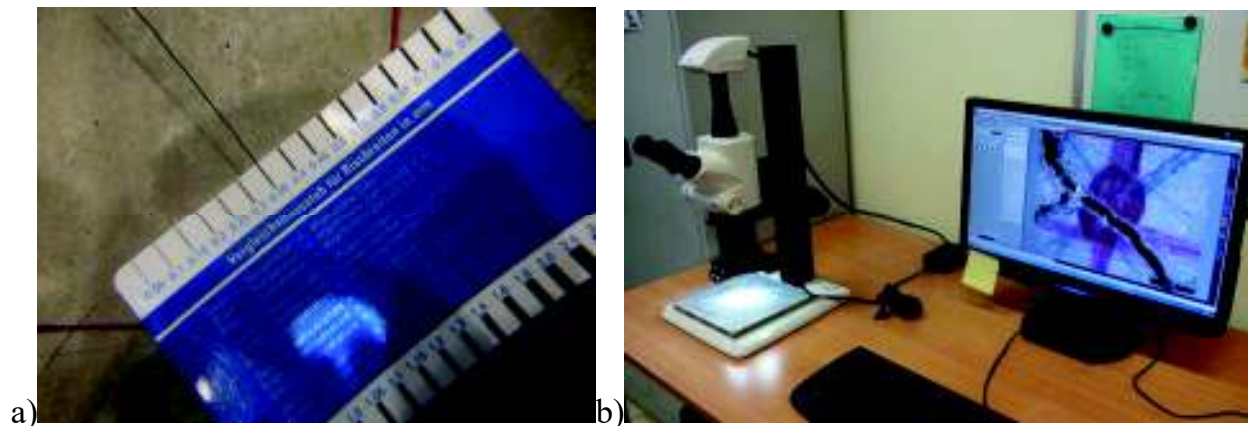


Fig. 6.6. Evaluare evoluție microfisuri: a) riglă de fisuri amplasată sub lupă de citit fisuri; b) evaluarea microscopică a fisurilor indusă în plăcile ECC prin încercarea de impact: microscop Leica, camera captare imagini și PC pentru înregistrare/prelucrare date

Principiul încercării experimentale constă în aplicarea consecutivă a unui număr de șocuri prin eliberarea corpului de impact și căderea lui liberă, sub efect gravitațional, asupra epruvetei amplasate în stand. Vârsta probelor la data încercării este de 60 zile.

Ciclurile de lovituri (șocuri) prezintă următoarea succesiune:

- I - 5×0.5 m (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 0.5 m);
- II - 5×1.0 m (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 1.0 m);
- III - 5×1.5 m (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 1.5 m).

Ruperea (cedarea) se considerată că are loc în momentul când se înregistrează degradări semnificative în probă: deschiderea fisurilor peste valoarea de 2.5–3.0 mm, deformația (săgeată) excesivă coroborată cu un nivel ridicat de alterare a integrității probei sub formă de spărturi, ciobiri, ruperi sau chiar dezintegrare.

Probele care prezintă degradare moderată după efectuarea ciclului III de solicitare (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 1.5 m) sunt supuse unor șocuri suplimentare, aplicate prin căderea corpului de impact de la înălțimea de 2.0 m. Starea probelor este consemnată prin examinări vizuale.

Datele primare înregistrate în cursul încercării sunt:

- **evaluarea modalității de fisurare/microfisurare:** număr fisuri/microfisuri/ ramificații, deschidere, evoluția lor pe parcursul succesiunii șocurilor;
- **valoarea săgeții la mijlocul deschiderii, în timp real:** măsurătorile sunt efectuate cu o frecvență de 500 Hz printr-un dispozitiv laser și transmise unei stații PC pentru înregistrarea acestora, individual pentru fiecare șoc aplicat epruvetei;

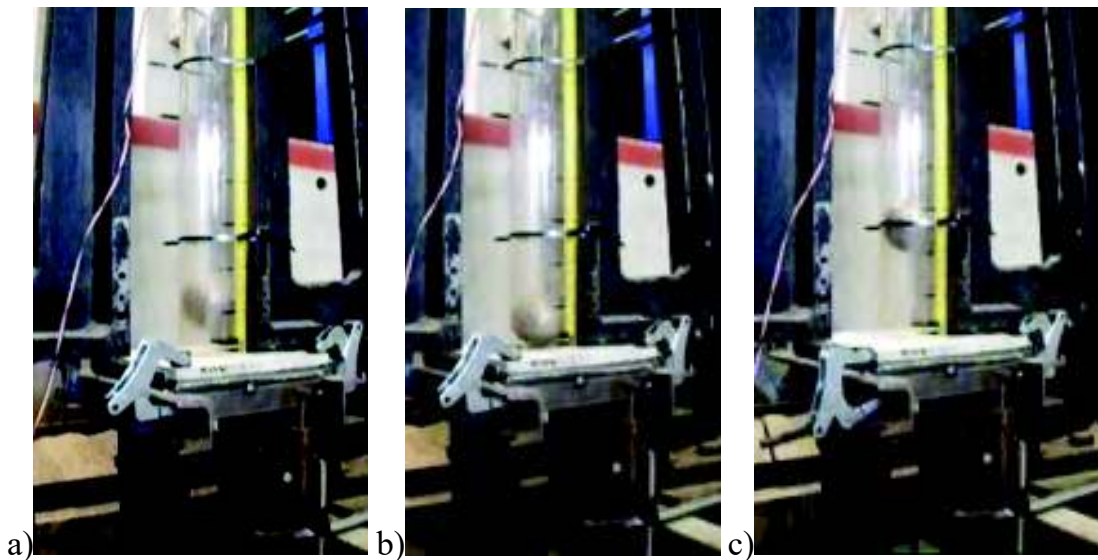


Fig. 6.7. Monitorizarea epruvetei ECC sub impact cu ajutorul aparatului HSC: a) moment prior impactului, când masa de impact coboară spre epruveta amplasată în stand; b) momentul contactului între cele două corpuri; c) corpul de impact este respins de către epruveta ECC și atinge înălțimea maximă de recul.

- **evoluția săgeții la mijlocul deschiderii:** măsurătorile sunt efectuate cu ajutorul dispozitivului laser, prin citiri inițiale și finale, prior și post impact; citirea finală în cazul unei lovituri (i), C_i^k va reprezenta citirea inițială pentru următorul șoc (i+1) și având citirea finală C_{i+1}^k , unde: k - ciclul de încărcare, caracterizat de înălțimea de

lansare a corpului de impact, $k = I, II, III$ și i - numărul loviturii corpului de impact, din cursul unui ciclu de încărcare, $i = 1 \pm 5$;

- **înălțimea de recul a corpului de impact:** fiecare lovitură a corpului de impact este înregistrat cu ajutorului unui dispozitiv HSC, cu 240 cadre /sec, suficient de precis pentru a surprinde înălțimea maximă atinsă de bila metalică după desprinderea de corpul epruvetei, după impact (vezi Figura 6.7);
- **examinarea vizuală privind nivelul de degradare atins în epruvetă:** fisuri, crăpături, ciobiri și alte elemente similare, înregistrate calitativ și cantitativ după fiecare șoc aplicat epruvetei testate și documentate prin arhiva foto.

6.3.2 Evaluarea capacității de auto-vindecare (SH)

Capacitatea de auto-vindecare (SH) a compozitelor ECC supuse încercării la șoc/impact DWT 4PB s-a evalua din următoarele perspective:

- evoluției deschiderii fisurilor, autosigilării (self-sealing) – SS;
- recuperării caracteristicilor fizico-mecanice în raport cu performanțele compozitelor în stare virgină, respectiv autoreparării (self-repairing) – SR.

În acest sens epruvetele placă cu dimensiunile 200×200×13 mm s-au repartizat în două categorii distincte:

- **epruvete rupte (R):** epruvete supuse succesiunii de cicluri de șocuri (lovituri) precizate mai sus, până când este consemnată ruperea;
- **epruvete de auto-vindecare (SH):** epruvete supuse unui număr prestabilit de lovituri, (Ciclul I*), pentru inducerea unei stări de fisurare; ciclul I* de încercare este efectuat la vârsta de 60 zile, similar vârstei de încercare până la rupere a probelor R; ulterior acestei etape este efectuată analiza vizuală a probei privind numărul de fisuri, conformația și deschiderea lor, pentru consemnarea stării de degradare induse, iar apoi probele sunt expuse unui număr de 28 cicluri de condiționare pentru inducerea mecanismelor de auto-vindecare (SH); analiza vizuală și microscopică ulterioară

consemnează eficiența procesului de autosigilare (SS) asupra fisurilor inițiale, iar apoi probele sunt retestate prin aplicare succesiunii de lovituri (șocuri) până la înregistrarea ruperii, conform criteriilor similare epruvetelor R; efectuarea succesiunii ciclurilor de rupere, post vindecare, este efectuată la vârsta de 270 zile; conservarea probelor după expunerea la ciclurile de auto-vindecare (SH) se face în incinta cu condiții de temperatură și umiditate relativă controlate: $T 21 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{RH } 60 \pm 5 \%$ (vezi capitolul 4).

Ciclul I* de lovituri (șocuri) pentru probele SH cuprinde:

- I* - 5×0.5 m (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 0.5 m).

Ulterior expunerii probelor SH condiționării SH, similar condiționării efectuate pentru epruvetele prismatice 4PB, respectiv 28 cicluri apă – aer (vezi capitolul 5), probele SH sunt retestate în condiții similare probelor R. Retestarea pentru probele SH cuprinde:

- I - 5×0.5 m (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 0.5 m);
- II - $5 \times 1,0$ m (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 1.0 m);
- III. 5×1.5 m (5 șocuri cu căderea corpului de impact de la înălțimea de 1.5 m).

Datele primare și parametrii investigați în cazul epruvetelor SH sunt similare epruvetelor R, iar comparații relevante sunt realizate:

- în cadrul epruvetelor SH, între performanțele obținute în ciclul de preîncărcare (ciclul I*) și ciclul similar, I efectuat în cursul succesiunii secundare de retestare;
- între epruvetele R, testate la rupere la vârsta de 60 zile și epruvetele SH, cu ciclurile aferente, considerând atât suprapunerea celor două cicluri (săgeata totală) cât și evaluarea lor paralelă (săgeata absolută);
- între diferitele tipuri de compoziții evaluate, pentru identificarea compoziției cu comportament optim sub încărcarea la șoc, respectiv echilibru între rezistență și elasticitate.

Compozițiile evaluate în cadrul încercării experimentale la impact și evaluarea capacității de auto-vindecare (SH) în urma ciclului inițial sunt următoarele (vezi capitolul 4):

- compoziția consacrată M 1.4, caracterizată de raportul FA/C = 1.0 și 2% (din volum fibre PVA I);
- compoziția principală M 2.2, caracterizată de raportul FA/C = 1.2 și 2% (din volum fibre PVA I);
- compoziția principală M 3.2, caracterizată de raportul FA/C = 1.5 și 2% (din volum fibre PVA I);
- compoziția principală M 4.2, caracterizată de raportul FA/C = 2.4 și 2% (din volum fibre PVA I).

Epruvetele realizate din compozițiile martor (Figura 6.8), aferente fiecărui grup, respectiv M 1.1, M 2.1, M 3.1 și M 4.1 au prezentat rupere prin dezintegrare în 4-5 bucăți distincte, la primul șoc, prin lansarea masei de impact de la înălțimea de 0.5 m. Același rezultat a fost obținut pe epruvetele realizate dintr-un mortar realizat fără fibre sau alte adaosuri, cu granula maximă $\Phi_{\max} = 4$ mm, raport A/C = 0.45 și dozajul de ciment de 400 kg/m³.



Fig. 6.8. Probe martor (fără fibre) supuse încercării la șoc. cedare casantă după efectuarea primului șoc ($h = 0.5$ m): a) compoziția martor M 1.1; b) mortar martor

6.3.3 Indicatori/parametrii de evaluare a autovindecării (SH)

Performanța compozitelor ECC supuse la încercare se realizează prin evaluarea și analiza comparativă a următorilor indicatori/parametrii:

- *coeficientul de restituire cr*, definit ca și raportul între impulsul masei corpului de impact, premergător contactului și impulsul imediat după desprinderea de epruvetă,

calculat prin relația (6.13);

- *săgeata relativă incrementală* δw_i^k , definită ca și deplasare survenită ca urmare a fiecărei lovituri a corpului de impact asupra epruvetei; este determinată ca diferența dintre citirea finală înregistrată cu dispozitivul laser (C_i), după lovitura corpului de impact, înlăturarea acestuia de pe epruvetă și re poziționare acesteia în condiții de rezemare inițială (rezemare perimetrală pe contur și amplasare clame în cele patru colțuri) și citirea inițială (C_{i-1}), înregistrată înainte de lansarea bilei metalice și reprezentând citirea finală aferentă șocului anterior:

$$\delta w_i^k = C_i^k - C_{i-1}^k \quad (6.14)$$

- *revenirea elastică* Δw^k , definită ca reducere a deplasării cumulate după efectuarea fiecărui ciclu de încărcare a câte 5 șocuri, ca efect al relaxării epruvetei timp de 60 minute, moment când este efectuată citirea corespunzătoare ($C_i^{k,60}$):

$$\Delta w^k = C_5^{k,60} - C_1^k \quad (6.15)$$

- *săgeata totală R* w_R^k , definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele R pe măsura efectuării tuturor ciclurilor de șocuri, până în momentul consemnării ruperii:

$$w_R^k = \sum_{k=I}^{III} \sum_{i=1}^5 \delta w_i^k \quad (6.16)$$

- *săgeata remanentă totală R* $w_{R,pl}^k$, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în epruvetele R, pe măsura efectuării tuturor ciclurilor de șocuri până în momentul consemnării ruperii, împreună cu relaxarea elastică, aferentă de asemenea fiecărui ciclu de șocuri:

$$w_{R,pl}^k = \sum_{k=I}^{III} \sum_{i=1}^5 (\delta w_i^k - \Delta w_i^k) \quad (6.17)$$

- *săgeata totală I** $w_{I^*}^k$, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH, pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclului inițial I*:

$$w_{I^*}^k = \sum_{i=1}^5 \delta w_i^{I^*} \quad (6.18)$$

- *săgeata remanentă I** $w_{I^*,pl}^k$, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclului inițial I*, împreună cu relaxarea elastică aferentă ciclului I*:

$$w_{I^*,pl}^k = \sum_{i=1}^5 (\delta w_i^{I^*} - \Delta w_i^{I^*}) \quad (6.19)$$

- *săgeata totală SH* w_{SH}^k , definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH în cadrul efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare, I, II și III, după condiționarea SH, mm:

$$w_{SH}^k = \sum_{k=I}^{III} \sum_{i=1}^5 \delta w_i^k \quad (6.20)$$

- *săgeata remanentă SH* $w_{SH,pl}^k$, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare, I, II și III, după condiționarea SH, împreună cu relaxarea elastică, aferentă de asemenea fiecărui ciclu de șocuri:

$$w_{SH,pl}^k = \sum_{k=I}^{III} \sum_{i=1}^5 (\delta w_i^k - \Delta w_i^k) \quad (6.21)$$

- *săgeata absolută SH* $w_{SH}^{k,abs}$, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH în cadrul efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare, după condiționarea SH, cumulate deplasării inițiale, rezultată în urma ciclului inițial de încărcare I*:

$$w_{SH}^{k,abs} = w_{SH}^k + w_{I^*}^k \quad (6.22)$$

- *săgeata remanentă absolută SH* $w_{SH}^{k,pl}$, definită ca și deplasarea cumulată progresiv în probele SH pe măsura efectuării șocurilor aferente ciclurilor de reîncărcare, I, II și III, după condiționarea SH, împreună cu relaxarea elastică, aferentă de asemenea fiecărui ciclu de șocuri, cumulate deplasării inițiale și relaxării aferente, rezultate în urma

ciclului inițial de încărcare I*:

$$w_{SH}^{k,pl} = w_{SH,pl}^k + w_{I^*,pl}^k \quad (6.23)$$

- *săgeata instantanee incrementală* $\delta w_{i,inst}^k$, definită ca și maximul deplasării atinse în epruvetă în cursul fiecărui șoc aplicat acesteia prin căderea masei de impact; valoarea săgeții instantanee este surprinsă în timp real, cu ajutorul înregistrărilor dispozitivului laser, realizate cu frecvența de 500 Hz (Figura 6.9);
- *săgeata remanentă instantanee* $\delta w_{i,inst}^{k,pl}$, definită ca și deplasarea atinsă în epruvete (R și SH) în cursul fiecărui șoc aplicat prin căderea masei de impact, după aproximativ 10 s de la înregistrarea valorii maxime a deplasării (săgeții instantanee), când epruvetele se relaxează cu rapiditate, odată cu desprinderea bilei metalice prin reculul generat; valoarea săgeții remanente instantanee este surprinsă în timp real, cu ajutorul înregistrărilor dispozitivului laser, realizate cu frecvența de 500 Hz (Figura 6.9);

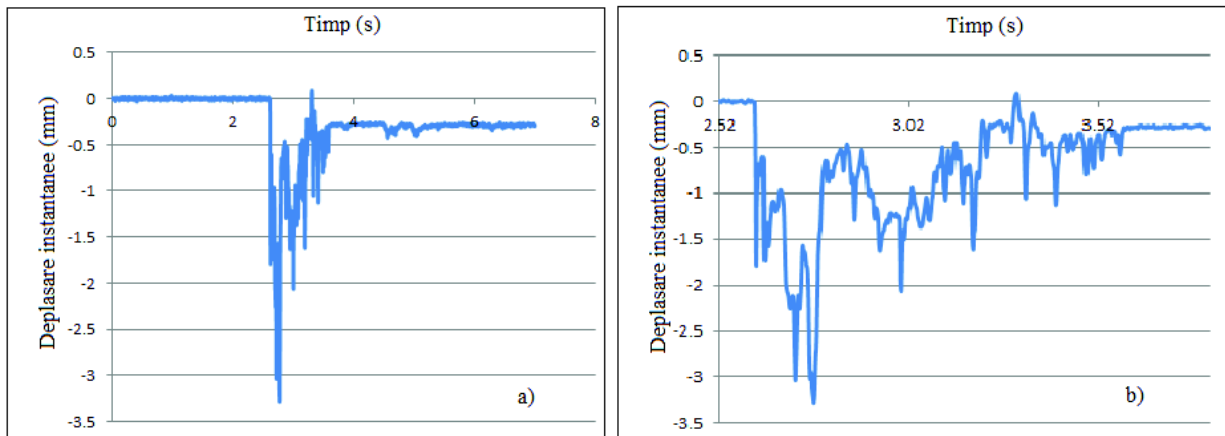


Fig. 6.9. Curba timp - deplasare pentru evoluția săgeții instantanee (vârf și relaxare) în timp real, cf. înregistrărilor dispozitivului laser: a) grafic aferent intervalului 0 – 8s; b) identificarea intervalului aferent vârfului de deplasare, surprins în intervalul 2.52 – 3.52 s.

- *revenirea instantanee elastică ire (%)*, definită ca și reducere a deplasării instantanee și determinată ca și diferență între maximul deplasării (δw_{inst}) și deplasarea instantanee remanentă (Δw_{inst}), diferență raportată la valoarea săgeții instantanee; este

determinată pentru fiecare șoc / lovitură, atât pentru probele R cât și pentru probele SH, ca parametru de evaluare a elasticității și respectiv menținere a elasticității sub încărcări dinamice repetate:

$$ire = \frac{\delta w_{inst} - \Delta w_{inst}}{\delta w_{inst}} \times 100 \quad (6.24)$$

6.4 Capacitatea de autoreparare (SR)

Performanțele compozitelor ECC supuse la încercarea la impact sunt prezentate după cum urmează, considerând evoluția parametrilor relevanți pentru autoreparare sub succesiunea ciclurilor de șocuri: înălțimea de recul și implicit coeficientul de restituire, deformațiile și revenirile elastice, săgeată remanentă, etc.

6.4.1 Compoziția ECC M 1.4

Evoluția parametrică a compoziției consacrate M 1. este prezentată atât în Tabele 6.1 și 6.2 cât și în Figurile 6.10-6.19, ce cuprind imagini și diagrame reprezentative, comparative între proba testată până la rupere la 28 zile (M 1.4 R) și proba solicitată sub ciclul inițial I*, la vârsta de 28 zile, expusă condiționării SH și retestată sub ciclurile I, II, și III, la vârsta de 270 zile (M 1.4 SH).

Tab. 6.1. Compoziția consacrată ECC M 1.4 R: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I (h ₁ = 0.5 m)	1	0.06	0.35	0.44	0.50	1.03	0.31	0.72	1.791	0.429	76.1	1	<0.05
	2	0.09	0.42		0.25				0.755	0.117	84.6	2	<0.05
	3	0.11	0.46		0.05				0.626	0.120	80.8	7	<0.1
	4	0.12	0.48		0.11				0.780	0.032	95.8	9	<0.1
	5	0.12	0.48		0.12				1.051	0.066	93.7	10	0.26
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.18	0.42	0.43	0.72	2.19	0.25	1.94	2.137	0.455	78.7	>10	
	2	0.19	0.44		0.16				2.366	0.238	89.9		
	3	0.18	0.42		0.19				5.769	0.350	93.9		
	4	0.18	0.42		0.21				3.225	0.297	90.8		
	5	0.2	0.45		0.19				3.723	0.294	92.1	>15	0.46
k=III (h ₁ = 1.5 m)	1	0.27	0.42	0.43	0.59	5.11	0.98	4.13	5.523	0.793	85.6		
	2	0.27	0.42		0.55				9.341	0.814	91.3		
	3	0.27	0.42		0.40				5.114	0.830	83.8		
	4	0.27	0.42		0.76				4.699	1.158	75.4		
	5	0.28	0.43		0.87				4.693	1.054	77.5	15-20	1.8

Tab. 6.2. Compoziția consacrată ECC M 1.4 SH: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I* (h ₁ = 0.5 m)	1	0.06	0.35	0.46	0.50	1.08	0.34	0.74	0.772	0.527	31.7		
	2	0.10	0.45		0.24				1.191	0.115	90.3		
	3	0.10	0.45		0.04				0.904	0.025	97.3		
	4	0.14	0.52		0.12				1.473	0.093	93.7		
	5	0.14	0.53		0.18				1.051	0.114	89.2	9	0.14
Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _{SH} ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{SH,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I (h ₁ = 0.5 m)	1	0.09	0.42	0.51	0.14	0.52	0.16	0.36	1.206	0.124	89.7		
	2	0.14	0.53		0.12				1.260	0.122	90.3		
	3	0.14	0.53		0.05				0.917	0.075	91.9		
	4	0.14	0.53		0.15	1.26	1.10	1.356	0.125	90.8			
	5	0.14	0.53		0.06	2.143	0.053	97.5	15	<0.42			
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.19	0.44	0.46	0.49	1.91	0.23	1.68	3.498	0.490	86.0		
	2	0.21	0.46		0.35				5.159	0.354	93.1		
	3	0.21	0.46		0.31				2.386	0.366	84.7		
	4	0.23	0.48		0.23	2.65	2.42	2.322	0.318	86.3			
	5	0.23	0.48		0.17	1.844	0.231	87.5	>25	0.8			
k=III (h ₁ = 1.5 m)	1	0.28	0.43	0.45	0.69	3.29	0.05	3.24	2.819	0.425	84.9		
	2	0.29	0.44		0.40				5.486	0.259	95.3		
	3	0.31	0.45		0.13				4.751	0.000	100.0		
	4	0.31	0.45		0.24	4.03	3.98	4.555	0.090	98.0			
	5	0.31	0.45		0.15	5.794	0.170	97.1	>25	1.5			

Analiza datelor din Tabelele 6.1 și 6.2 dovedește capacitatea de Autoreparare (SR) a compoziției M 1.4, până la retestarea probei sub ciclul III de încărcare (valori Coeficient de restituire și deplasări). Această abilitate se menține și pentru compozițiile analizate în continuare, dar la care ciclul III de retestare duce la o scădere a Coeficientului de restituire (vezi Tabele 6.3 – 6.8).

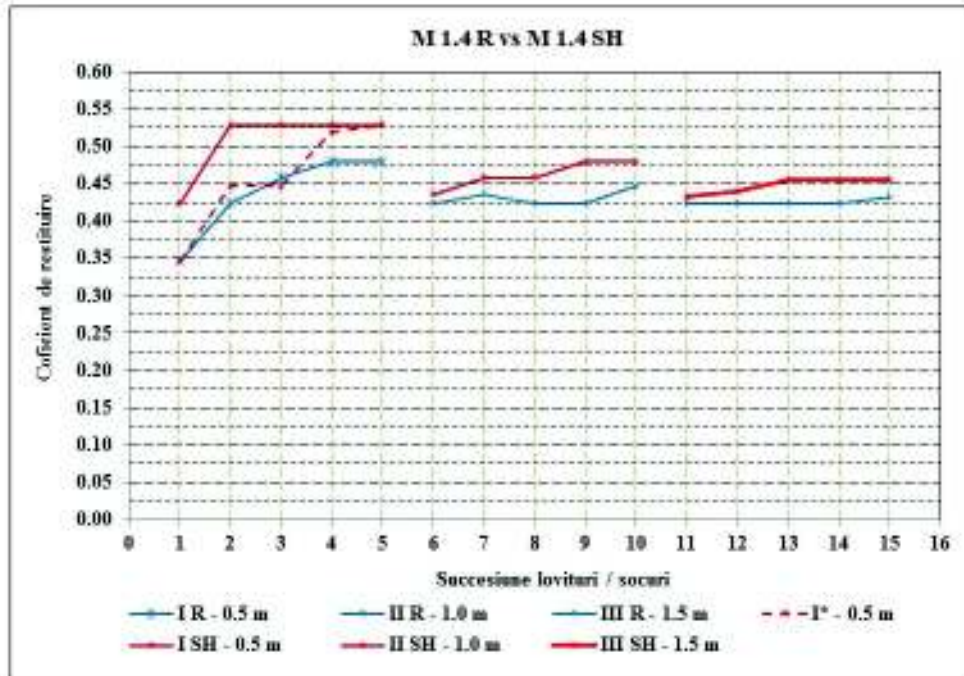


Fig. 6.10. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH

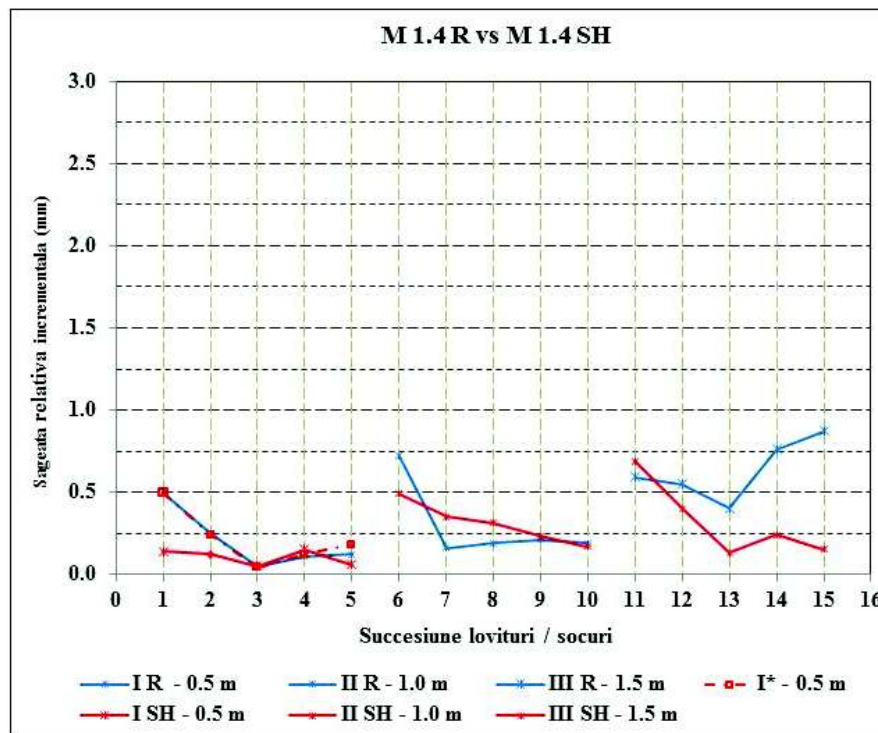


Fig. 6.11. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH

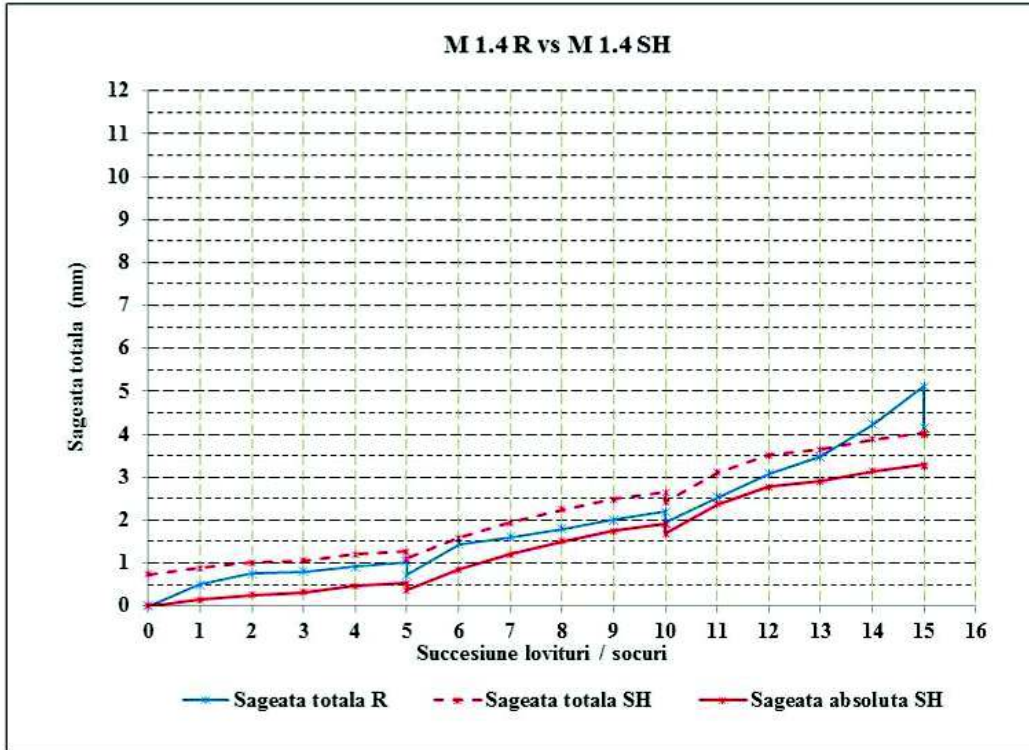


Fig. 6.12. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH

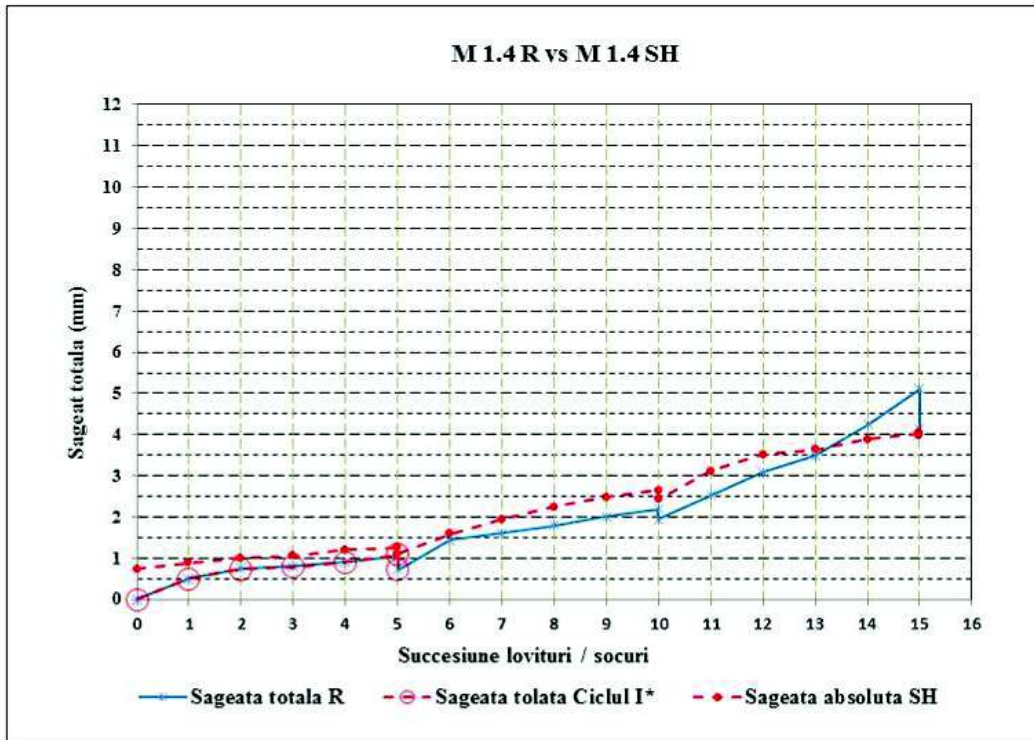


Fig. 6.13. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH

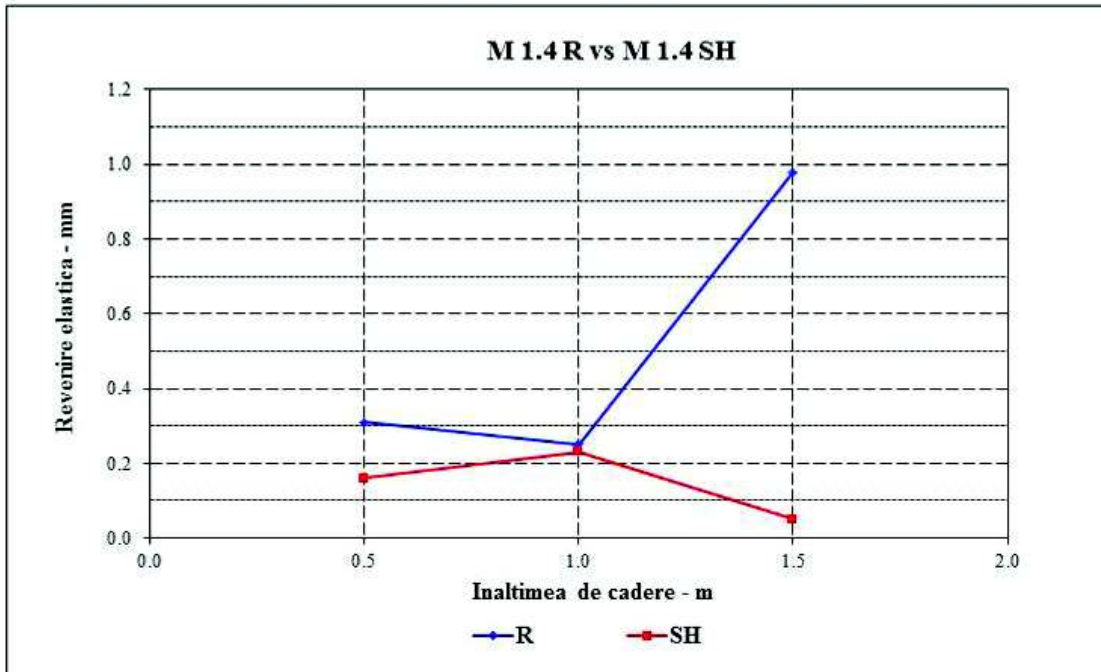


Fig. 6.14. Capacitatea de revenire elastică, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH

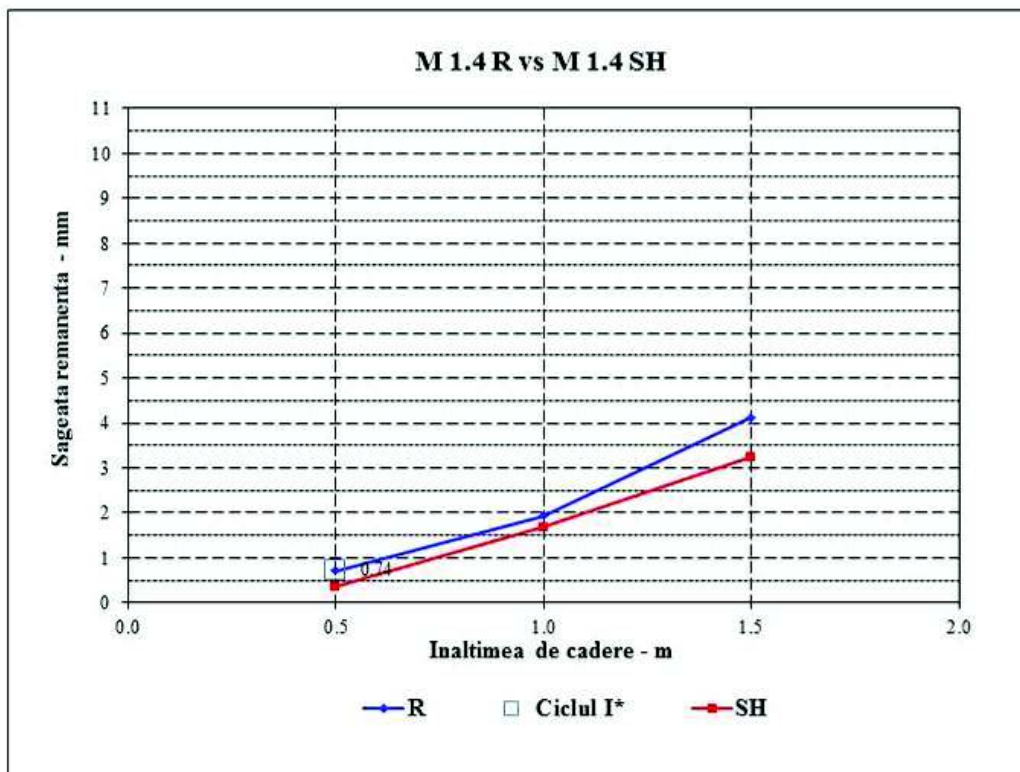


Fig. 6.15. Evoluția săgeții remanente, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH (Ciclul I* și ciclurile SH)

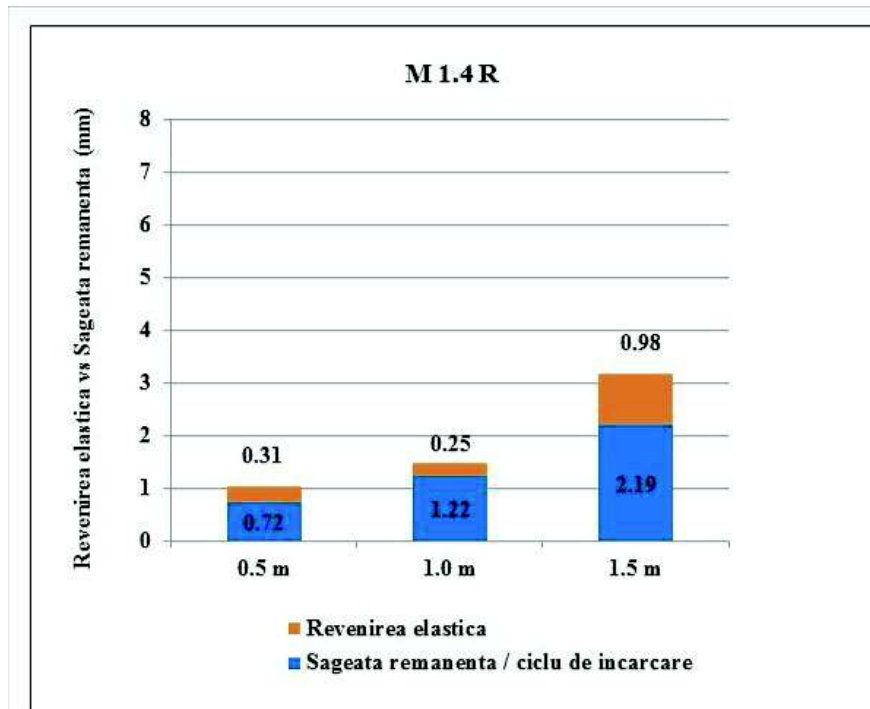


Fig. 6.16. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 1.4 R

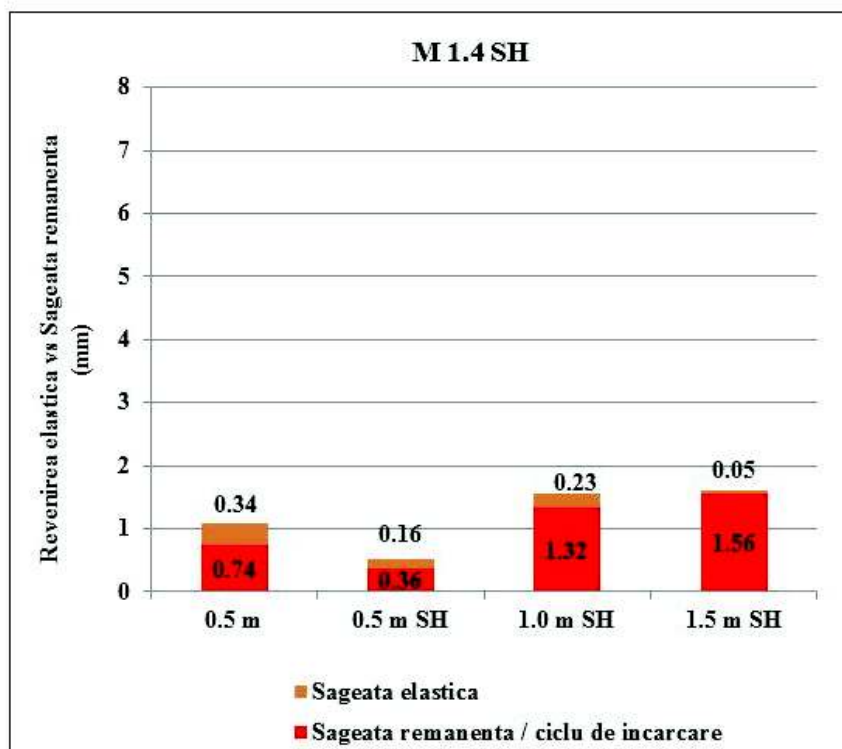


Fig. 6.17. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 1.4 SH

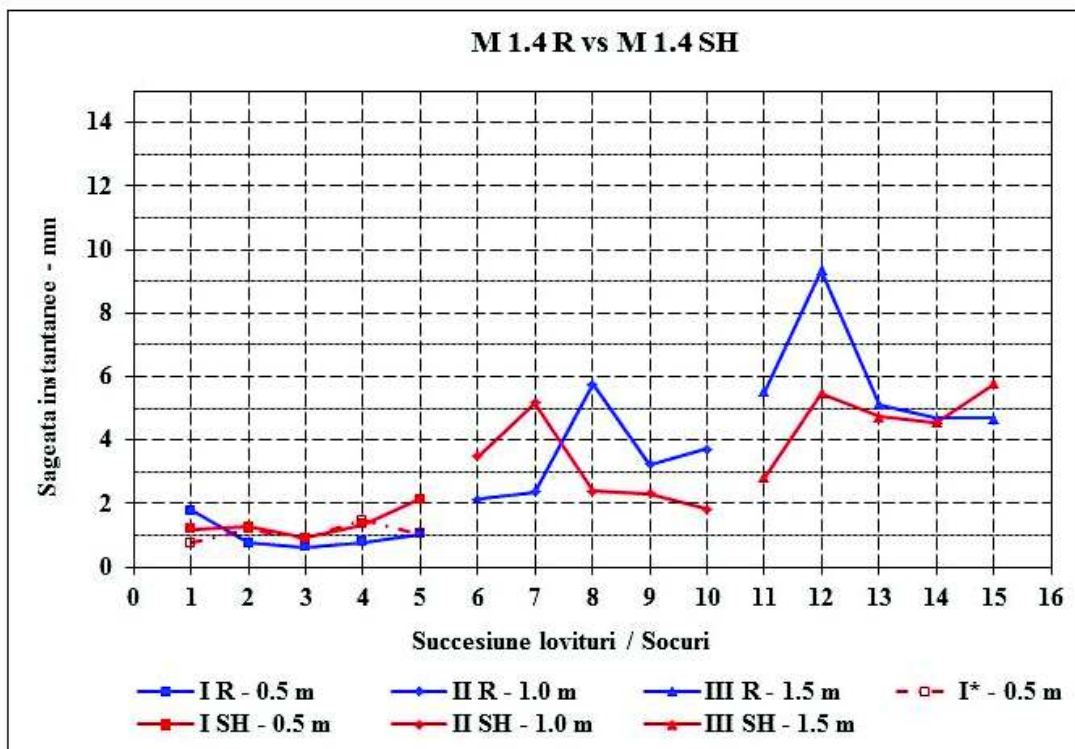


Fig. 6.18. Evoluția comparativă a săgeții instantanee, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH

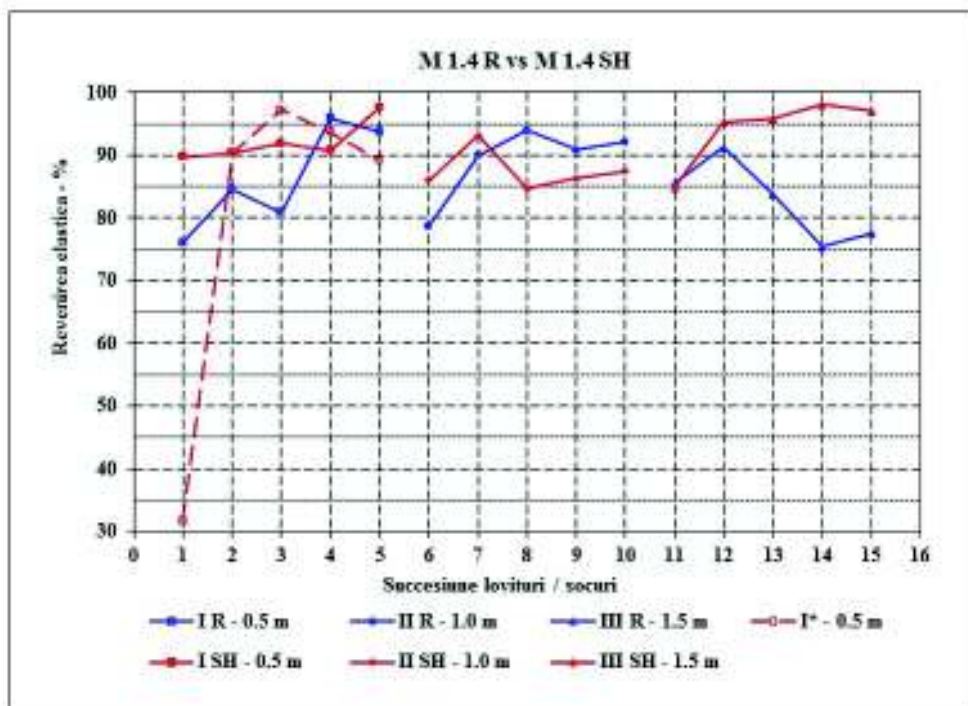


Fig. 6.19. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 1.4 R vs. M 1.4 SH

6.4.2 Compoziția ECC M 2.2

Evoluția parametrică a compoziției ECC M 2.2 (caracterizată de raportul FA/C = 1.2) pe parcursul testului de impact DWT este prezentată în Tabele 6.3 (proba M 2.2 R) și 6.4 (proba M 2.2 SH), respectiv în Figurile 6.20-6.29, ce cuprind diagrame reprezentative comparative între proba testată până la rupere la 28 zile (M 2.2 R) și proba solicitată sub ciclul inițial I*, la vârsta de 28 zile, expusă condiționării SH și retestată sub ciclurile I, II, și III, la vârsta de 270 zile (M 2.2 SH).

Tab. 6.3. Compoziția consacrată ECC M 2.2 R: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I (h ₁ = 0.5 m)	1	0.06	0.35	0.44	0.56	1.11	0.55	0.56	0.884	0.475	46.3		
	2	0.10	0.45		0.12				1.236	0.085	93.1		
	3	0.11	0.47		0.05				0.575	0.043	92.5		
	4	0.12	0.49		0.15				0.995	0.125	87.4		
	5	0.11	0.47		0.23				1.025	0.136	86.8	>15	0.38
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.17	0.41	0.45	0.75	2.08	0.28	1.80	2.728	0.799	70.7		
	2	0.18	0.42		0.24				3.323	0.341	89.7		
	3	0.22	0.47		0.3				5.040	0.167	96.7		
	4	0.21	0.46		0.15				3.390	0.185	94.5		
	5	0.23	0.48		0.08				3.438	0.186	94.6	>25	0.88
k=III (h ₁ = 1.5 m)	1	0.26	0.42	0.45	0.68	3.45	0.42	3.03	7.438	0.487	93.5		
	2	0.28	0.43		0.56				6.786	0.551	91.9		
	3	0.31	0.45		0.31				4.604	0.408	91.1		
	4	0.34	0.48		0.02				4.356	0.356	91.8		
	5	0.34	0.48		0.08				3.789	0.288	92.4	>30	1.4

Tab. 6.4. Compoziția consacrată ECC M 2.2 SH: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I* (h ₁ = 0.5 m)	1	0.07	0.37	0.45	0.37	1.02	0.27	0.75	0.845	0.293	65.3		
	2	0.09	0.42		0.29				2.783	0.140	95.0		
	3	0.1	0.45		0.14				2.510	0.076	97.0		
	4	0.12	0.49		0.09				2.342	0.045	98.1		
	5	0.13	0.51		0.13				3.149	0.041	98.7	9-10	0.36

Tab. 6.4. Continuare

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri				
		h ₂ (m)	cr	cr (med)	δw _i ^k (mm)	W _{SH} ^k (mm)	Δw ^k (mm))	W _{SH,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	W _{max} (mm)			
						W _{SH} ^{k,abs} (mm)		W _{SH} ^{k,pl} (mm)								
k=I (h ₁ = 0.5 m)	1	0.09	0.42	0.47	0.27	1.13	0.18	0.95	2.456	0.236	90.4					
	2	0.09	0.42		0.26				3.296	0.296	91.0					
	3	0.11	0.47		0.24				3.510	0.269	92.3					
	4	0.13	0.51		0.23				3.342	0.245	92.7					
	5	0.14	0.53		0.13				1.88	1.70	2.926	0.241	91.7	>12	0.53	
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.13	0.36	0.41	0.4	2.94	0.49	2.45	3.376	0.456	86.5					
	2	0.16	0.39		0.41				2.787	0.565	79.7					
	3	0.19	0.44		0.39				5.836	0.594	89.8					
	4	0.20	0.44		0.37				3.69	3.20	5.821	0.610	89.5			
	5	0.19	0.44		0.42				3.69	3.20	5.930	0.750	86.5	>20	0.90	
k=III (h ₁ = 1.5 m)	1	0.19	0.36	0.28	1.33	6.67	0.16	6.51	14.221	1.198	91.6					
	2	0.12	0.28		1.89				9.255	2.170	76.6					
	3	0.06	0.20		1.00				7.42	7.26	12.120	2.016	83.4	>25	1.9	
	4	-	-		-				-	-	-	-	-	-		
	5	-	-		-				-	-	-	-	-	-		

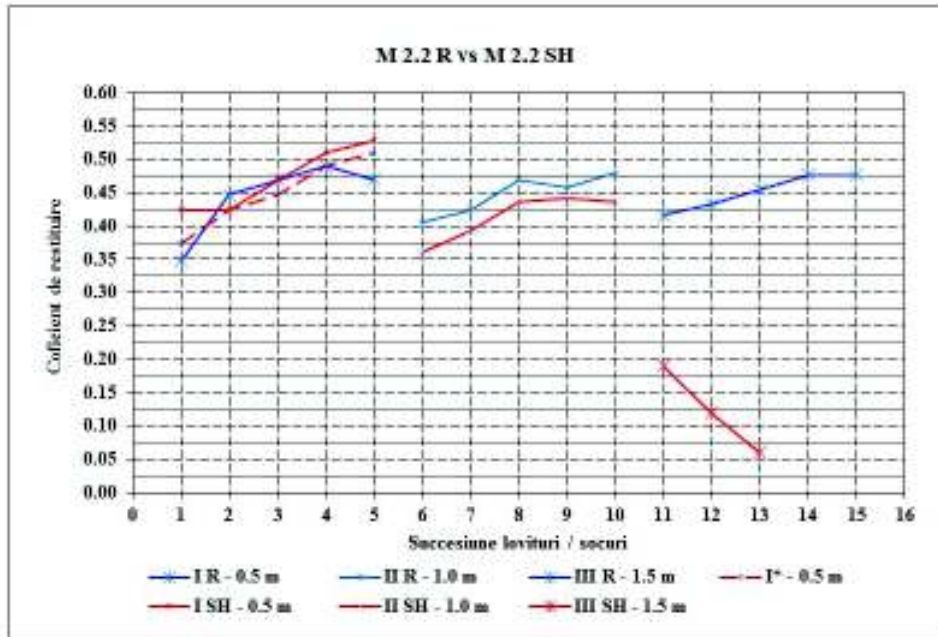


Fig. 6.20. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH

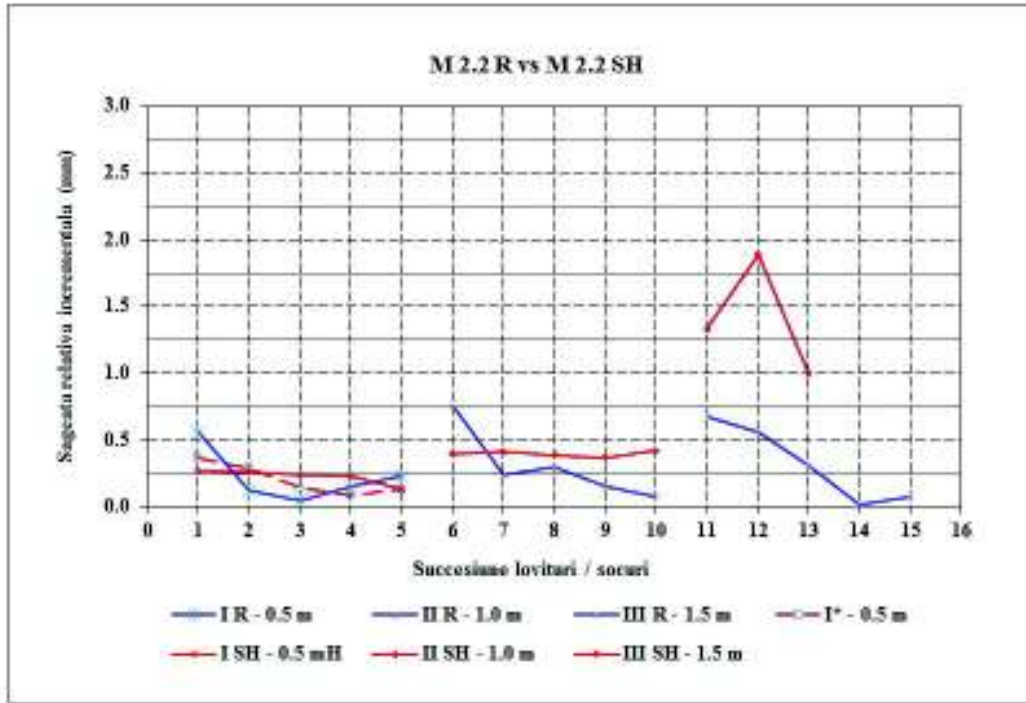


Fig. 6.21. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH

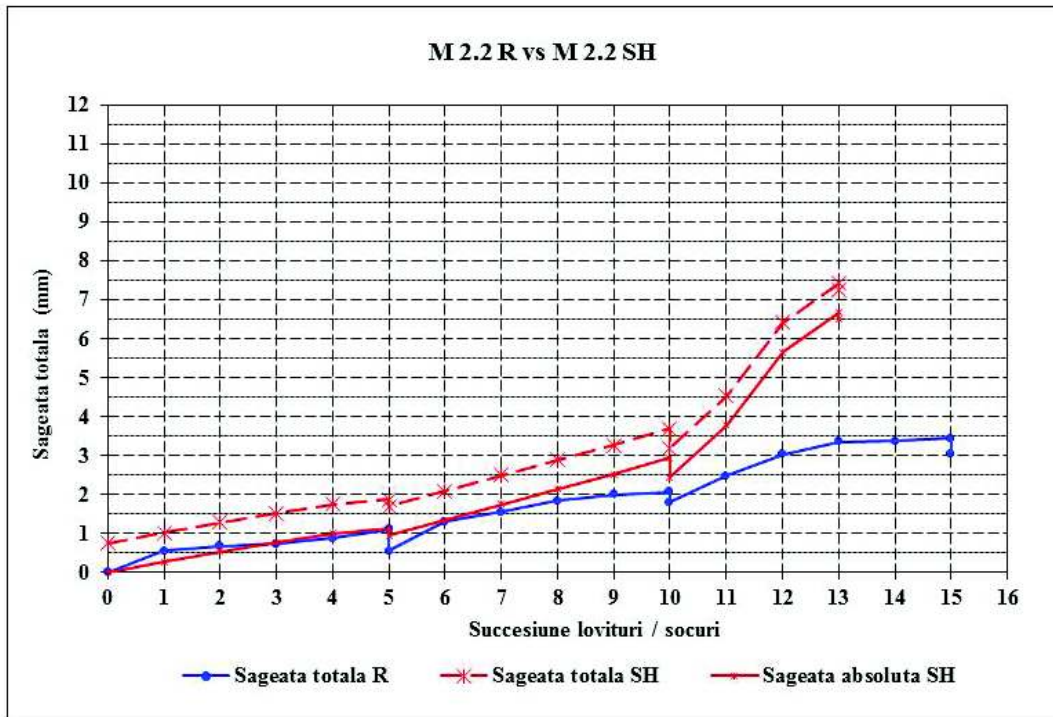


Fig. 6.22. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH

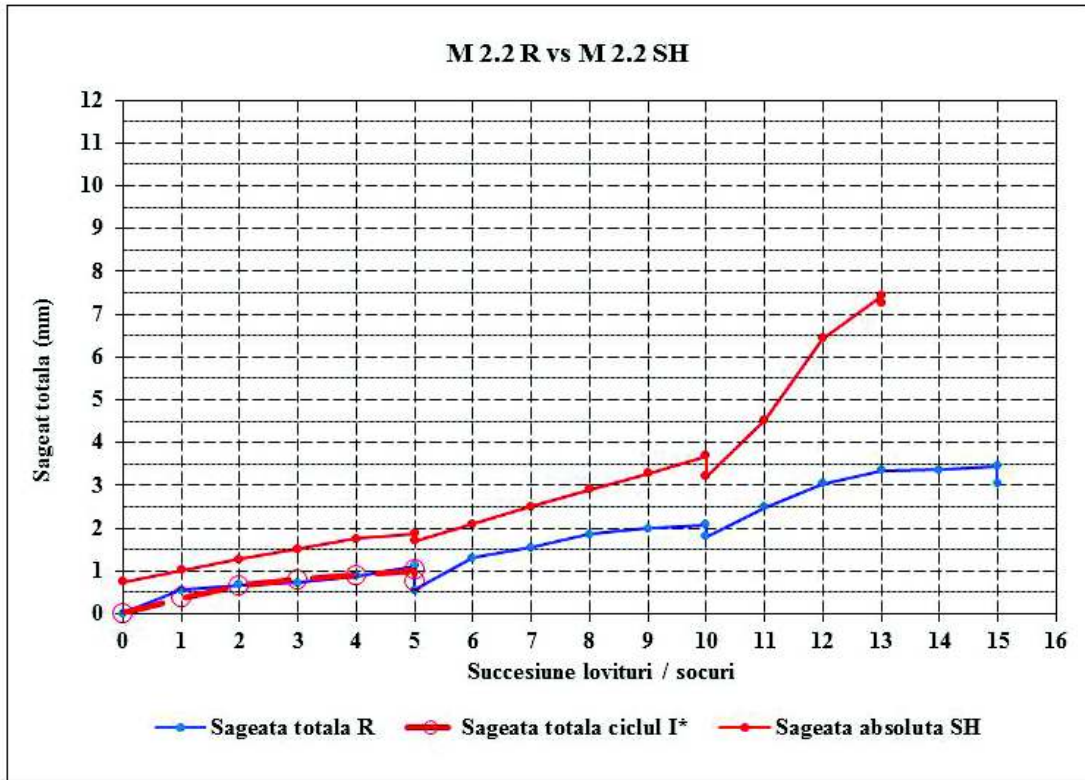


Fig. 6.23. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH

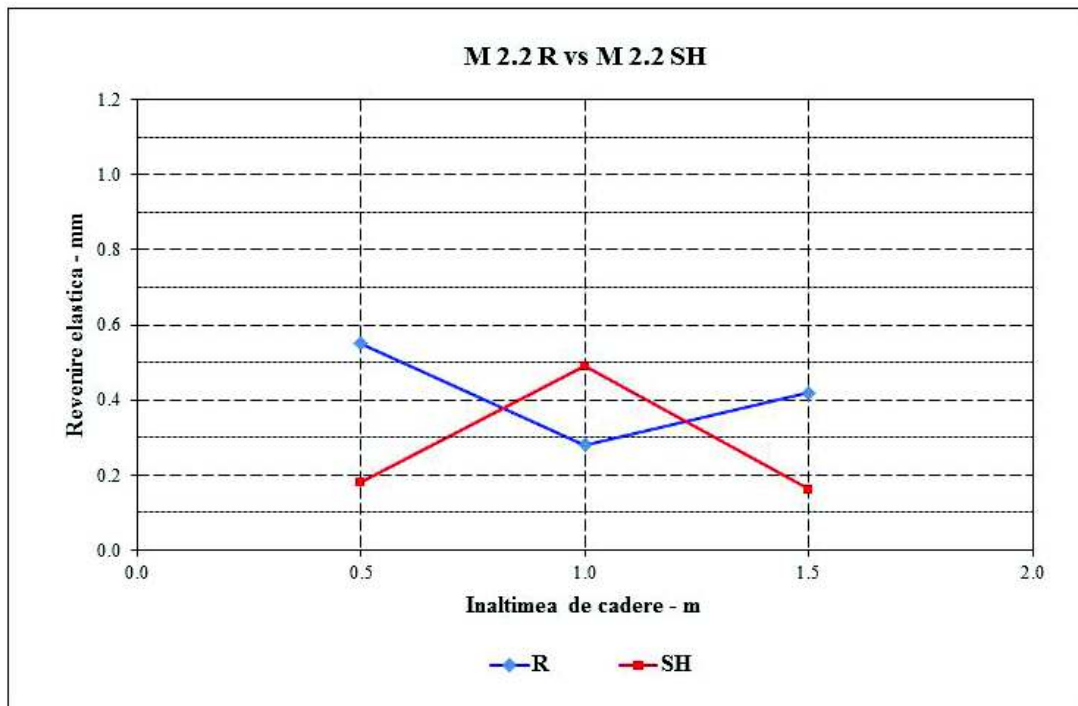


Fig. 6.24. Capacitatea de revenire elastică, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH

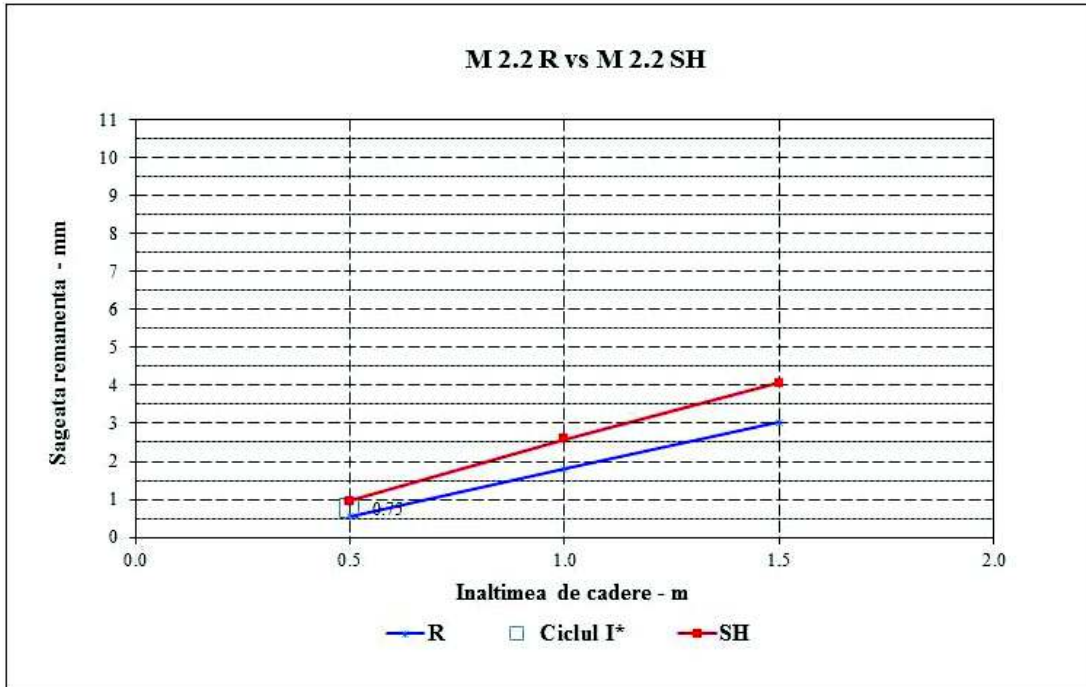


Fig. 6.25. Evoluția săgeții remanente, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH (Ciclul I* și ciclurile SH)

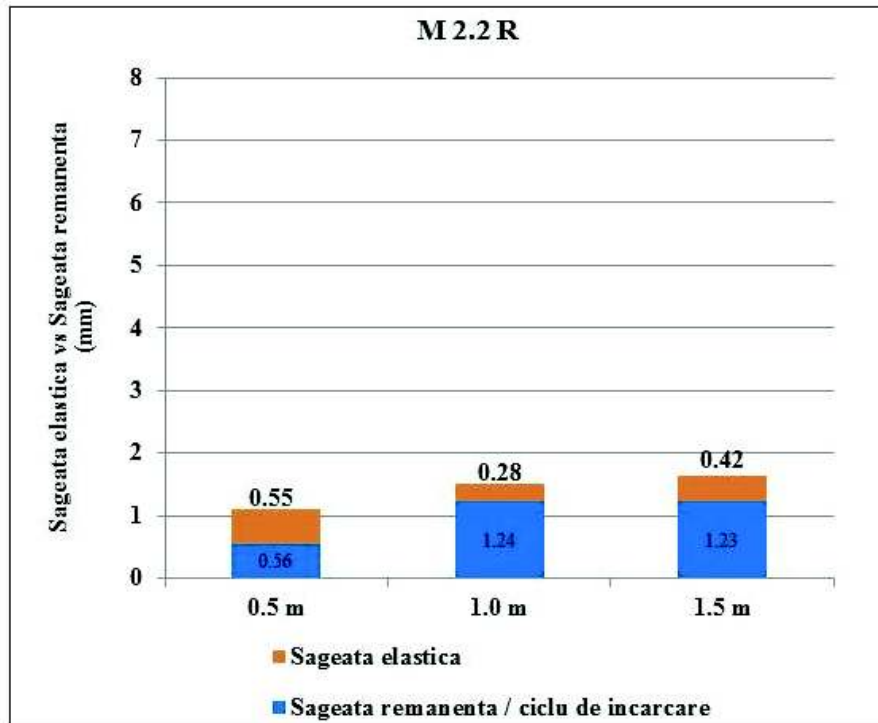


Fig. 6.26. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 2.2 R

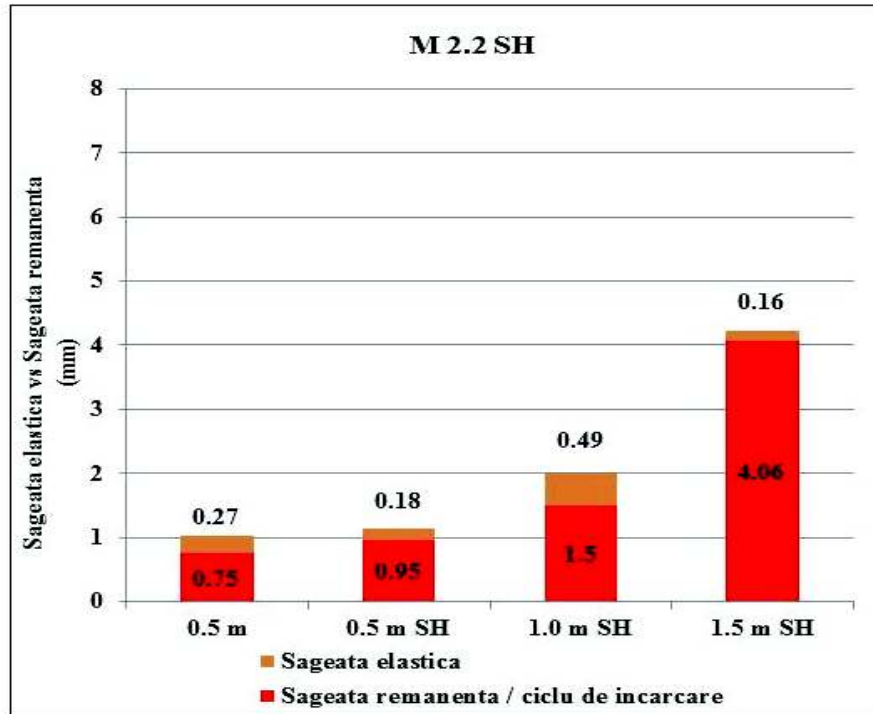


Fig. 6.27. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 2.2 SH

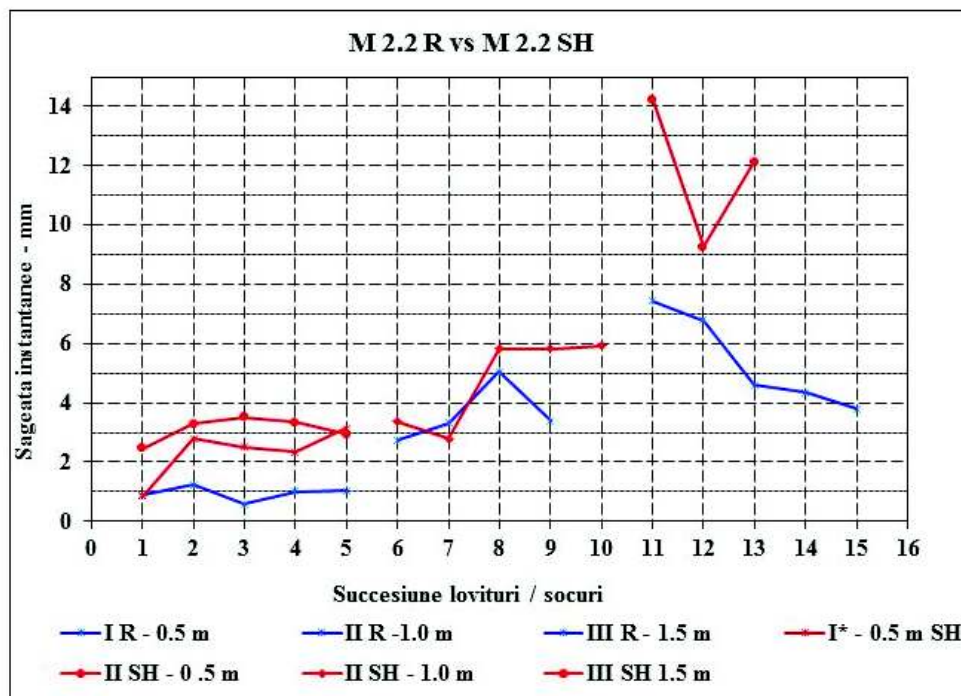


Fig. 6.28. Evoluția comparativă a săgeții instantanee, proba M 2.2 R vs. M 2.2 SH

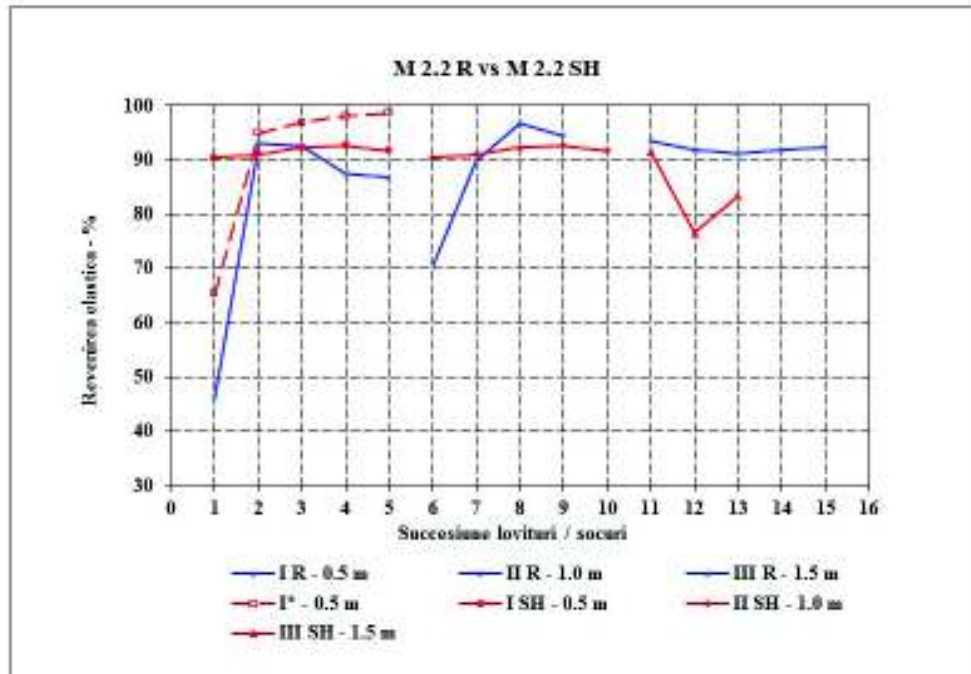


Fig. 6.29. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 2.2 R vs. M 2.2SH

6.4.3 Compoziția ECC M 3.2

Evoluția parametrică a compoziției ECC M 3.2 (caracterizată de raportul FA/C = 1.5) pe parcursul testului de impact DWT este prezentată în Tabele 6.5 (proba M 3.2 R) și 6.6 (proba M 3.2 SH), respectiv grafic în Figurile 6.30-6.37, ce cuprind diagrame reprezentative comparative între proba testată până la rupere la 28 zile (M 3.2 R) și proba solicitată sub ciclul inițial I*, la vârsta de 28 zile, expusă condiționării SH și retestată sub ciclurile I, II, și III, la vârsta de 270 zile (M 3.2 SH).

Tab. 6.5. Compoziția principală ECC M 3.2 R: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h_2 (m)	cr (-)	cr (med)	δw_i^k , (mm)	w_R^k (mm)	Δw^k (mm)	$w_{R,pl}^k$ (mm)	$\delta w_{i,inst}^k$ (mm)	$\delta w_{i,inst}^{k,pl}$ (mm)	ire (%)	N	w_{max} (mm)
k=I ($h_1 = 0.5$ m)	1	0.07	0.37	0.45	0.45	1.39	0.24	1.15	4.107	0.732	82.2		
	2	0.09	0.42		0.29				4.166	0.651	84.4		
	3	0.11	0.47		0.28				6.185	0.516	91.7		
	4	0.12	0.49		0.21				3.422	0.455	86.7		
	5	0.13	0.51		0.16				2.985	0.232	92.2	>11	0.33

Tab. 6.5. Continuare

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.18	0.42	0.48	0.67	3.36	1.06	2.30	4.107	0.732	82.2		
	2	0.23	0.48		0.57				4.416	0.651	85.3		
	3	0.24	0.49		0.37				6.185	0.516	91.7		
	4	0.24	0.49		0.31				3.422	0.455	86.7		
	5	0.26	0.51		0.29				2.985	0.232	92.2	>18	0.8
k=III (h ₁ = 1.5 m)	1	0.30	0.45	0.43	1.05	7.86	0.71	7.15	4.363	1.425	67.3		
	2	0.26	0.42		1.18				8.462	1.148	86.4		
	3	0.27	0.42		1.07				6.901	0.971	85.9		
	4	0.27	0.42		1.08				8.025	0.984	87.7		
	5	0.27	0.42		1.18				9.226	1.144	87.6	>25	2.2

Tab. 6.6. Compoziția principală ECC M 3.2 SH: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I* (h ₁ = 0.5 m)	1	0.07	0.36	0.43	0.60	1.47	0.23	1.24	2.053	0.462	77.5		
	2	0.09	0.41		0.33				2.353	0.289	87.7		
	3	0.10	0.44		0.21				1.288	0.148	88.5		
	4	0.12	0.48		0.18				3.425	0.173	95.0		
	5	0.12	0.48		0.15				5.162	0.101	98.0	9-10	0.4
Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr	cr (med)	δw _i ^k (mm)	w _{SH} ^k (mm)	Δw ^k (mm)	w _{SH,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I (h ₁ = 0.5 m)	1	0.10	0.44	0.49	0.26	0.72	0.19	0.53	1.382	0.189	86.3		
	2	0.13	0.50		0.14				1.122	0.152	86.5		
	3	0.13	0.50		0.12				0.880	0.165	81.3		
	4	0.13	0.51		0.11				1.433	0.148	89.7		
	5	0.14	0.52		0.09				1.128	0.116	89.7	>15	1.2
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.16	0.39	0.42	0.60	3.17	0.42	2.75	2.490	0.694	72.1		
	2	0.19	0.44		0.55				2.816	0.803	71.5		
	3	0.17	0.41		0.65				3.319	0.793	76.1		
	4	0.18	0.42		0.42				3.193	0.580	81.8		
	5	0.21	0.46		0.42				3.382	0.476	85.9	>20	1.2

Tab. 6.6. Continuare

k=III ($h_1 = 1.5 \text{ m}$)	1	0.25	0.40	0.33	1.14	6.44	0.05	6.39	4.912	1.428	70.9		
	2	0.14	0.31		1.12				5.396	1.206	77.6		
	3	0.13	0.29		1.43				7.68	6.280	1.616	74.3	>25
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

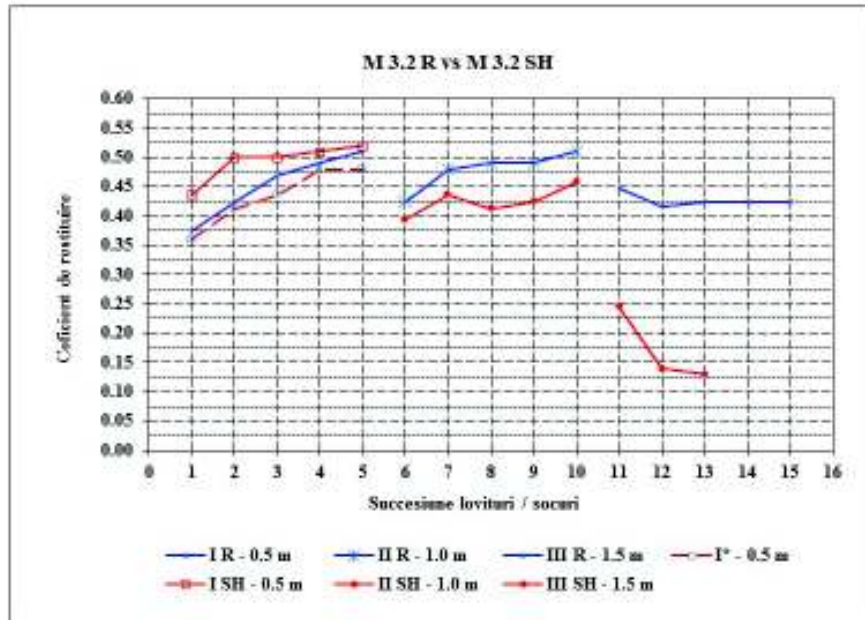


Fig. 6.30. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH

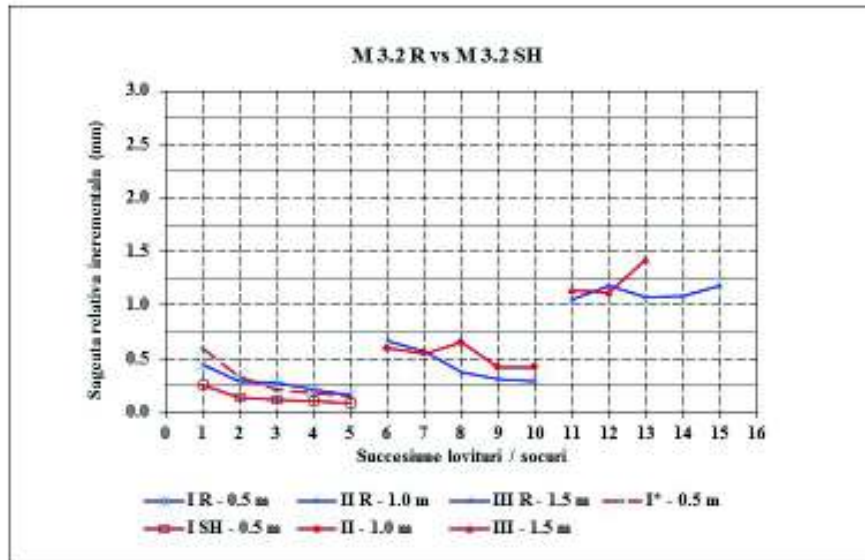


Fig. 6.31. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH

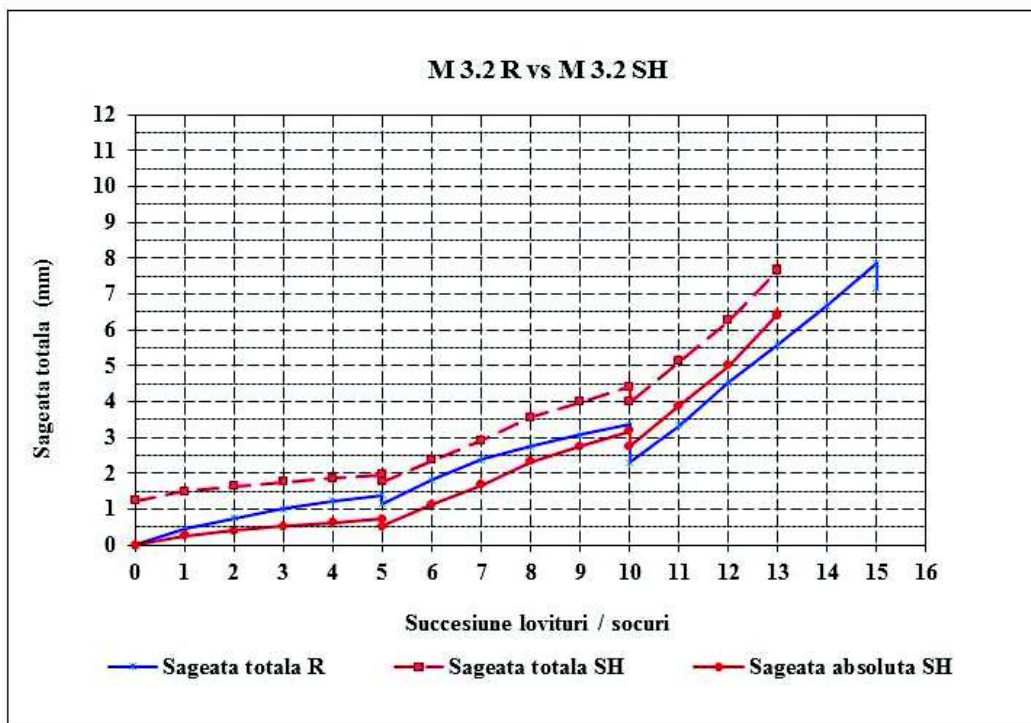


Fig. 6.32. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH

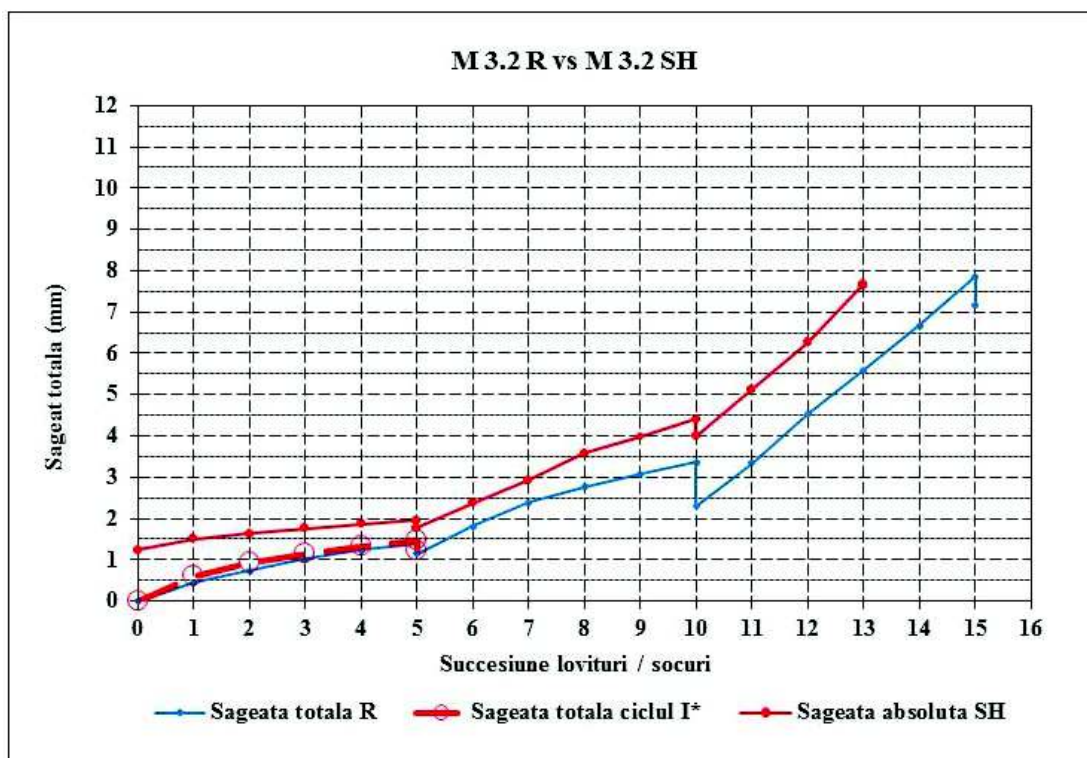


Fig. 6.33. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH

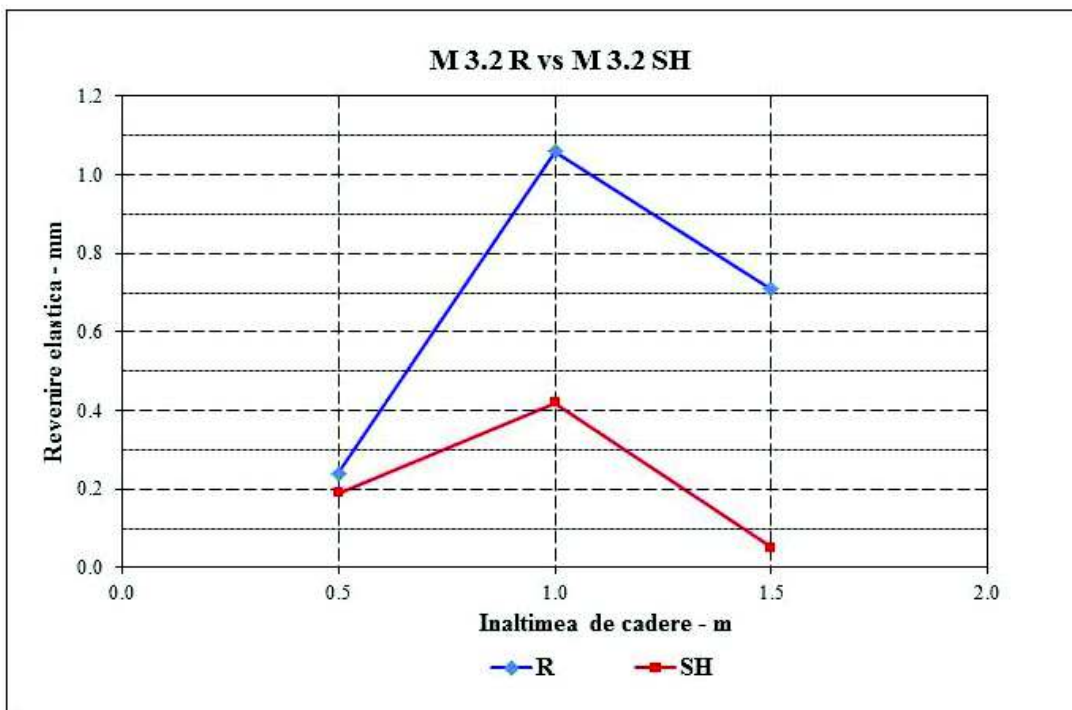


Fig. 6.34. Capacitatea de revenire elastică, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH

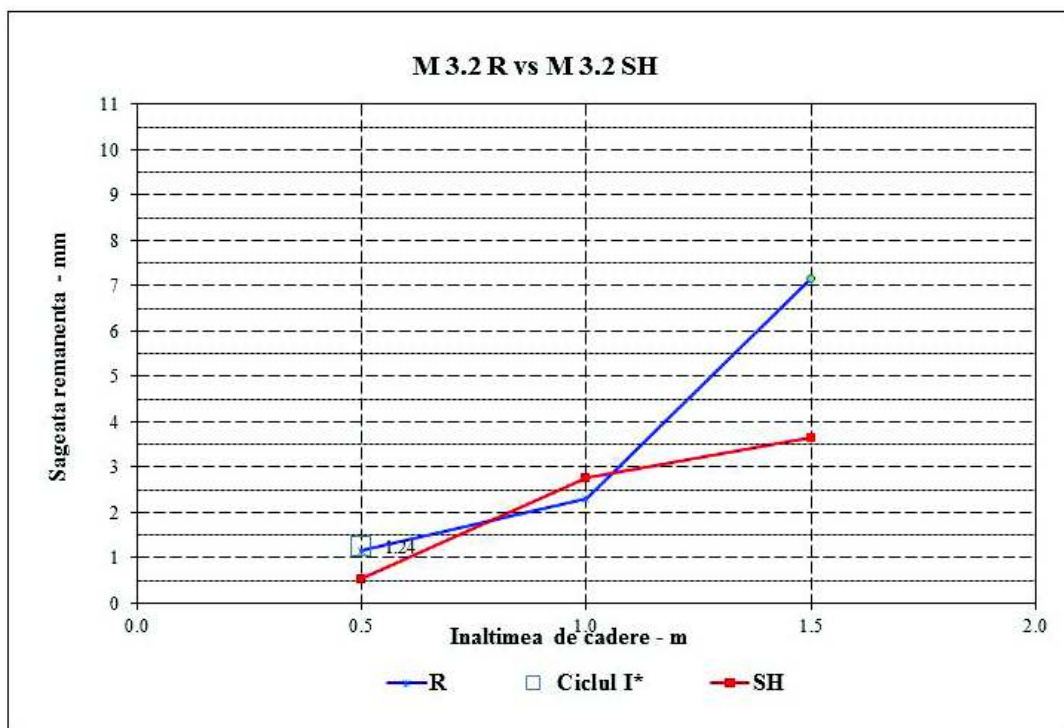


Fig. 6.35. Evoluția săgeții remanente, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH (Ciclul I* și ciclurile SH)

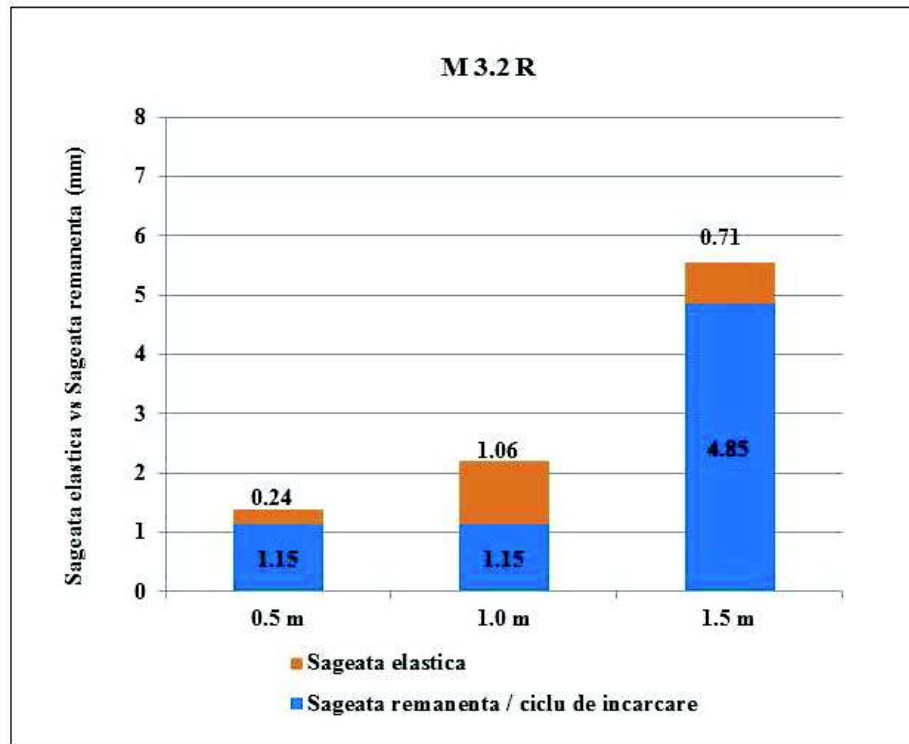


Fig. 6.36. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 3.2 R

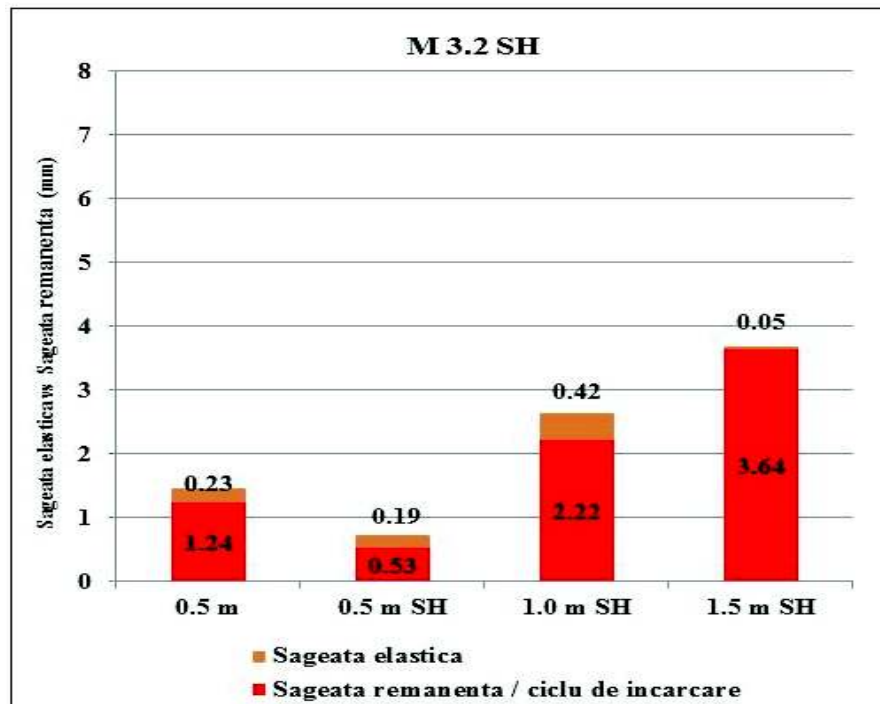


Fig. 6.37. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 3.2 SH

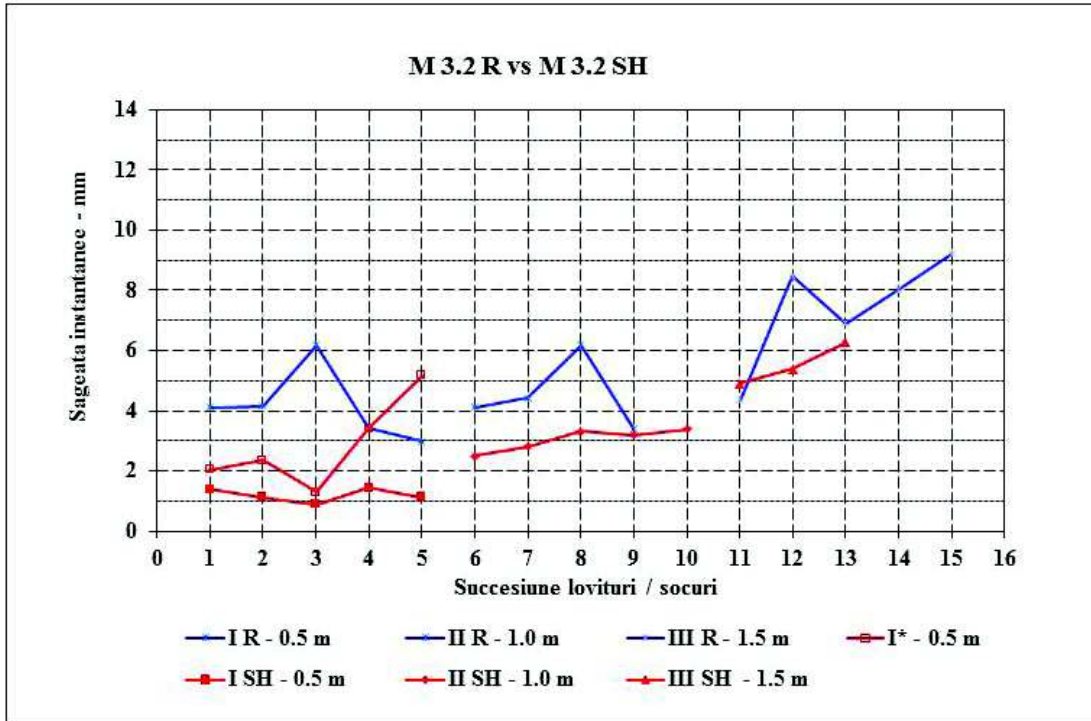


Fig. 6.38. Evoluția comparativă a săgeții instantanee, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH

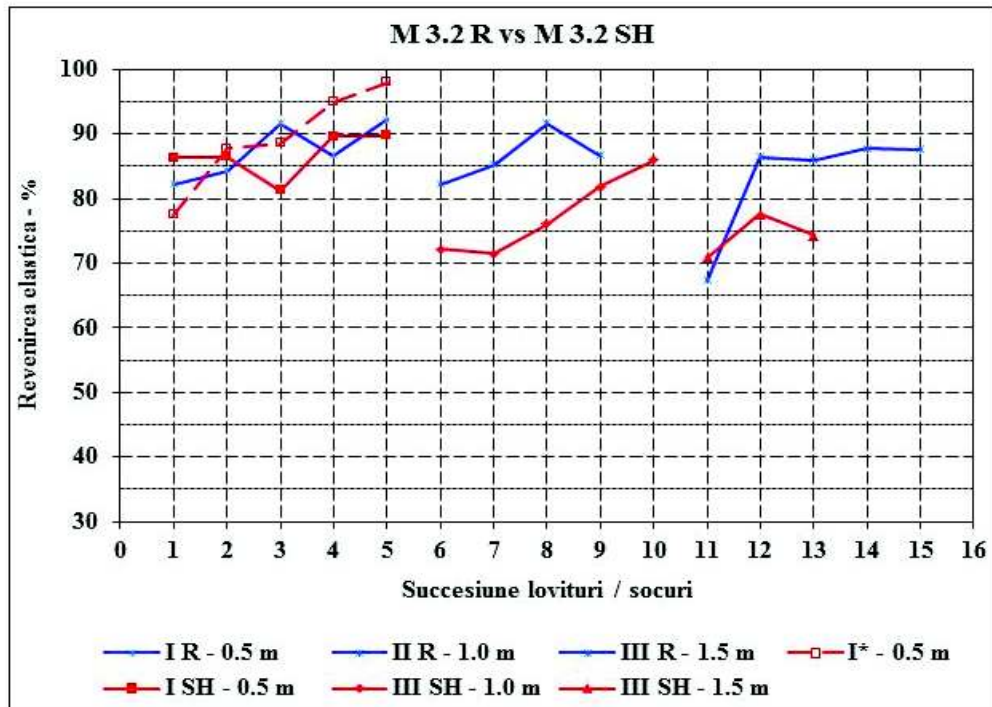


Fig. 6.39. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 3.2 R vs. M 3.2 SH

6.4.4 Compoziția ECC M 4.2

Evoluția parametrică a compoziției ECC M 4.2 (caracterizată de raportul FA/C = 2.4) pe parcursul testului de impact DWT este prezentată în Tabele 6.7 (proba M 4.2 R) și 6.8 (proba M 4.2 SH), respectiv în Figurile 6.40-6.48, ce cuprind diagrame reprezentative comparative între proba testată până la rupere la 28 zile (M 4.2 R) și proba solicitată sub ciclul inițial I*, la vârsta de 28 zile, expusă condiționării SH și retestată sub ciclurile I, II, și III, la vârsta de 270 zile (M 4.2 SH).

Tab. 6.7. Compoziția principală ECC M 4.2 R: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw_i^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	$\delta w_{i,inst}^k$ (mm)	$\delta w_{i,inst}^{k,pl}$ (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I (h ₁ = 0.5 m)	1	0.06	0.35	0.44	0.49	1.45	0.44	1.01	0.892	0.401	55.1		
	2	0.08	0.40		0.38				1.477	0.301	79.6		
	3	0.10	0.45		0.19				1.117	0.124	88.9		
	4	0.12	0.49		0.22				2.317	0.190	91.8		
	5	0.13	0.51		0.17				1.322	0.189	85.7	15	0.3
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.18	0.42	0.42	0.93	4.26	0.69	3.57	4.089	0.904	77.9		
	2	0.18	0.42		0.76				5.237	0.967	81.5		
	3	0.17	0.41		0.61				8.422	0.741	91.2		
	4	0.18	0.42		0.53				9.303	0.643	93.1		
	5	0.18	0.42		0.42				4.990	0.617	87.6	>20	1.0
k=III (h ₁ = 1.5 m)	1	0.19	0.36	0.31	1.92	10.26	0.67	9.59	10.322	2.341	77.3		
	2	0.21	0.37		2				9.250	2.693	70.9		
	3	0.07	0.22		2.77				7.862	2.948	62.5	25	2.4
	4	-	-		-				-	-	-	-	-
	5	-	-		-				-	-	-	-	-

Tab. 6.8. Compoziția principală ECC M 4.2 SH: evoluția pe parcursul testului DWT

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr (-)	cr (med)	δw_i^k (mm)	w _R ^k (mm)	Δw^k (mm)	w _{R,pl} ^k (mm)	$\delta w_{i,inst}^k$ (mm)	$\delta w_{i,inst}^{k,pl}$ (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
k=I* (h ₁ = 0.5 m)	1	0.06	0.35	0.44	0.6	1.58	0.47	1.11	1.154	0.259	77.6		
	2	0.09	0.41		0.42				1.413	0.165	88.3		
	3	0.11	0.46		0.25				1.458	0.115	92.1		
	4	0.13	0.51		0.12				1.480	0.115	92.3		
	5	0.12	0.49		0.19				1.558	0.107	93.1	13-15	0.5

Tab. 6.8. Continuare

Ciclul încărcare	Șoc	Recul			Deplasări				Deplasări în timp real			Fisuri	
		h ₂ (m)	cr	cr (med)	δw _i ^k (mm)	W _{SH} ^k (mm)	Δw ^k (mm)	W _{SH,pl} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^k (mm)	δw _{i,inst} ^{k,pl} (mm)	ire (%)	N	w _{max} (mm)
						W _{SH} ^{k,abs} (mm)		W _{SH} ^{k,pl} (mm)					
k=I (h ₁ = 0.5 m)	1	0.11	0.47	0.51	0.27	0.67	0.44	0.23	1.067	0.571	46.5		
	2	0.12	0.49		0.16				1.480	0.365	75.3		
	3	0.13	0.51		0.10				1.726	0.247	85.7		
	4	0.14	0.53		0.08	1.287	0.154	88.0					
	5	0.15	0.55		0.06	1.78	1.55	2.136	0.231	89.2	20	0.8	
k=II (h ₁ = 1.0 m)	1	0.19	0.43	0.43	0.62	2.76	2.24	0.52	2.568	0.718	72.0		
	2	0.19	0.43		0.55				2.995	0.585	80.5		
	3	0.17	0.41		0.45				3.241	0.598	81.5		
	4	0.18	0.42		0.40	3.504	0.587	83.3					
	5	0.20	0.45		0.30	3.87	3.35	2.568	0.718	72.0	>25	1.2	
k=III (h ₁ = 1.5 m)	1	0.23	0.39	0.38	1.29	5.68	5.13	0.55	5.651	1.672	70.4		
	2	0.23	0.39		0.99				5.638	1.192	78.9		
	3	0.19	0.35		1.16	6.79	6.24	7.052	1.381	80.4	30-35	1.8	
	4	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-

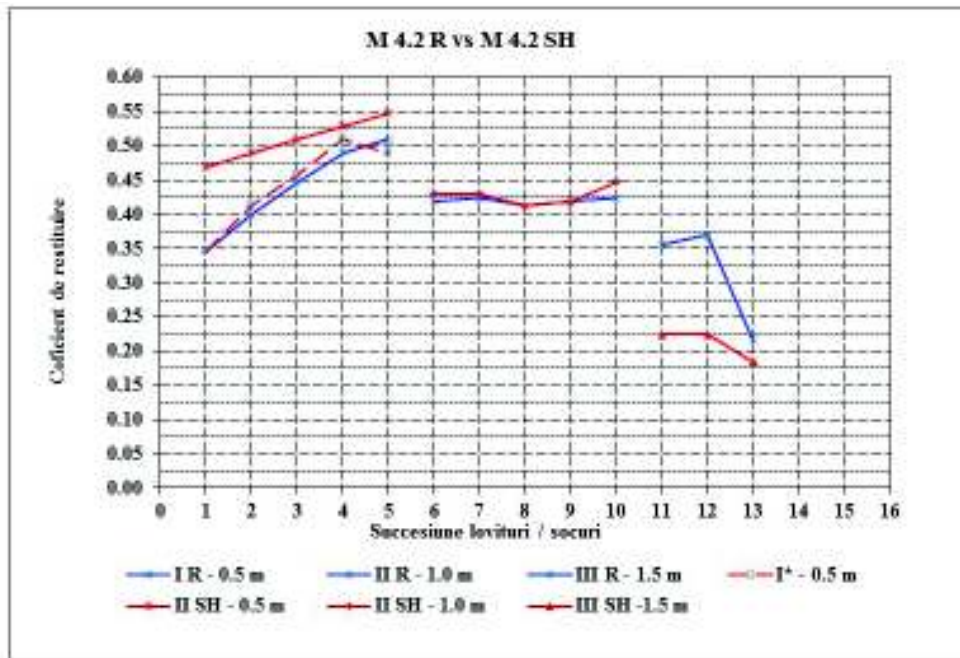


Fig. 6.40. Evoluția comparativă a coeficientului de restituire pe parcursul ciclurilor de încărcare, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH

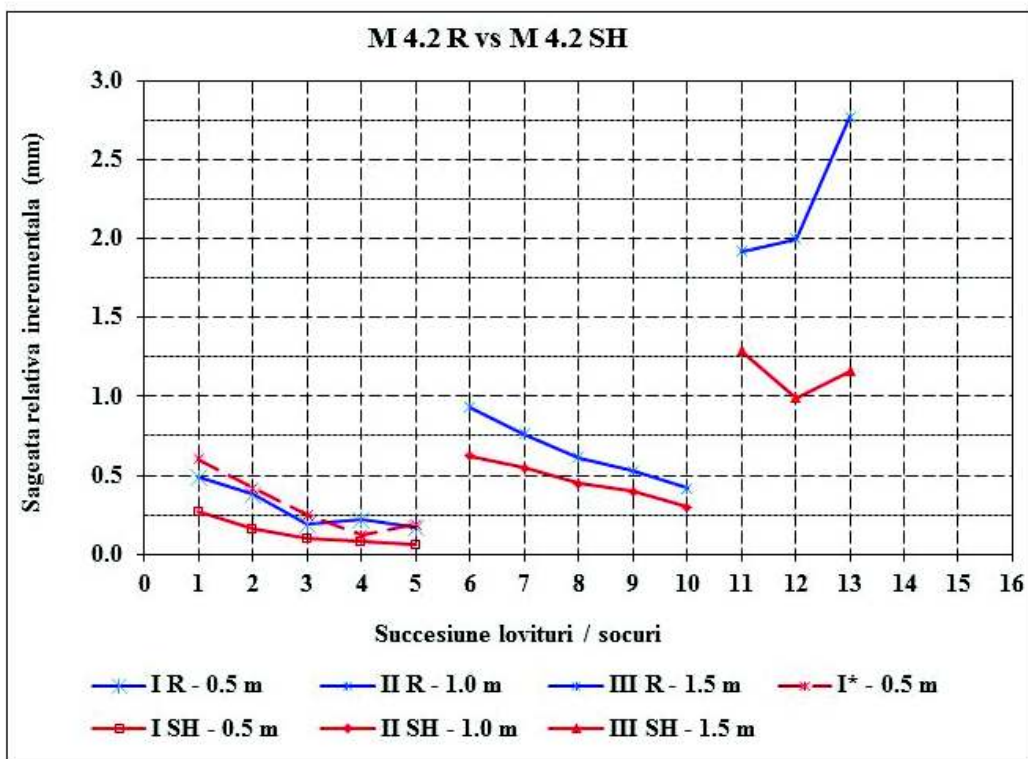


Fig. 6.41. Evoluția comparativă a săgeții relative incrementale, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH

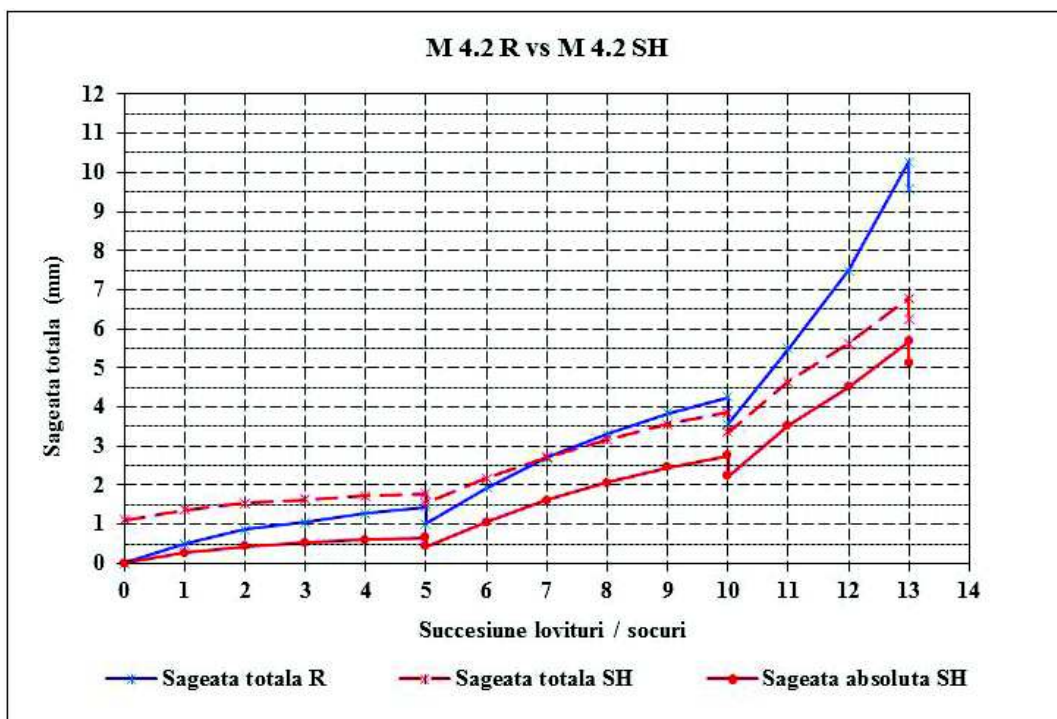


Fig. 6.42. Evoluția comparativă a săgeții totale, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH

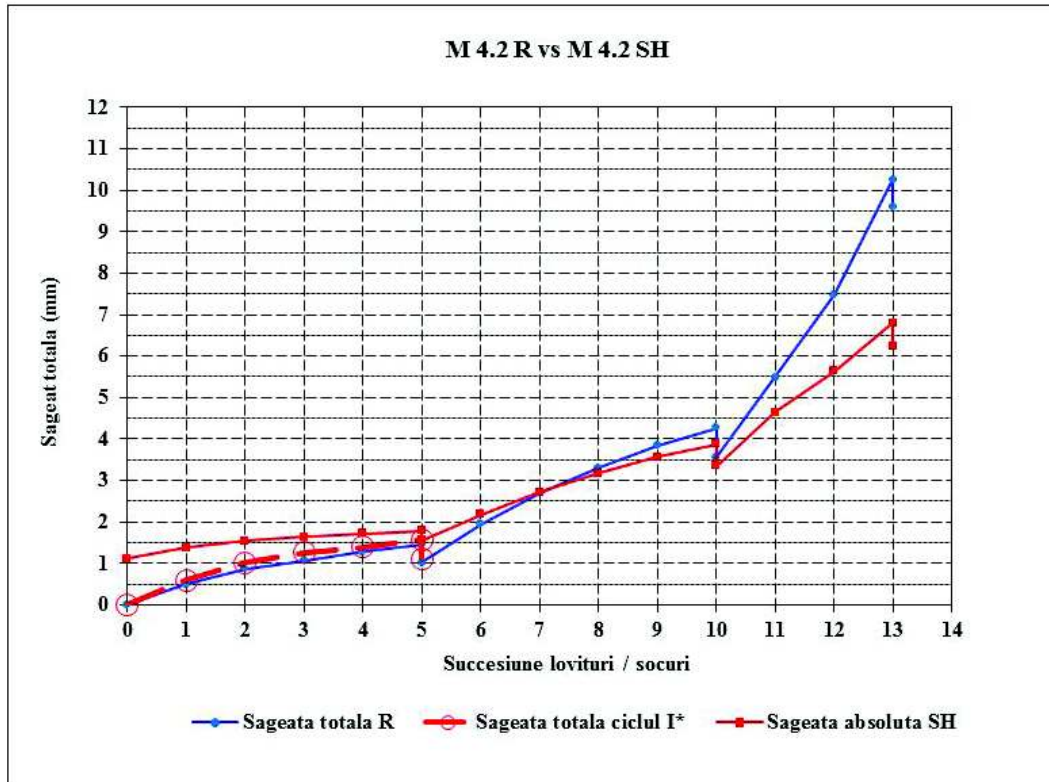


Fig. 6.43. Evoluția săgeții totale și absolute, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH

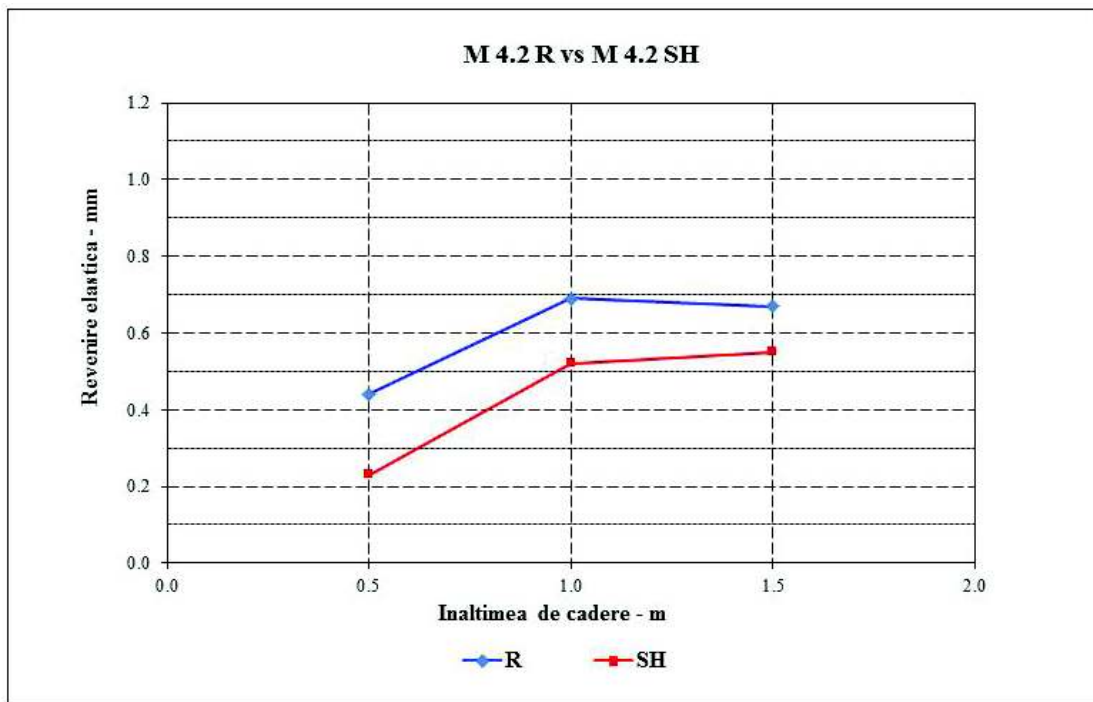


Fig. 6.44. Capacitatea de revenire elastică, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH

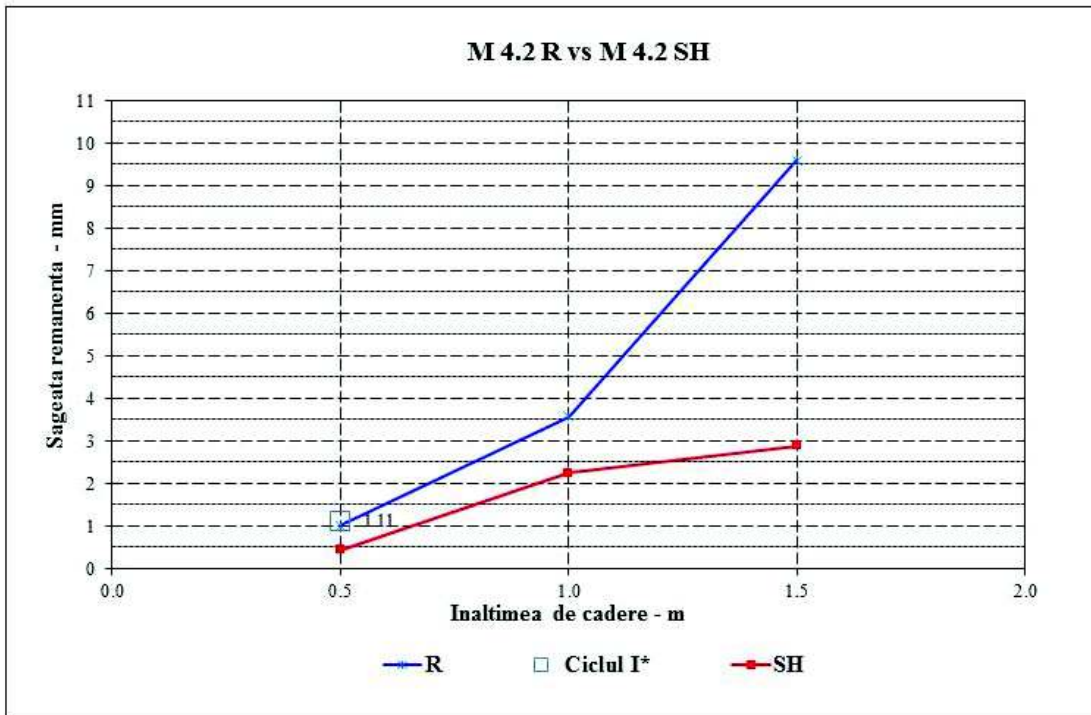


Fig. 6.45. Evoluția săgeții remanente, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH (Ciclu I* și ciclurile SH)

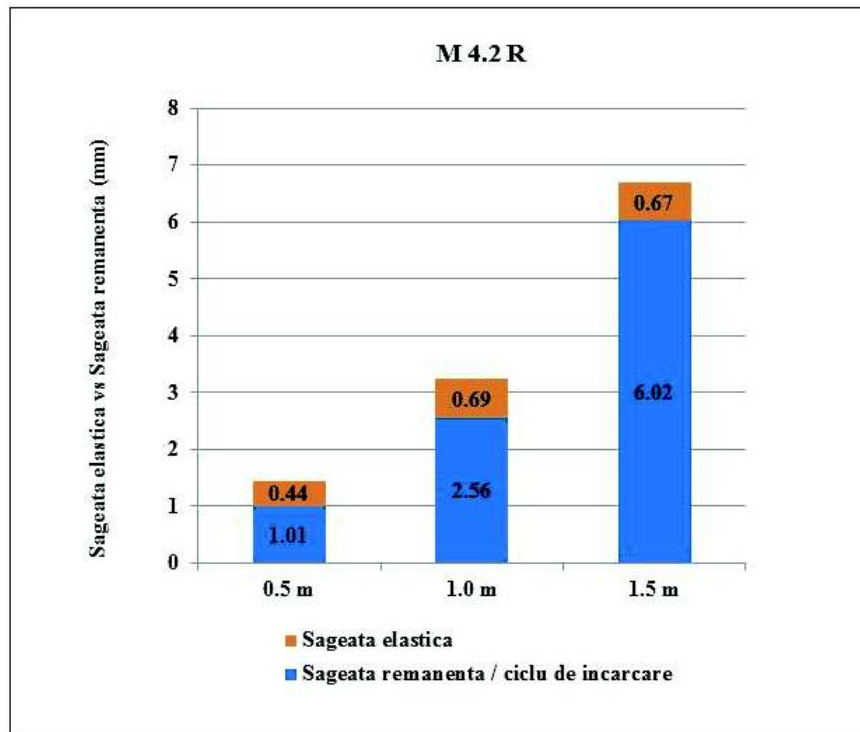


Fig. 6.46. Capacitatea de revenire elastică vs. săgeata remanentă, proba M 4.2 R

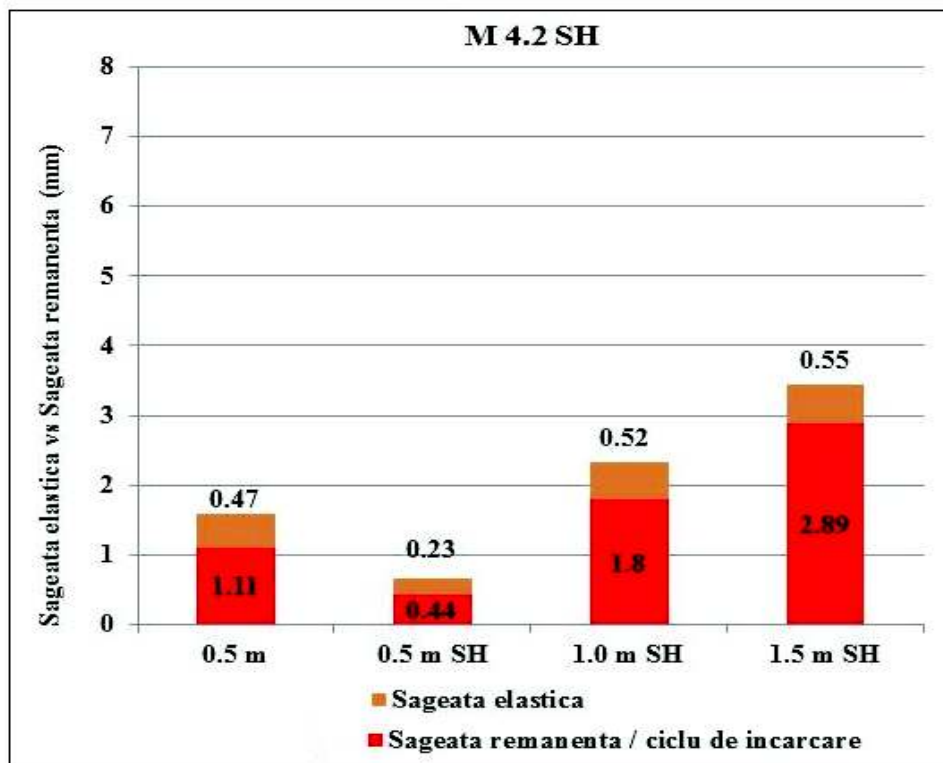


Fig. 6.47. Capacitatea de revenire elastică și săgeata remanentă, ciclul I* și ciclurile SH, proba M 4.2 SH

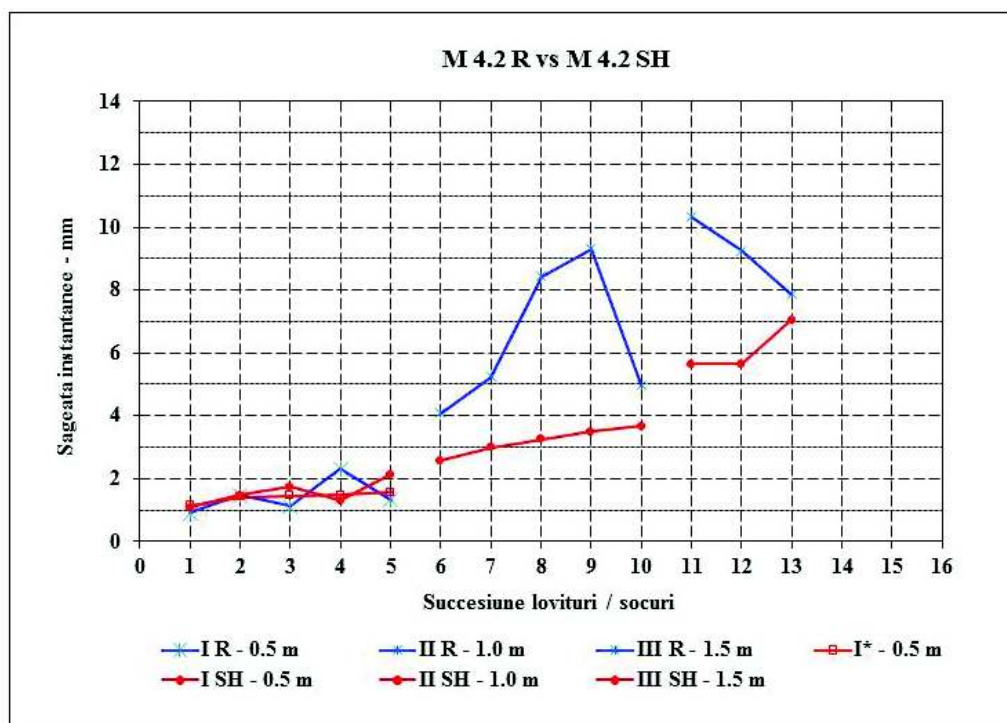


Fig. 6.48. Evoluția comparativă a Săgeții instantanee, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH

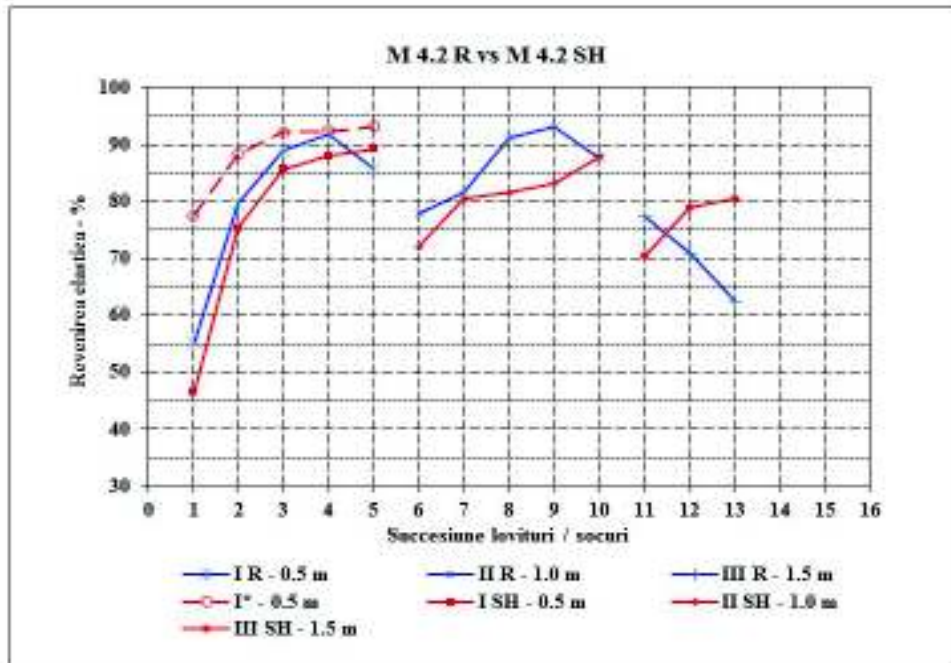


Fig. 6.49. Capacitatea de revenire elastică după înregistrarea deplasării maxime instantanee, proba M 4.2 R vs. M 4.2 SH

6.5 Capacitatea de autosigare (SS)

6.5.1 Compoziția ECC M 1.4

6.5.1.1 Specimenul M 1.4 R

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 1.4 R sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.1.

Ciclul I, h=0.5 m

Primul șoc (1) aplicat plăcii M 1.4 R induce apariția unei fisuri dezvoltate de-a lungul unei diagonale principale, cu deschiderea maximă de $w < 0.05$ mm, evaluată cu ajutorul lupei și riglei de fisuri. Al doilea șoc induce apariția celei de-a doua fisuri, cu deschidere $w < 0.05$ mm; fisura inițială se deschide până la aproximativ $w \sim 0.1$ mm.

Primul ciclu de încărcare, cuprinzând 5 șocuri de la înălțimea $h_1 = 0.5$ m, induce o rețea radială de microfisuri, ($N \sim 10$) dezvoltată de-a lungul diagonalelor principale cu ramificațiile aferente. Deschiderea maximă de fisurare $w_{\max} = 258.5$ μm , este înregistrată în partea centrală a plăcii (vezi Figura 6.50), pe un sector nu foarte extins.

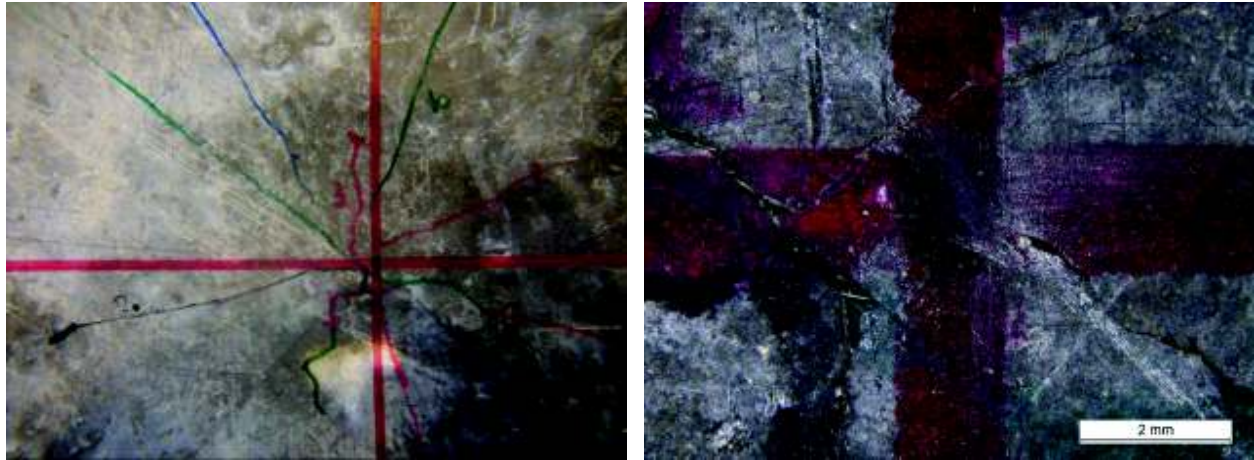


Fig. 6.50. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 1.4 R, Ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

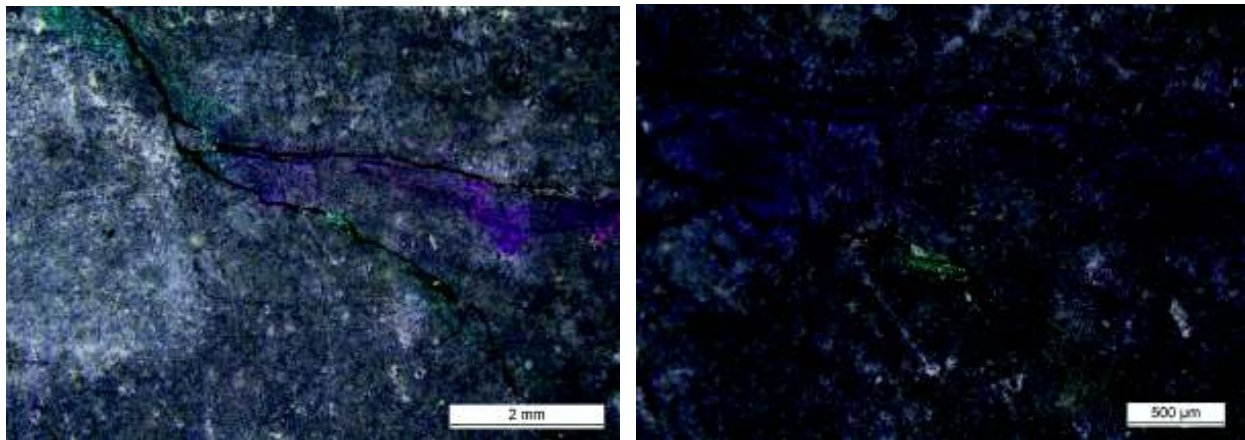


Fig. 6.51. M 1.4 R, Ciclul I, rețea microfisuri: detalii (microscop)

Fisurile adiacente prezintă deschideri de aproximativ 100 μm , care se stabilizează la aproximativ 30-60 μm spre extremitățile epruvetei (Figura 6.51). Analiza vizuală microscopică, complementară, indică o rețea discretă de microfisuri multiple cu deschideri ce variază între 5-15 μm , dispuse generalizat pe suprafața plăcii și esențiale în mecanismul de preluare a energiei de impact (vezi Figura 6.52).

Trebuie subliniat faptul că primul ciclu de încărcare nu induce apariția fisurilor pe partea superioară a plăcii în zona centrală de contact între epruvetă și corpul de impact (din despicare) sau în zona de prindere a clamelor pentru fixarea probei în cadrul de încercare (din torsiunea rezultată de împiedicarea ridicării colțurilor). Acestea apar la partea inferioară și sunt asociate eforturilor de încovoiere.

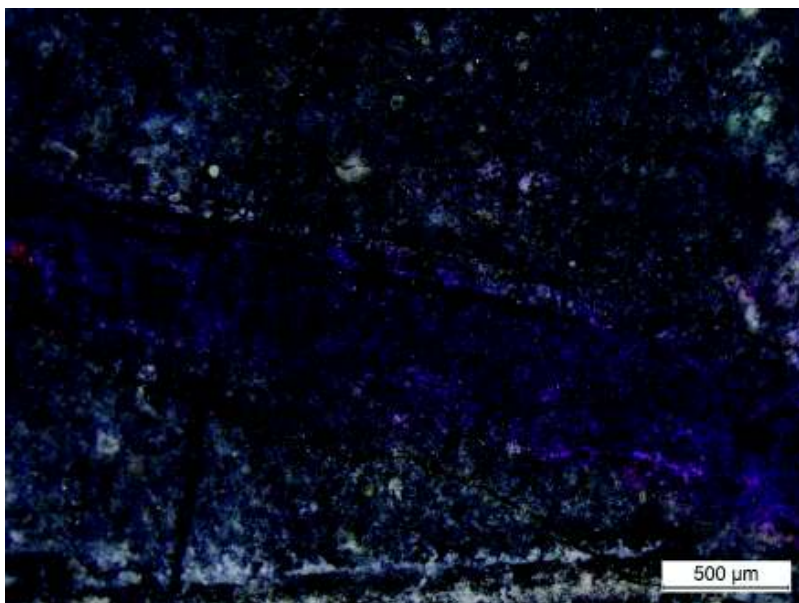


Fig. 6.52. M 1.4 R, Ciclul I, rețea microfisuri: detaliu (microscop) de microfisuri discrete (5-15 μm)

Ciclul II, h=1.0 m

Primul șoc aplicat plăcii M 1.4 R de la înălțimea de 1.0 m induce deschiderea fisurilor existente cumulat cu apariția unora noi. Deschiderea maximă atinge valoarea de $w = 459.7 \mu\text{m}$, în zona centrală a plăcii (Figura 6.53). Spre extremitățile epruvetei se remarcă ramificații multiple, cu deschiderea de 30-50 μm (vezi Figura 6.54 stânga). Ciclul II de încărcare induce odată cu ultimul șoc apariția primelor microfisuri vizibile pe partea superioară a plăcii, în zona de prinderea clamelor de fixare (vezi Figura 6.54 dreapta).

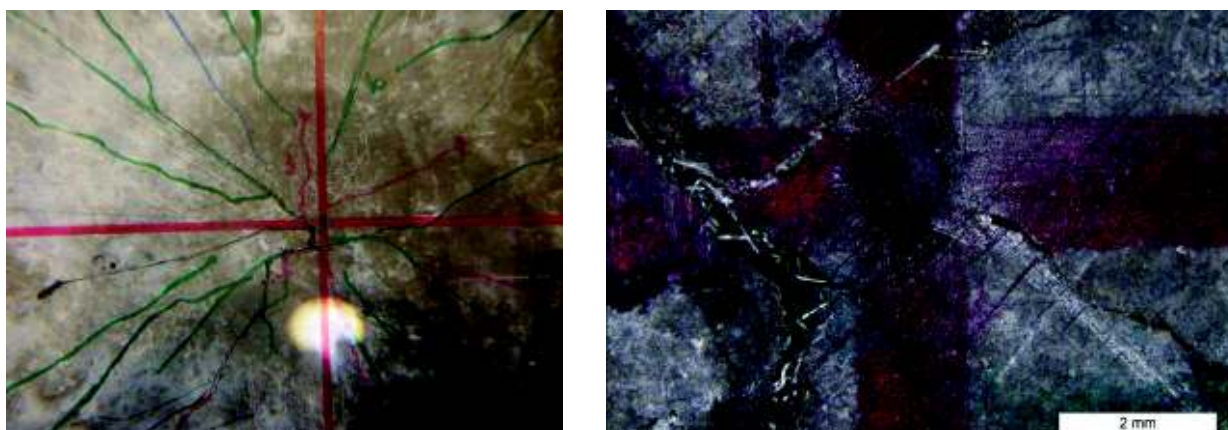


Fig. 6.53. M 1.4 R, Ciclul II, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei dreapta: detaliu central - microscop)

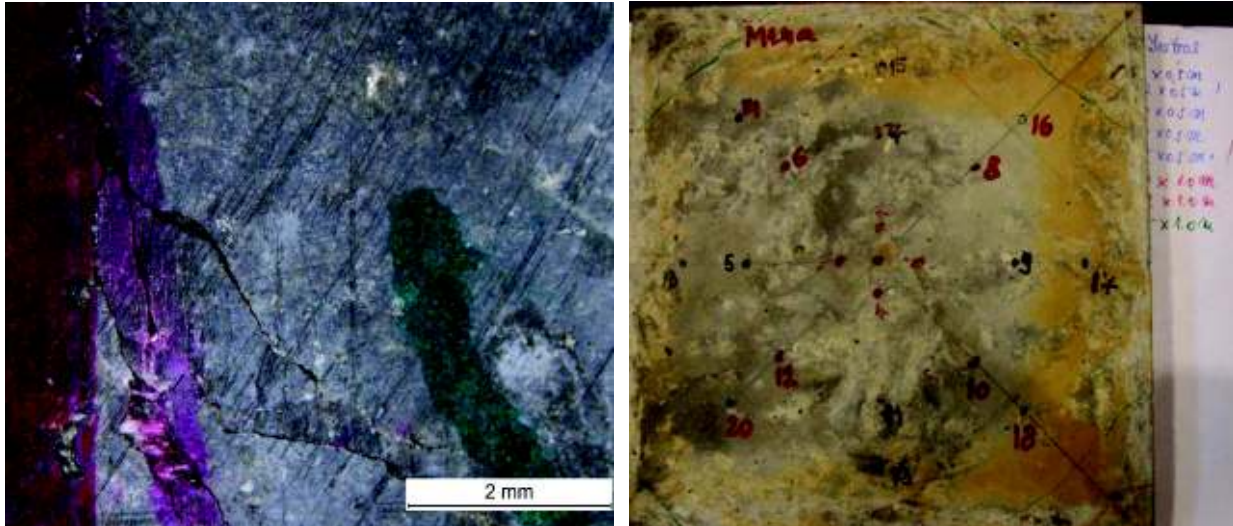


Fig. 6.54. M 1.4 R, Ciclul II, rețea microfisuri: stânga - dezvoltare ramificații periferice; dreapta – fisuri zonă de prindere, fața superioară

Primul șoc induce apariția unei fisuri dezvoltate de-a lungul unei diagonale principale, cu deschiderea maximă de $w < 0.05$ mm, evaluată cu ajutorul lupei și riglei de fisuri. Al doilea șoc induce apariția celei de-a doua fisuri, cu deschidere $w < 0.05$ mm; fisura inițială se deschide până la aproximativ $w \sim 0.1$ mm. Ambele se deschid la partea inferioară, fiind asociate încovoierii.

Ciclul III, $h=1.5$ m

Ciclul III cuprinzând șocuri de la înălțimea $h = 1.5$ m atrage după sine deschiderea considerabilă a fisurilor inițiale. Deschiderea maximă atinge valoarea de $w = 1823.5$ μm , în zona centrală a plăcii (vezi Figura 6.55), localizat de-a lungul a 2-3 mm; în sectorul central deschiderea fisurilor este cuprinsă în intervalul 1.0-1.2 mm. Spre extremități se remarcă ramificații multiple și de asemenea capacitatea dezvoltării unor microfisuri noi. Pe fața superioară a epruvetei fisurile din zonele de prindere a clamelor devin critice; de asemenea în zona de centrală, de contact între cele două corpuri, apar microfisuri concentrice și de asemenea radiale, de-a lungul diagonalelor principale.

Gradul de degradare indus în probă, atât din punct de vedere al gradului de fisurare

dar și al deformațiilor înregistrate, cumulate cu pierderea elasticității (vezi Tabelul 6.1) este asimilat ruperii. Proba este supusă suplimentar la două șocuri lansate de la înălțimea $h = 2.0$ m (vezi Anexa 6.1), săgeata la mijlocul plăcii, atinge valoarea totală $w_R^k = 6.38$ mm și o valoare remanentă de 6.28 mm, dar placa nu se dezintegrează.

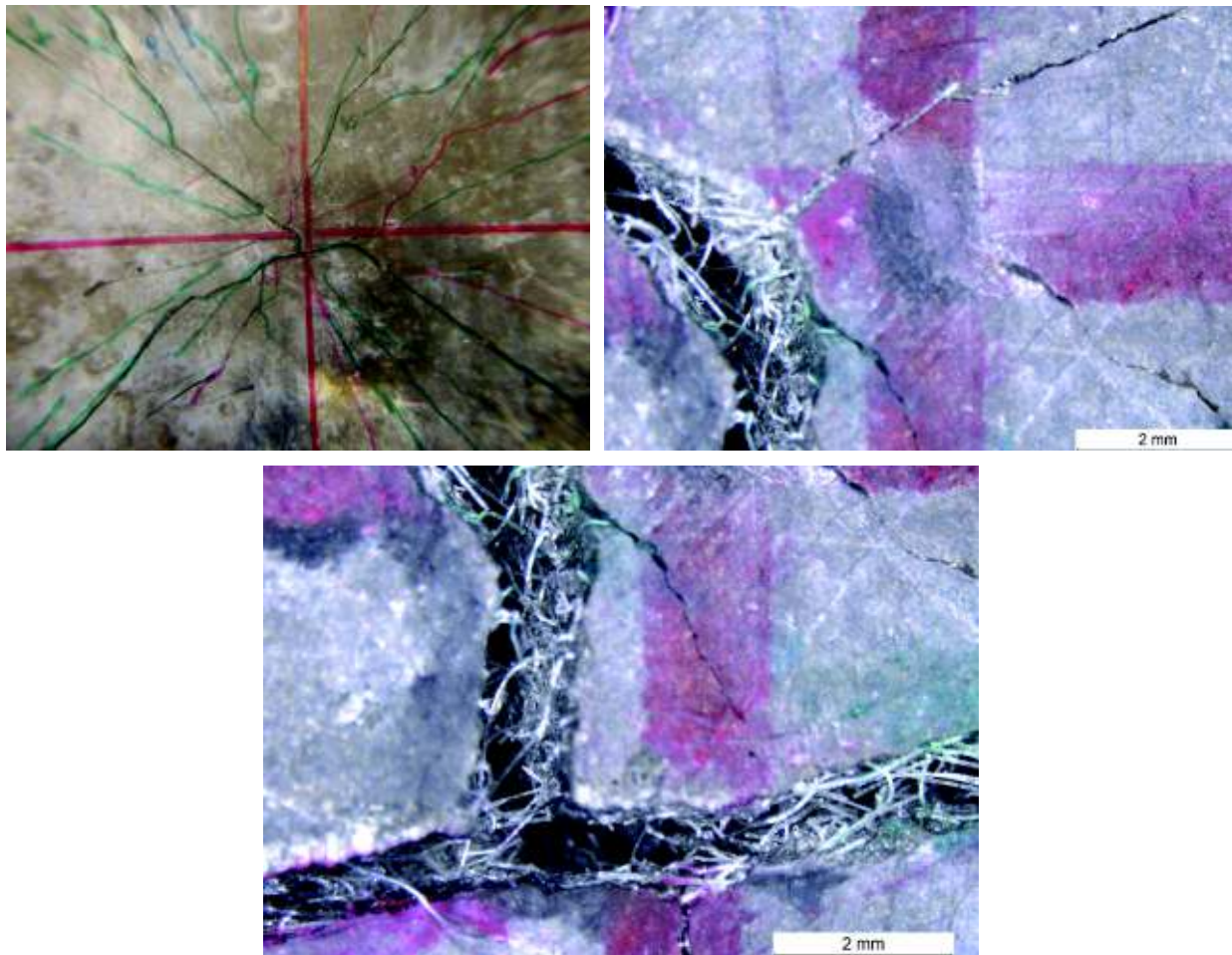


Fig. 6.55. M 1.4 R, Ciclul II, rețea microfisuri: (stânga sus: ansamblul rețelei; dreapta sus; centru jos: detaliu central - microscop)

6.5.1.2 Specimenul M 1.4 SH

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 1.4 SH sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.2.

Ciclul I*, $h = 0.5$ m

M 1.4 SH prezintă o comportare similară cu martorul M 1.4 R sub primul ciclu de

încărcare: o rețea de aproximativ 9 microfisuri, dezvoltate de-a lungul diagonalelor principale, cu ramificații adiacente. Deschiderea maximă de fisură în zona centrală este mai redusă decât în cazul M 1.4 R, $w_{\max} = 141.4 \mu\text{m}$, cu o medie de $w_{\text{med}} = 118.2 \mu\text{m}$ de-a lungul a 2-3 mm, fapt datorat unui număr mai mare de fisuri în perimetrul central (Figura 6.56. Evoluția fisurilor și ramificațiilor adiacente este similară, cu deschideri de fisură stabilizate în intervalul 30-60 μm , descendente spre extremitățile epruvetei. Pe fața superioară a plăcii nu se remarcă apariția fisurilor în această etapă de solicitare.

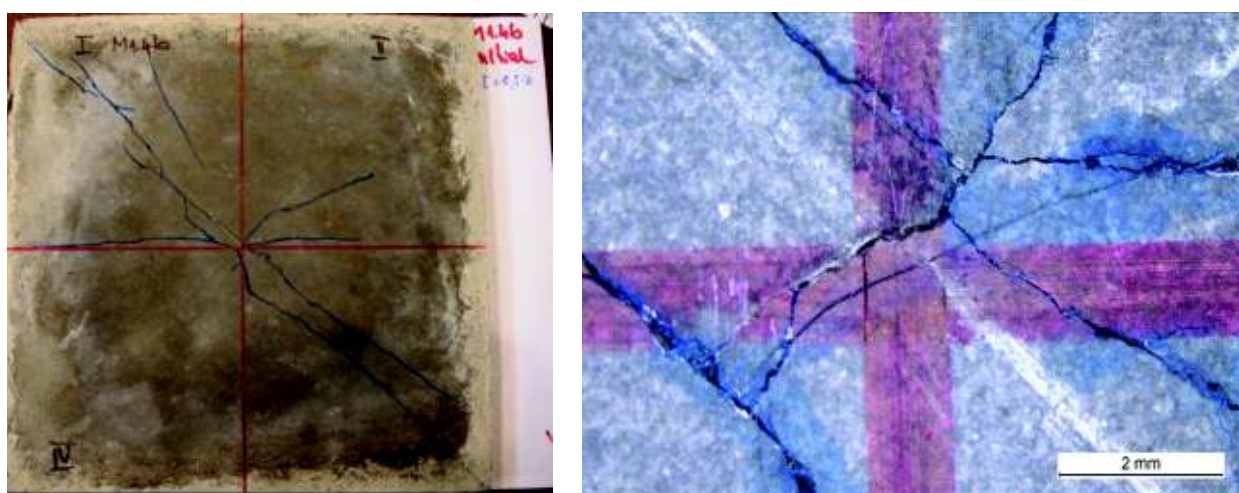


Fig. 6.56. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 1.4 SH, ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Evaluarea capacității de auto-sigilare (SS) după expunerea epruvetei condiționării SH (28 cicluri)

Evaluarea epruvetei M 1.4 SH după expunerea la cele 28 de cicluri de autovindecare indică prezența uniformă, omogenă a produșilor de precipitare, de-a lungul întregii rețele de microfisuri dezvoltate în primul ciclu de șocuri. Figura 6.57 prezintă comparativ, aspectul fisurii înainte (stânga) și după (dreapta) expunerea la condiționarea SH. Analiza microscopică demonstrează închiderea completă a fisurilor cu deschidere mică de 40 μm și sigilarea parțială a fisurilor mai mari, în funcție de deschiderea lor (vezi Figura 6.58).

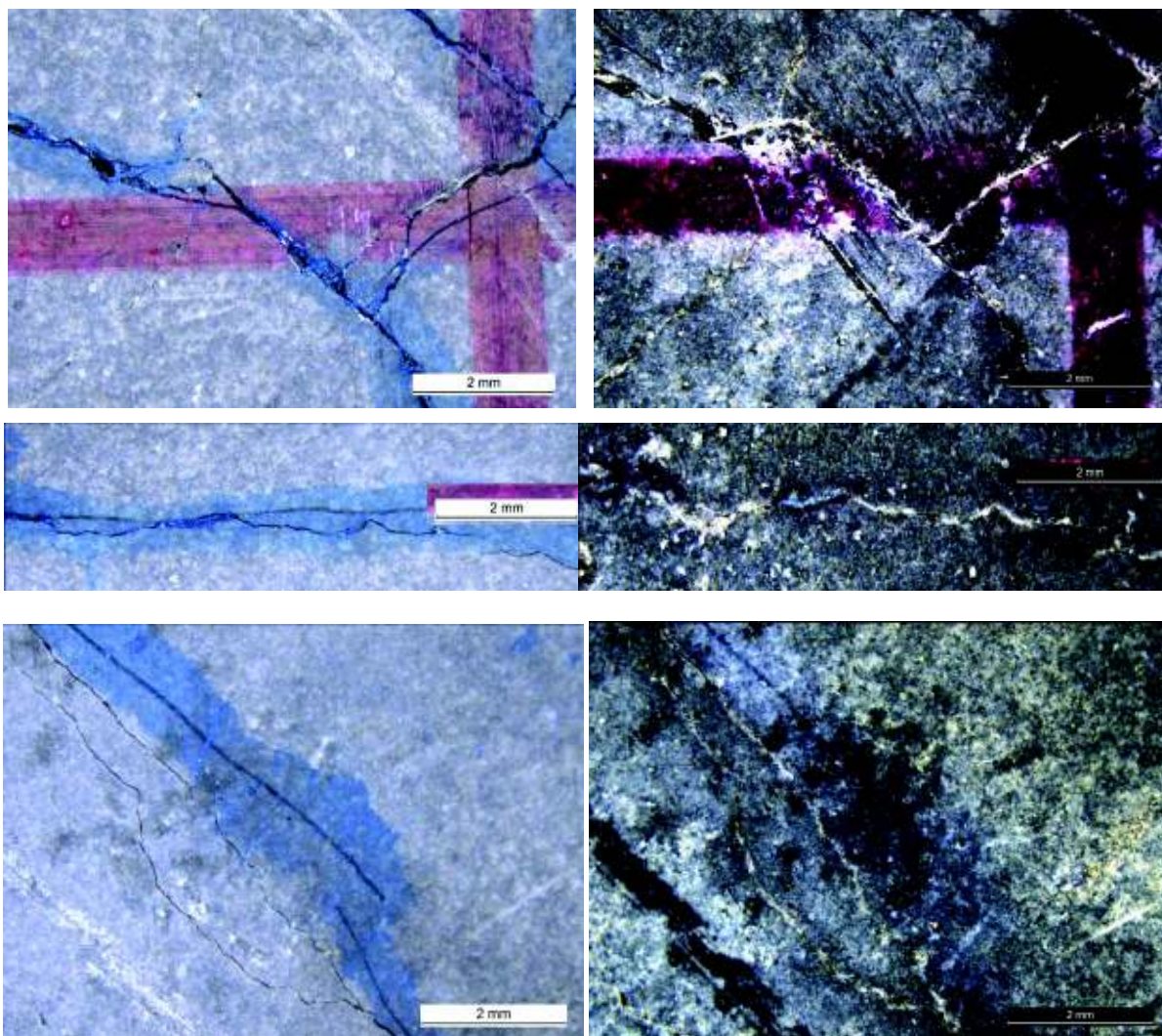


Fig. 6.57. M 1.4 SH: Evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS

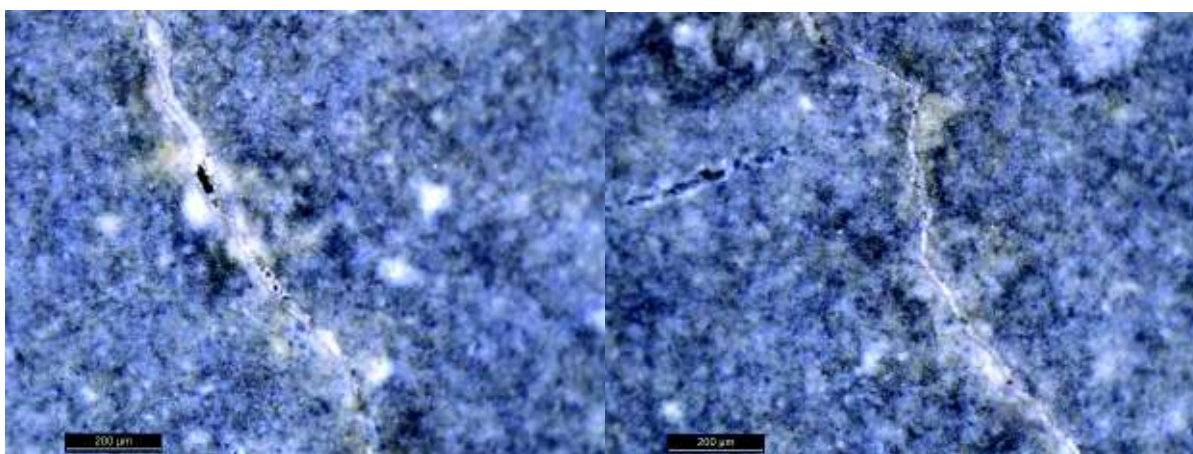


Fig. 6.58. M 1.4 SH: Evaluarea (prin analiză microscopică) a capacității SS; detalii de fisuri închise parțial (stânga) și complet (dreapta)

Retestare la vârsta de 270 zile, ciclul I, h = 0.5 m

Primul ciclu de încărcare, I (5 x h = 0.5 m) în cadrul etapei de retestare a plăcii M 1.4 SH imprimă o deschidere suplimentară a fisurilor principale și ramificațiilor dezvoltate în timpul ciclului inițial I*, în zona centrală a probei (cu cel mai ridicat nivel de solicitare și eforturi sub șoc). Fisura F1, evaluată în centrul epruvetei (perimetrul), prezintă o creștere a deschiderii maxime până la valoarea $w_{max} = 421.1 \mu m$ și a celei medii până la valoarea $w_{med} = 306.4 \mu m$, de-a lungul a celor 2-3 mm reprezentativi (Figura 6.59).

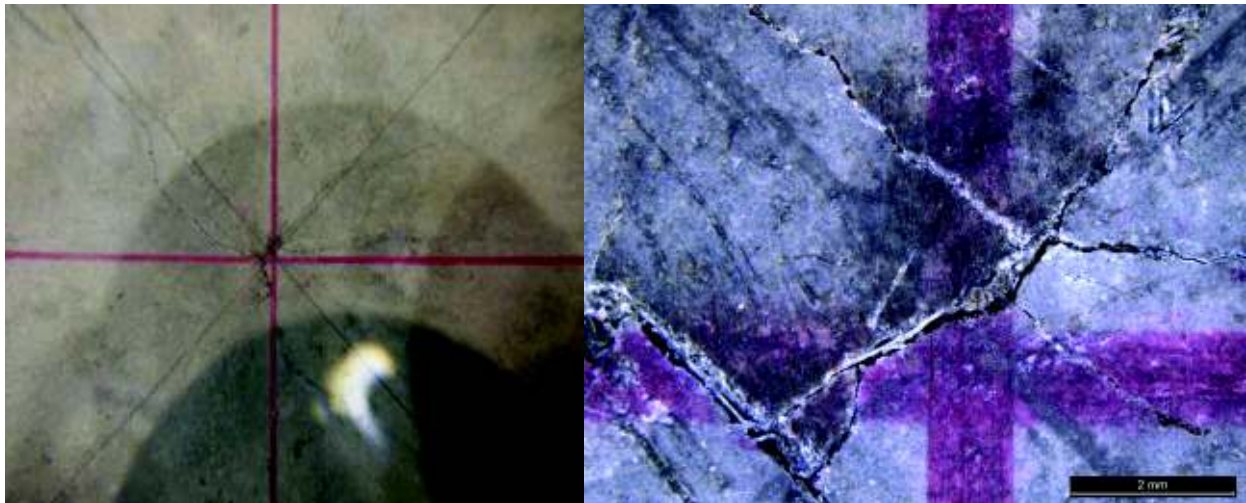


Fig. 6.59. M 1.4 SH, Ciclul I, rețea microfisuri (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Analiza microscopică efectuată după primul ciclu de reîncărcare, I, indică fisuri și ramificații dezvoltate în cadrul ciclului I* și închise parțial sau complet în cursul condiționării SH care se mențin în acest stadiu de sigilare. Acest fapt demonstrează calitatea superioară a produșilor de precipitare dezvoltați în microfisuri, cu aderență sporită la pereții acestora și capabili să reziste noilor șocuri aplicate epruvetei (vezi Figura 6.60).

În același timp se remarcă dezvoltarea a noi fisuri în cadrul rețelei, demonstrându-se astfel conservarea capacității de microfisurare sub sarcină a compozitului, post vindecare și la vârste mai târzii (vezi Figura 6.61).

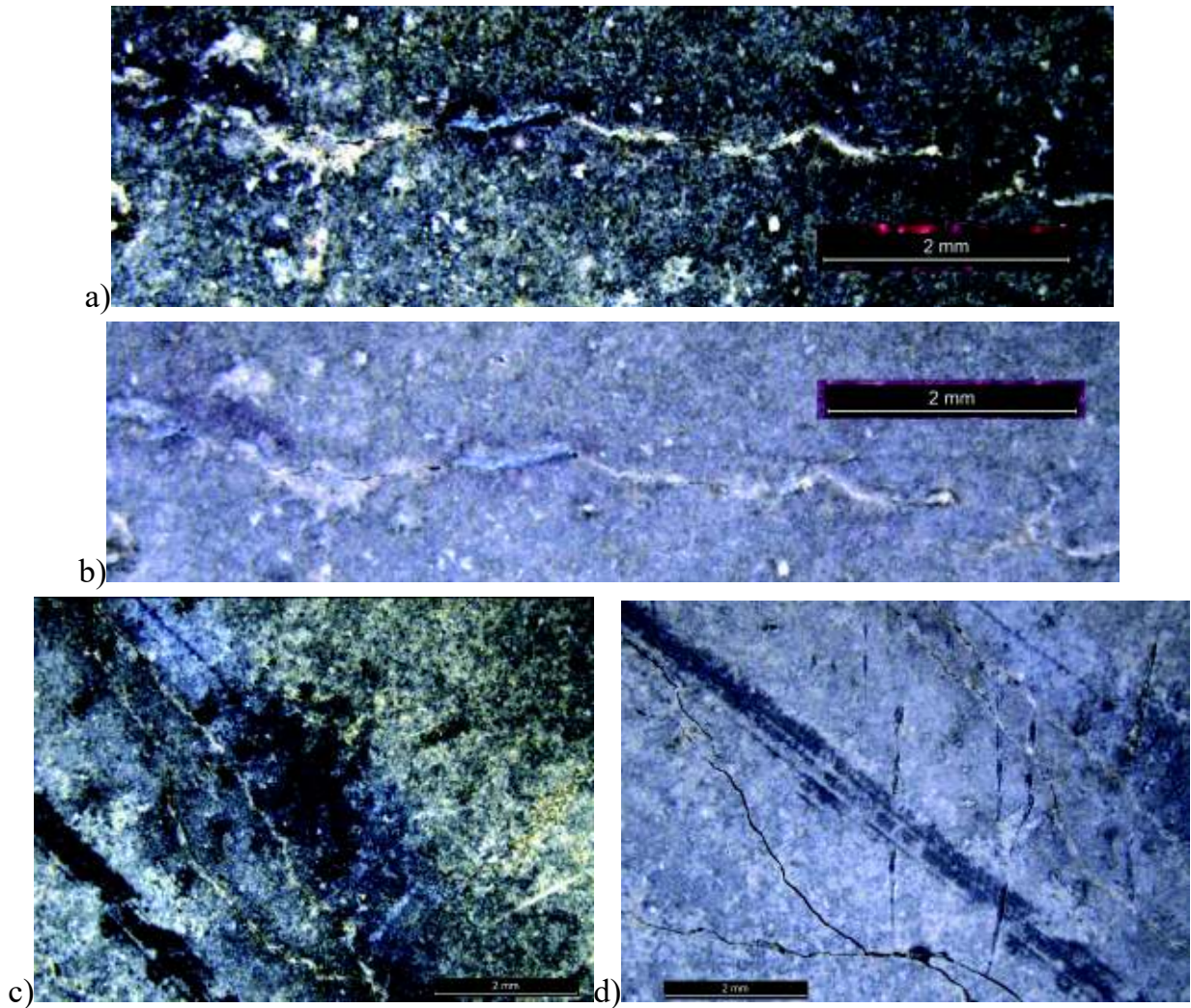


Fig. 6.60. M 1.4 SH, ciclul I: a), c) după autovindecare; b), d) după retestare

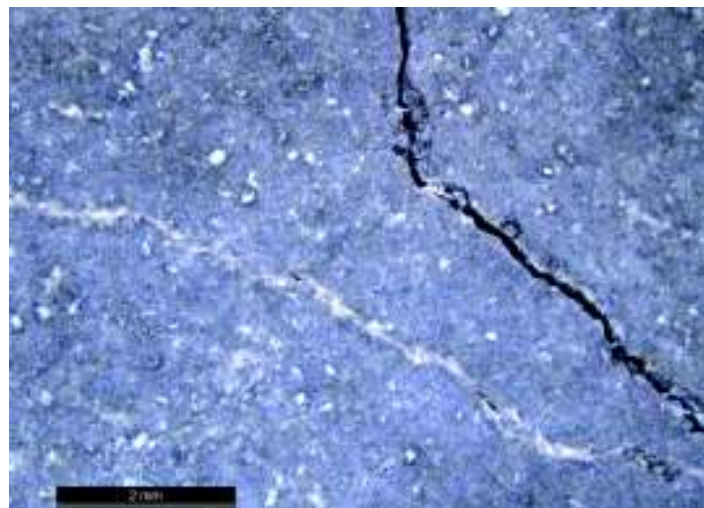


Fig. 6.61. M 1.4 SH, ciclul I: fisură nouă dezvoltată în vecinătatea fisurii vechi, sigilate

Ciclul II, h = 1.0 m

Ciclul II de retestare implică deschiderea considerabilă a fisurii F 1, care pe lungimea critică de 2-3 mm atinge o deschidere maximă $w_{\max} = 793.3 \mu\text{m}$ și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 583.8 \mu\text{m}$ (Figura 6.62).

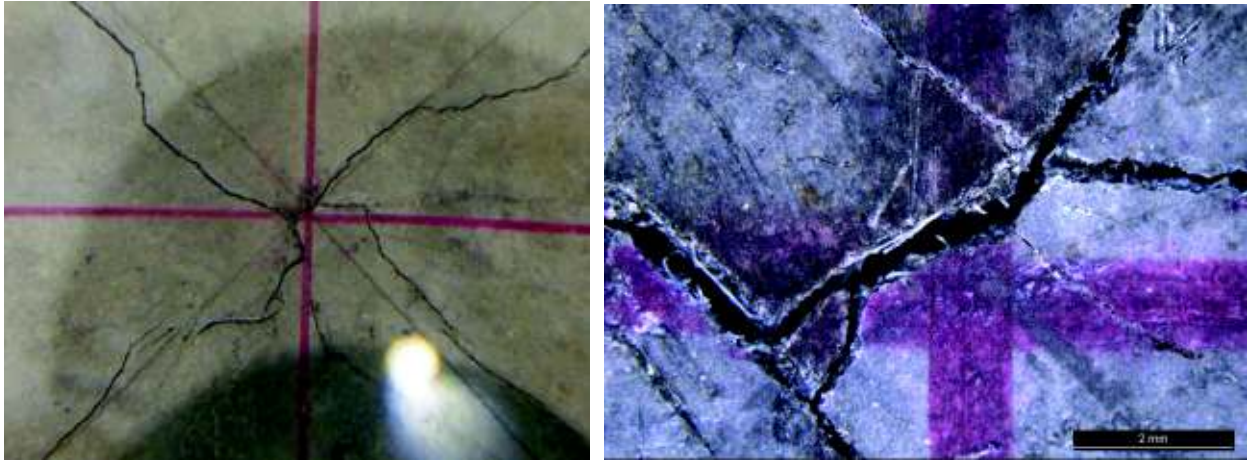


Fig. 6.62. M 1.4 SH, ciclul II, rețea microfisuri (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Sub evoluția șocurilor apariția microfisurilor și ramificațiilor noi însoțește lărgirea deschiderii fisurilor existente (Figura 6.63). Suplimentar, pe fața superioară a plăcii apar fisuri în zona de prindere a clamelor de fixare.

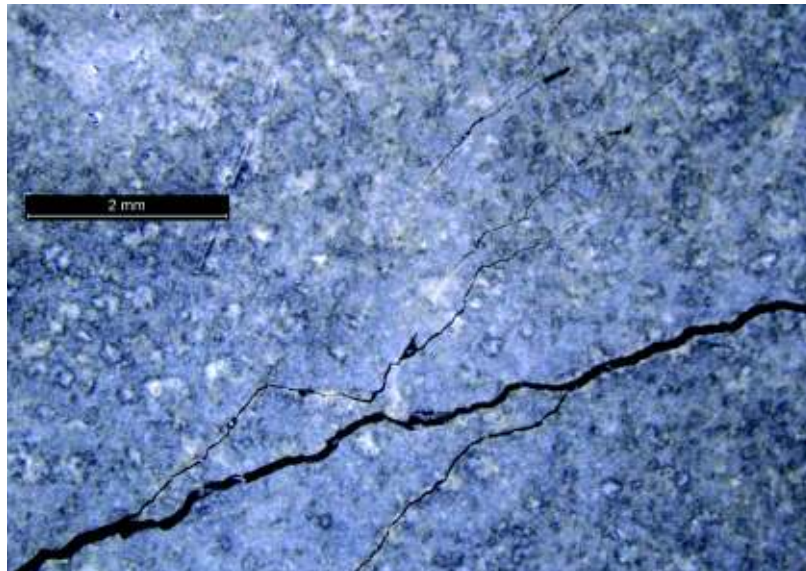


Fig. 6.63. M 1.4 SH, ciclul II, rețea microfisuri

Ciclul III, h = 1.5 m

Ciclul III de retestare induce un nivel ridicat de degradare în epruvetă, atât prin prisma deformațiilor cât și a deschiderii de fisurare: F1 atinge o deschidere maximă $w_{\max} = 1517.24 \mu\text{m}$ și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 1305.7 \mu\text{m}$ pe lungimea critică de 2-3 mm din zona centrală a plăcii (Figura 6.64). Sub evoluția șocurilor apariția microfisurilor și ramificațiilor noi însoțește lărgirea deschiderii fisurilor existente (Figura 6.65).

Pe partea superioară a epruvetei fisurile din zona de prindere a clemelor de fixare se deschid considerabil; suplimentar apar fisuri concentrice și radiale în zona centrală, de contact între bila metalică și placa ECC. După efectuarea acestui ciclu de încărcare se consideră atinsă ruperea în epruvetă, dar fără a se ajunge la dezintegrarea plăcii, inclusiv ciobiri, rupturi sau exfolieri masive.

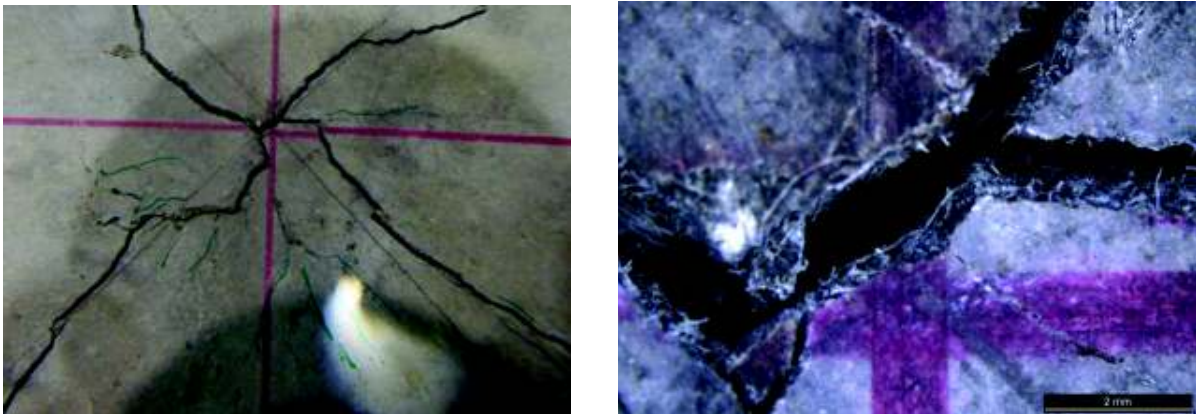


Fig. 6.64. M 1.4 SH, ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

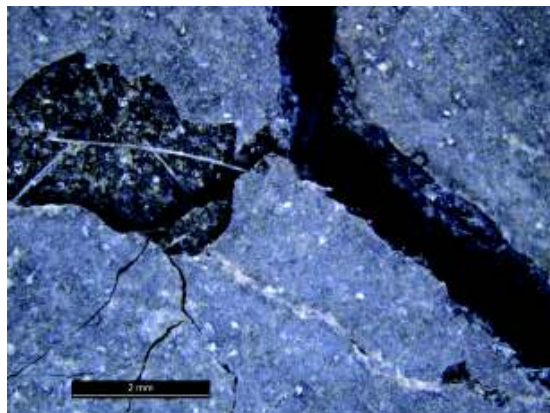


Fig. 6.65. M 1.4 SH, ciclul III

6.5.2 Compoziția ECC M 2.2

6.5.2.1 Specimenul M 2.2 R

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 2.2 R sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.2.

Ciclul I, $h=0.5\text{ m}$

Primul șoc ($n=1$) aplicat plăcii M 2.2 R induce apariția unei fisuri dezvoltate de-a lungul unei diagonale principale, cu deschiderea maximă de $w < 0.05\text{ mm}$, evaluată cu ajutorul lupei și riglei de fisuri. Al doilea șoc induce apariția a două fisuri, cu deschidere $w < 0.05\text{ mm}$; fisura inițială se deschide până la aproximativ $w \sim 0.1\text{ mm}$.

Ciclul I de încărcare induce o rețea radială de microfisuri, ($N \sim 15$) dezvoltată de-a lungul diagonalelor principale cu ramificațiile aferente. Fisura centrală prezintă deschiderea maximă $w_{\max} = 380.1\ \mu\text{m}$, și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 303.1\ \mu\text{m}$, înregistrată în partea centrală a plăcii, de-a lungul a 4.0-4.5 mm (vezi Figurile 6.66 și 6.67).

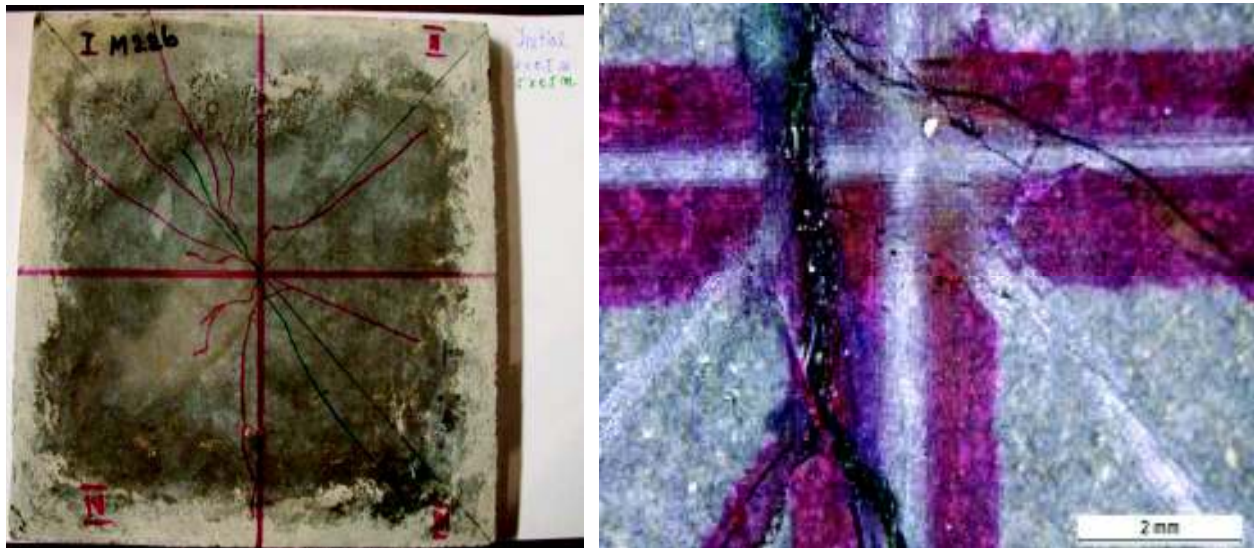


Fig. 6.66. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 2.2 R, ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Primul ciclu de încărcare nu induce apariția fisurilor pe partea superioară a plăcii, în zona centrală (de contact între epruvetă și corpul de impact) sau în zona de prindere a clamelor pentru fixarea probei în cadrul de încercare.

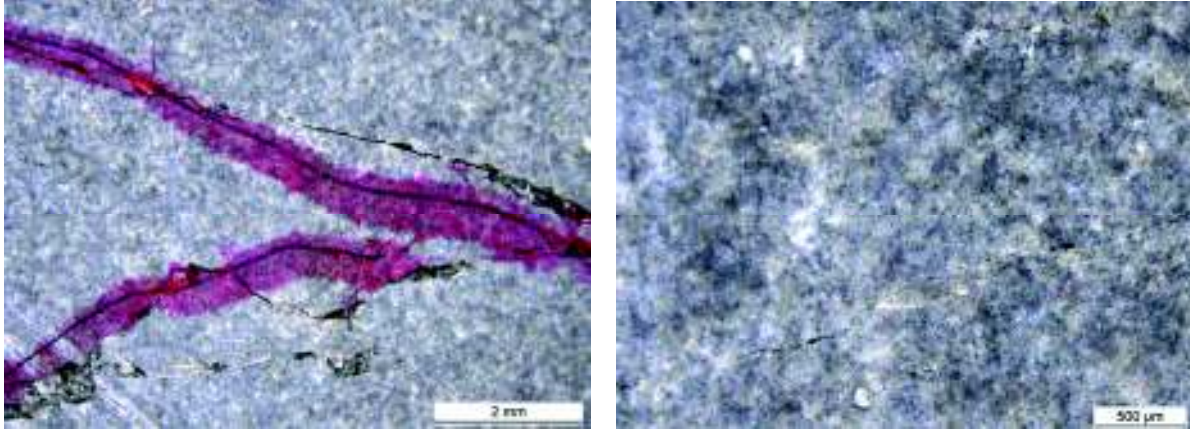


Fig. 6.67. M 2.24 R, ciclul I, rețea microfisuri

Ciclul II, h=1.0 m

Ciclul II de încărcare determină dezvoltarea rețelei de microfisuri prin extinderea acestora de-a lungul diagonalelor principale, lărgirea deschiderii acestora și apariția de ramificații adiacente și microfisuri discrete noi ($N \sim 25$, vezi Figura 6.67 stânga și Figura 6.68). Fisura centrală atinge deschiderea maximă $w_{\max} = 880.3 \mu\text{m}$, și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 720.6 \mu\text{m}$, în partea centrală a plăcii, pe lungimea critică de 4.0-4.5 mm (Figura 6.69).

Ciclul II de încărcare determină apariția fisurilor pe fața superioară a plăcii, în colțurile aferente prinderilor clamelor de fixare (vezi Anexa 6.3), dar nu în zona centrală.

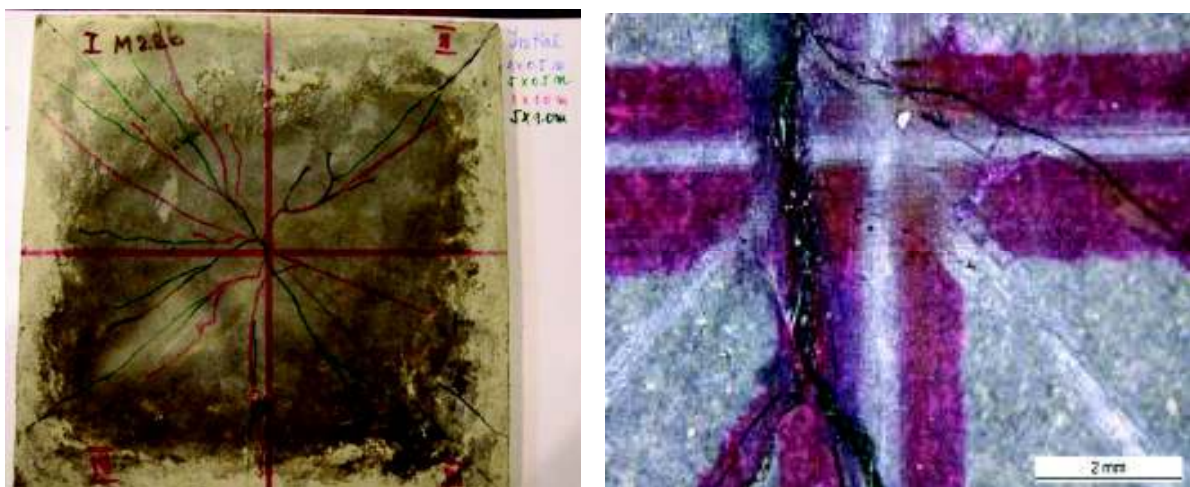


Fig. 6.68. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 2.2 R, ciclul II (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

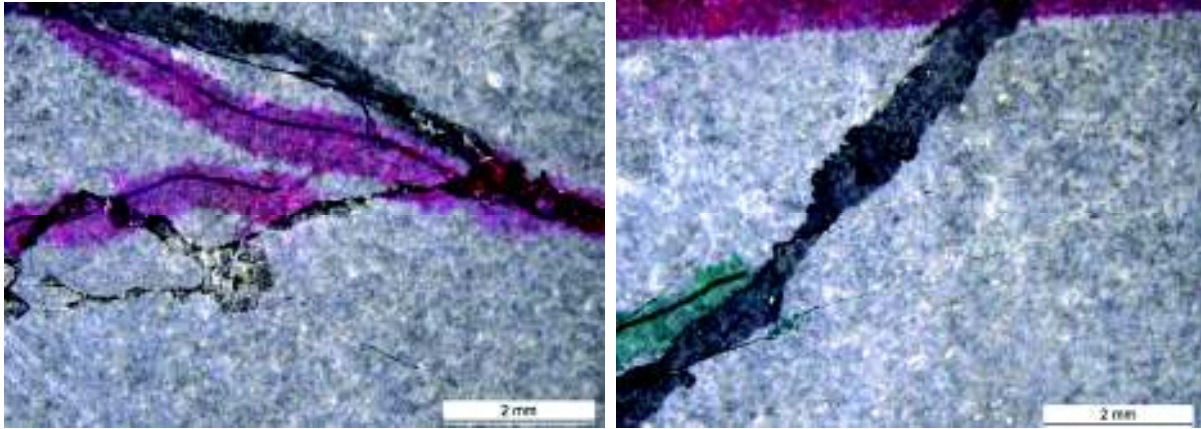


Fig. 6.69. M 2.24 R, Ciclul II, rețea microfisuri

Ciclul III, $h=1.5\text{ m}$

Ciclul III (5 șocuri de la înălțimea $h = 1.5\text{ m}$) determină lărgirea fisurilor existente până la valori critice. Deschiderea maximă atinge valoarea $w_{\max} = 1407.6\ \mu\text{m}$, în zona centrală a plăcii, cu o medie $w_{\max} = 1375.0\ \mu\text{m}$, determinată prin măsurători pe lungimea critică de 4.5 mm , în perimetrul median (vezi Figura 6.70, dreapta).

Rețeaua radială de microfisuri se extinde pe direcția diagonalelor principale, prin apariția de noi fisuri sau ramificații discrete. Suplimentar apar fisurile generate în zona de prindere a clamelor de fixare, dispuse, similar, pe direcția diagonalelor principale (vezi Figura 6.70, stânga și Figura. 6.71).

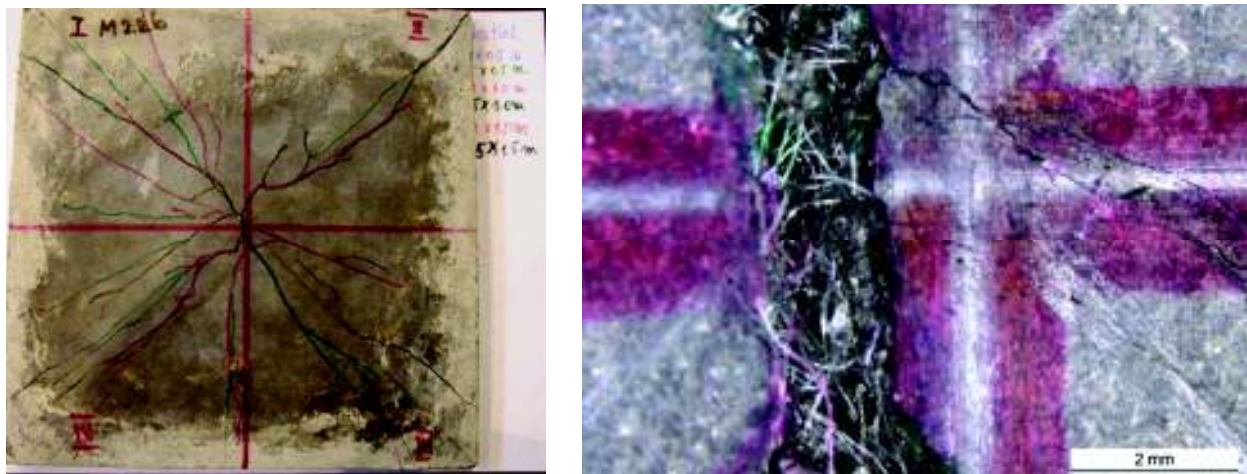


Fig. 6.70. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 2.2 R, ciclul III (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

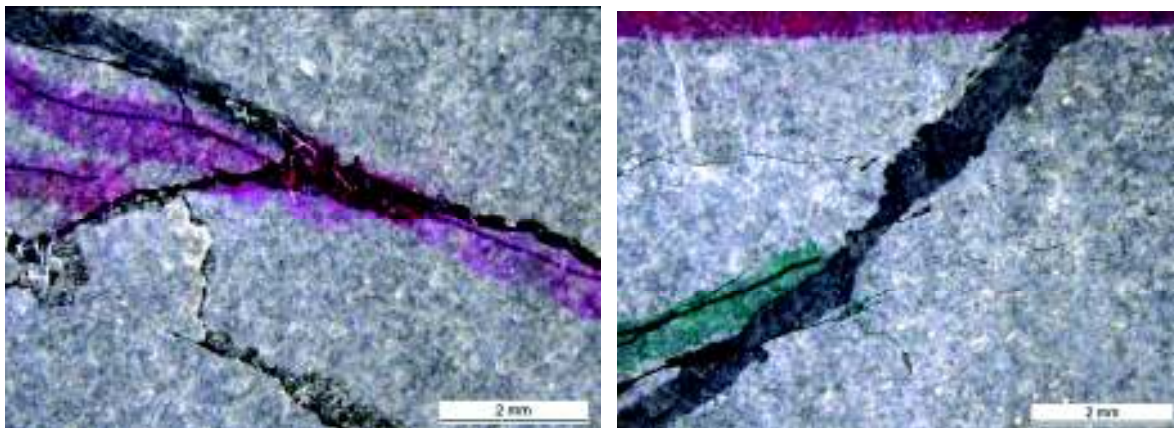


Fig. 6.71. M 2.2 R, ciclul III, rețea microfisuri

Pe fața superioară a epruvetei fisurile din zonele de prindere a clamelor devin critice; de asemenea în zona de centrală, de contact între cele două corpuri, apar microfisuri concentrice și de asemenea radiale, de-a lungul diagonalelor principale (Anexa 6.3). Ciclul III de încărcare este asimilat Ruperii prin nivelul de degradare indus în probă, atât din punct de vedere al deformației plastice cât și al deschiderii fisurilor. Suplimentar, placa este supusă unui șoc aplicat de la înălțimea $h = 2.0\text{m}$; degradările survenite sunt critice, preponderent prin deschiderea fisurilor în zona centrală ($w_{\max} > 2000 \mu\text{m}$, vezi Figura 6.72) însă nu se produce dezintegrarea probei.

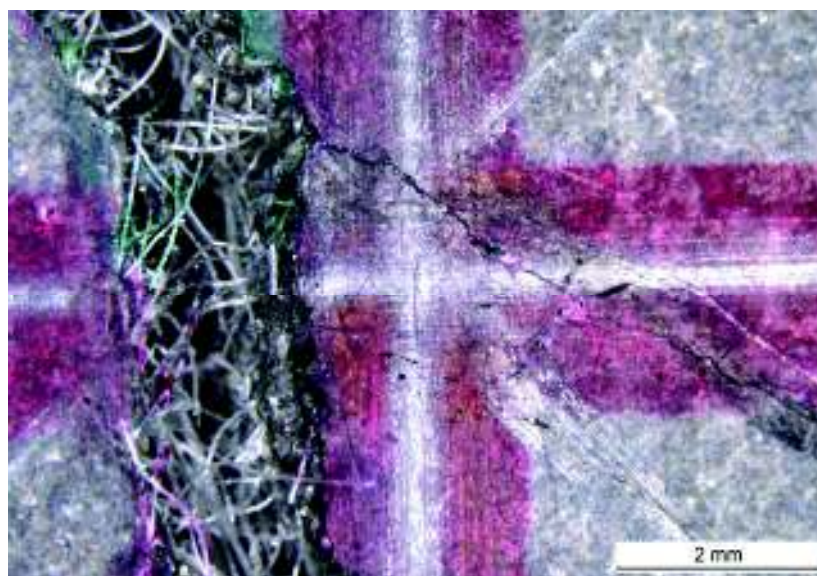


Fig. 6.72. M 2.2 R: Fisura din zona mediană după aplicare șocului ultime de la înălțimea $h = 2.0 \text{ m}$

6.5.2.2 Specimenul M 2.2 SH

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 2.2 SH sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.4.

Ciclul I, h = 0.5 m*

M 2.2 SH prezintă o comportare comparabilă cu a martorului M 2.2 R sub primul ciclu de încărcare, respectiv dezvoltarea unei rețele radiale de aproximativ 9-10 microfisuri, de-a lungul diagonalelor principale, cu ramificații adiacente (Figura 6.73, stânga). Deschiderea maximă atinge valoarea $w_{\max} = 356.02 \mu\text{m}$, în zona centrală a plăcii, cu o medie $w_{\max} = 245.6 \mu\text{m}$, determinată prin măsurători pe lungimea critică de 3.2-3.5 mm, în perimetrul median (vezi Fig. 6.73, dreapta).

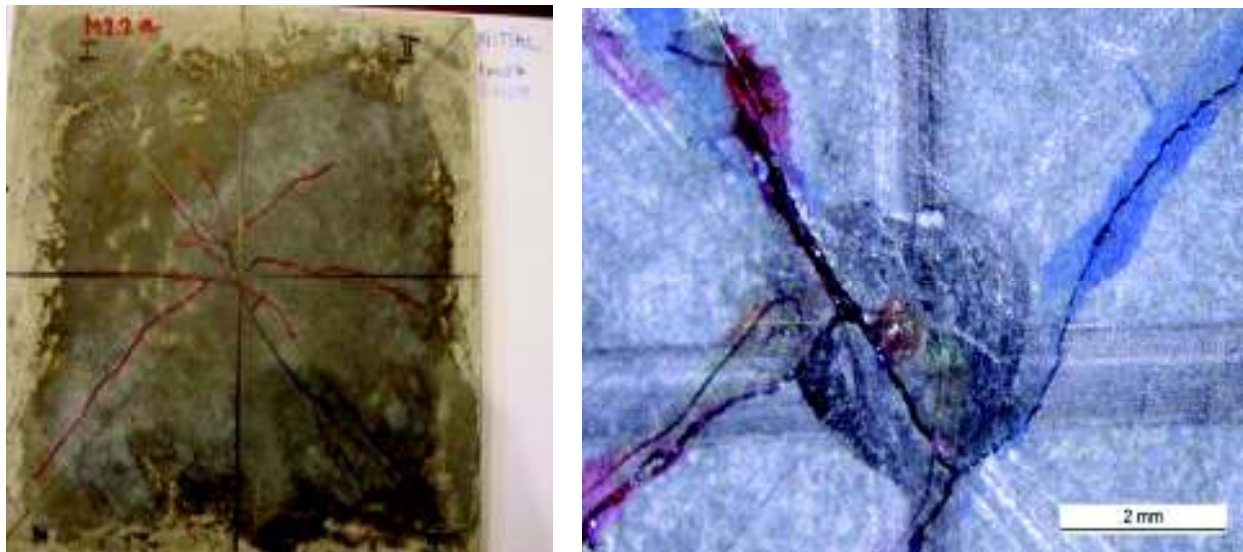


Fig. 6.73. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 2.2 SH, Ciclul I* (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Evoluția fisurilor și ramificațiilor adiacente este similară, cu deschideri de fisurare stabilizate în intervalul 50-80 μm , sensibil mai mari comparativ cu compoziția M 2.2; Spre extremitățile epruvetei deschiderea acestora se reduce. Ramificațiile și microfisurile discrete, cu deschideri $< 15 \mu\text{m}$ sunt observate prin evaluare microscopică.

Pe fața superioară a plăcii se remarcă apariția timpurie a fisurilor localizate în colțuri, în vecinătatea clamelor de fixare (vezi Anexa 6.4).

Evaluarea capacității de auto-sigare (SS) după expunerea epruvetei condiționării SH (28 cicluri)

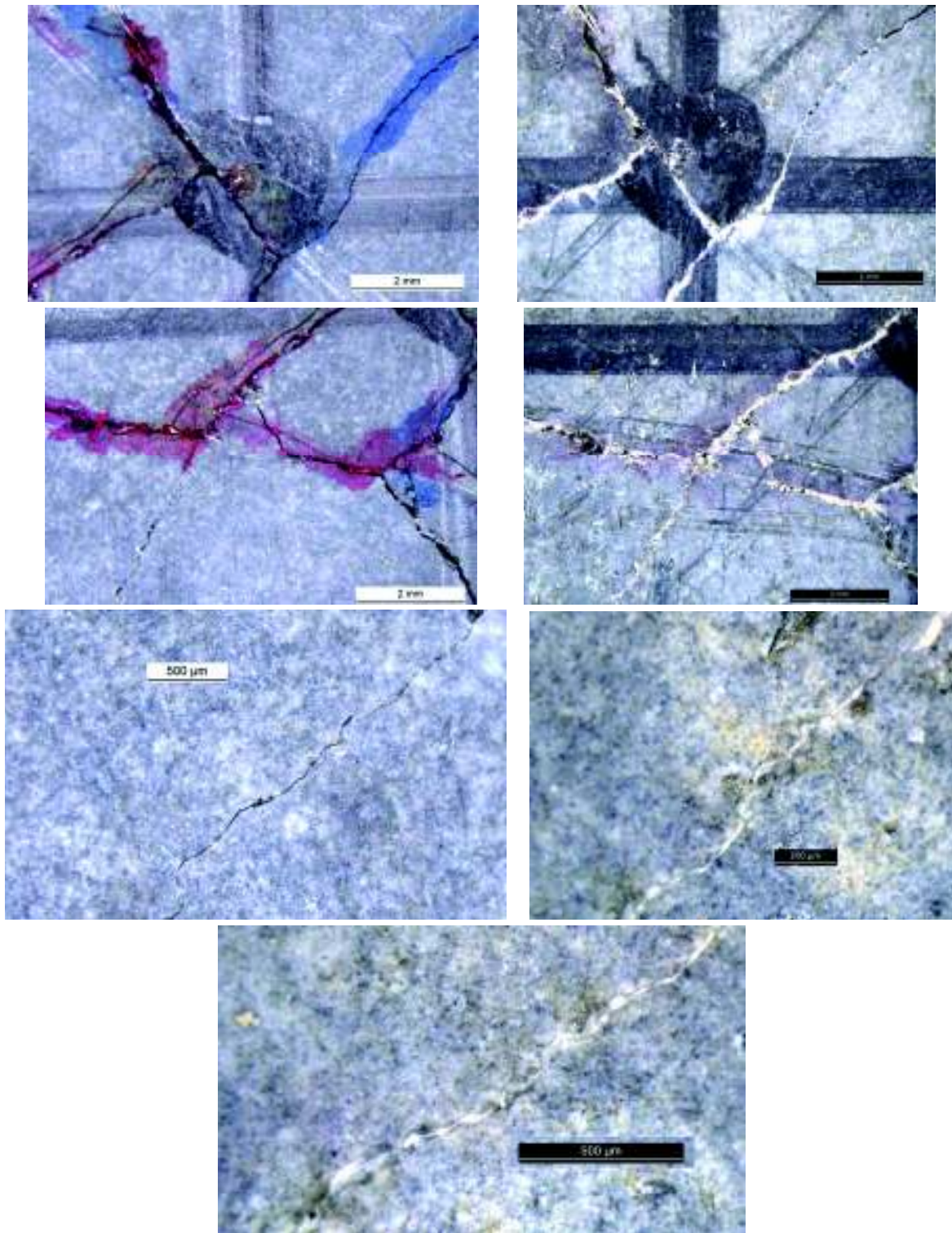


Fig. 6.74. M 2.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS

Evaluarea epruvetei M 2.2 SH după expunerea la cele 28 de cicluri de autovindecare indică formarea produșilor de precipitare în fisurile rețelei dezvoltate în primul ciclu de șocuri. Figura 6.74 prezintă comparativ, aspectul fisurii înainte (stânga) și după (dreapta) expunerea la condiționarea SH. Analiza microscopică arată ca posibilă închiderea completă a fisurilor cu deschidere mică, $w < 40 \mu\text{m}$ și sigilarea parțială a fisurilor cu deschideri mai mari ($w > 60 \mu\text{m}$).

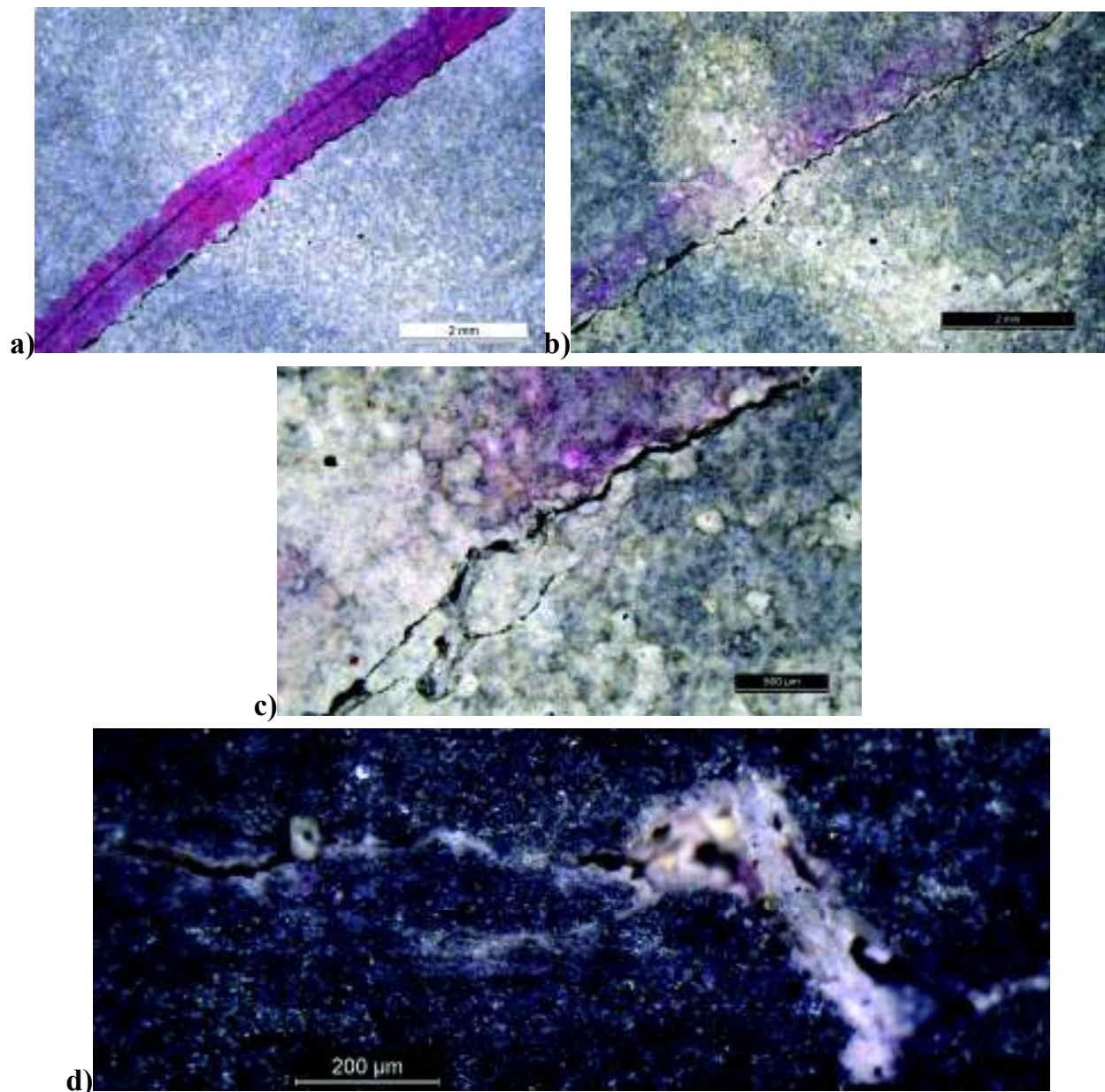


Fig. 6.75. M 2.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; Fisuri cu grad redus de sigilare

În același timp se remarcă existența unor arii sau fisuri în care nu a fost semnalată prezența vizibilă a produșilor de precipitare, respectiv a cristalelor de carbonat de calciu (Fig. 6.75, a, b); este posibilă existența produșilor de hidratare continuă, C-S-H, a căror textură este distinctă de cea a cristalelor de Ca_2CO_3 și mai dificil de identificat.

Detaliile (Fig. 6.75, c și d), ce prezintă imagini din interiorul microfisurii, surprinse cu un grad mai ridicat de amplificare, indică prezența unor compuși pe buza pereților de fisurare, compuși cu aspect diferit de produșii dezvoltați în fisurile curente (vezi Figura 6.74).

Retestare la vârsta de 270 zile, ciclul I, h = 0.5 m

Ciclul I (5 x h = 0.5 m) din etapa de retestare a plăcii M 2.2 SH determină deschiderea suplimentară a fisurilor principale și ramificațiilor dezvoltate în timpul ciclului inițial I*, în zona centrală a probei, cea mai solicitată din punctul de vedere a stării de eforturi și deformații. Fisura F1, evaluată în centrul epruvetei, prezintă o creștere a deschiderii maxime până la valoarea $w_{\max} = 530.7 \mu\text{m}$ și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 450.4 \mu\text{m}$, evaluată pe lungimea critică de 3.5 mm. (Figura 6.76).

Se remarcă extinderea ramificațiilor fisurilor inițiale și de asemenea evoluția fisurilor din partea superioară a epruvetei, în zona de prindere a clamelor.



Fig. 6.76. M 2.2 SH, ciclul I, rețea microfisuri

Ciclul II, h = 1.0 m

Ciclul II de retestare implică deschiderea considerabilă a fisurii F 1, care pe lungimea critică de 2-3 mm atinge o deschidere maximă $w_{\max} = 903.17 \mu\text{m}$ și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 724.09 \mu\text{m}$ (Figura 6.77).

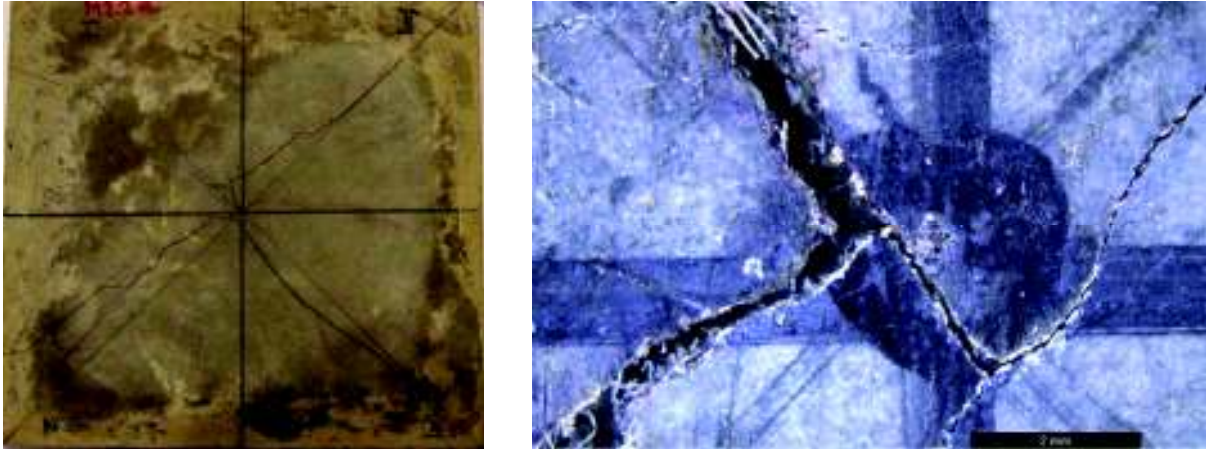


Fig. 6.77. M 2.2 SH, ciclul II, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Sub succesiunea șocurilor din ciclul II de retestare, fisurile existente ale probei M 2.2 SH își largesc deschiderea (Figura 6.78), odată cu apariția unor microfisuri și ramificații noi, confirmând capacitatea preconizată de microfisurare sub sarcină (vezi Figura 6.79).

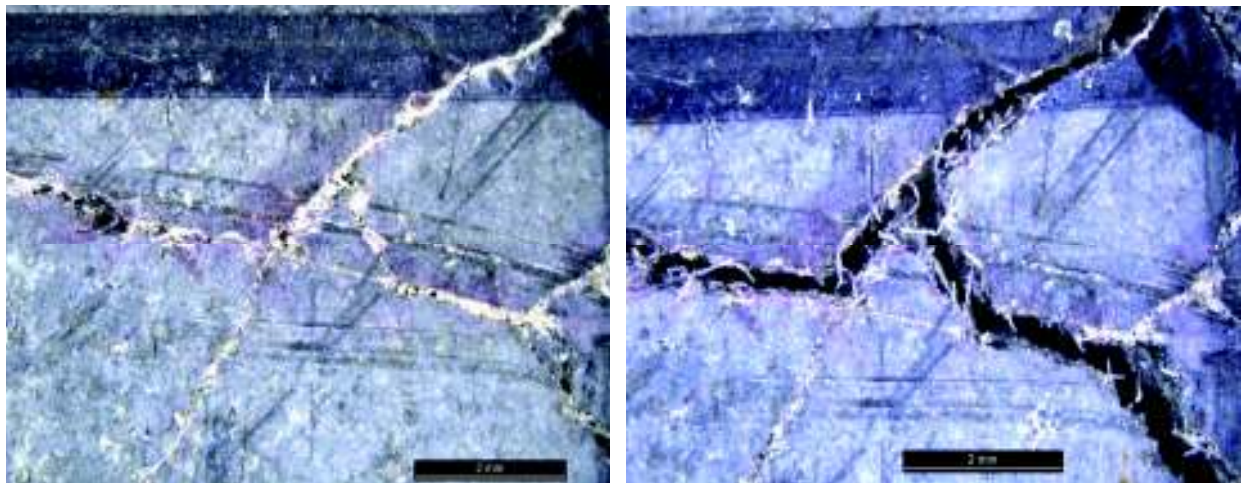


Fig. 6.78. M 2.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare)

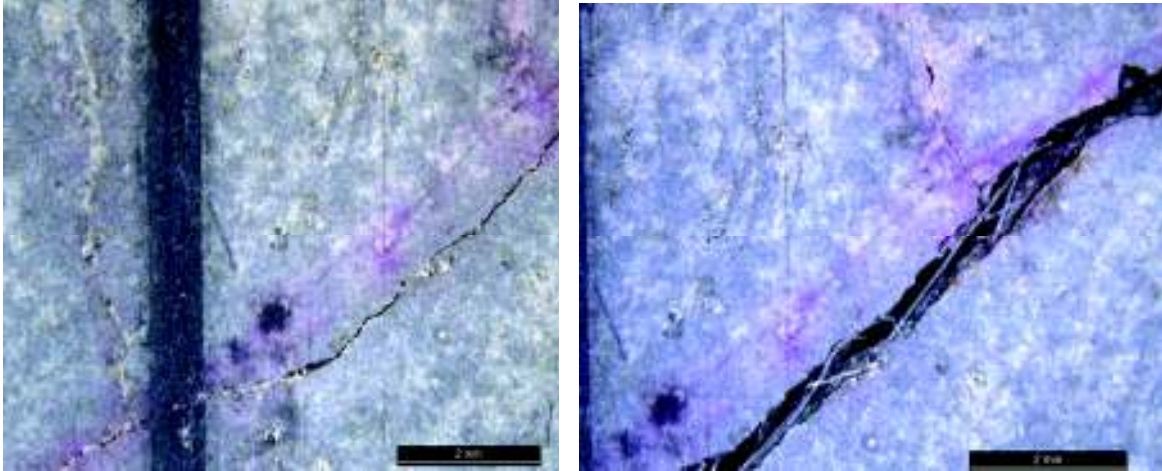


Fig. 6.79. M 2.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare – microfisură nouă și fisură ce redeschisă sub șocuri)

În același timp sunt remarcate fisuri care, sigilate (parțial sau integral după condiționarea SH), se mențin constante și după ciclul II de retestare, confirmând astfel eficiența capacității SH și sub aspect de Auto-Reparare (SR), respectiv dezvoltarea unor produși de sigilare care dovedesc rezistență sub noi solicitări fizico-mecanice (Fig. 6.80).

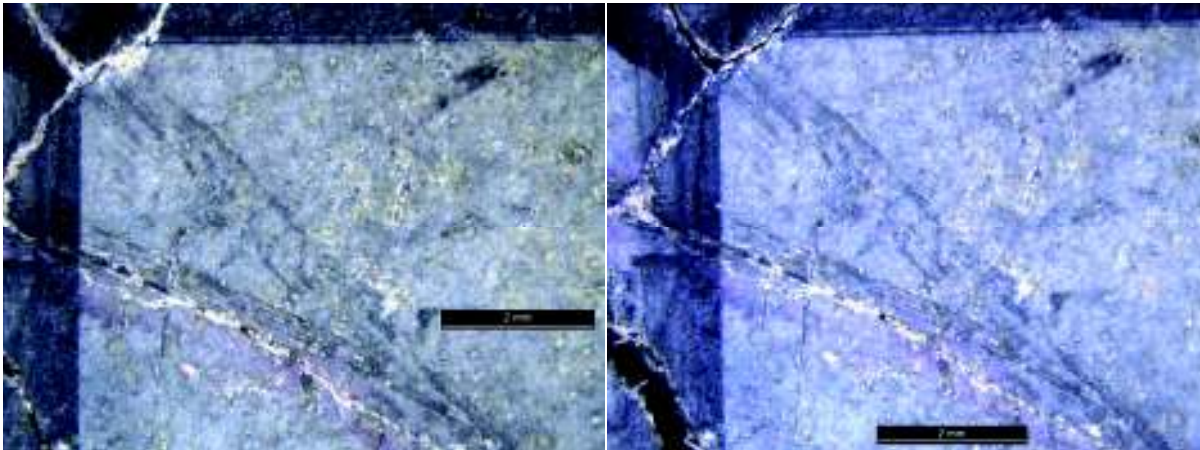


Fig. 6.80. M 2.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare)

Fisurile inițiale de la partea superioară a epruvetei, dezvoltate încă din primul ciclu de încărcare, se deschid considerabil; suplimentar, se dezvoltă fisuri noi, paralele cu cele inițiale și perpendicular pe diagonalele principale ale plăcii (Anexa 6.4). Se prefigurează discrete microfisuri în zona mediană, de contact între corpul de impact și epruvetă.

Ciclul III, h = 1.5 m

Ciclul III de retestare induce un nivel ridicat de degradare în epruvetă, atât prin prisma deformațiilor cât și a deschiderii de fisurare: F1 atinge o deschidere maximă $w_{\max}=1905.124 \mu\text{m}$ și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 1798.0 \mu\text{m}$ pe lungimea critică de 2-3 mm din zona centrală a plăcii (Figura 6.81).



Fig. 6.81. M 2.2 SH, Ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Pe partea superioară a epruvetei fisurile din zona de prindere a clemelor de fixare devin critice și induc Ruperea; Ciclul II de retestare este oprit odată cu efectuarea celui de-al treilea șoc, epruveta fiind aproape de dezintegrare în zona colțurilor (vezi Anexa 6.4). Suplimentar, fisurile din zona de contact sunt de asemenea semnificative.

Spre deosebire de martorul M 2.2 R, Epruveta M 2.2 SH dezvoltă un număr considerabil mai redus de microfisuri inițiate cu fiecare șoc aplicat și implicit un nivel accelerat de deschidere a fisurilor principale, inițiate de-a lungul diagonalelor principale (Figura 6.81). Această inhibare a compozitului de a dezvolta microfisuri noi este considerată a fi cauza ruperii prin dezintegrarea colțurilor, înainte de finalizarea ciclului III.

6.5.3 Compoziția ECC M 3.2

6.5.3.1 Specimenul M 3.2 R

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 3.2 R sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.5.

Ciclul I, $h=0.5$ m

Primul șoc ($n=1$) aplicat plăcii M 3.2 R induce apariția unei fisuri dezvoltate de-a lungul unei diagonale principale, cu deschiderea maximă de $w < 0.05$ mm, evaluată cu ajutorul lupei și riglei de fisuri. Al doilea șoc induce apariția a două fisuri, cu deschidere $w < 0.05$ mm; fisura inițială se deschide până la aproximativ $w \sim 0.1$ mm, similar probelor M 1.4 sau M 2.2.

Ciclul I de încărcare induce o rețea radială de microfisuri, ($N \sim 10-11$) dezvoltată de-a lungul diagonalelor principale cu ramificațiile aferente. Fisura centrală prezintă deschiderea maximă $w_{\max} = 322.95 \mu\text{m}$, și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 287.41 \mu\text{m}$, înregistrată în partea centrală a plăcii, de-a lungul a 3.0-4.0 mm (Figura 6.82). Evoluția tipică a rețelei de fisuri, cu ramificațiile și microfisurile discrete formate sub șoc este prezentată în Figura. 6.83, confirmând capacitatea previzionată de microfisurare sub sarcină. Primul ciclu de încărcare nu induce apariția fisurilor pe partea superioară a plăcii, în zona centrală (de contact între epruvetă și corpul de impact) sau în zona de prindere a clamelor pentru fixarea probei în cadrul de încercare.

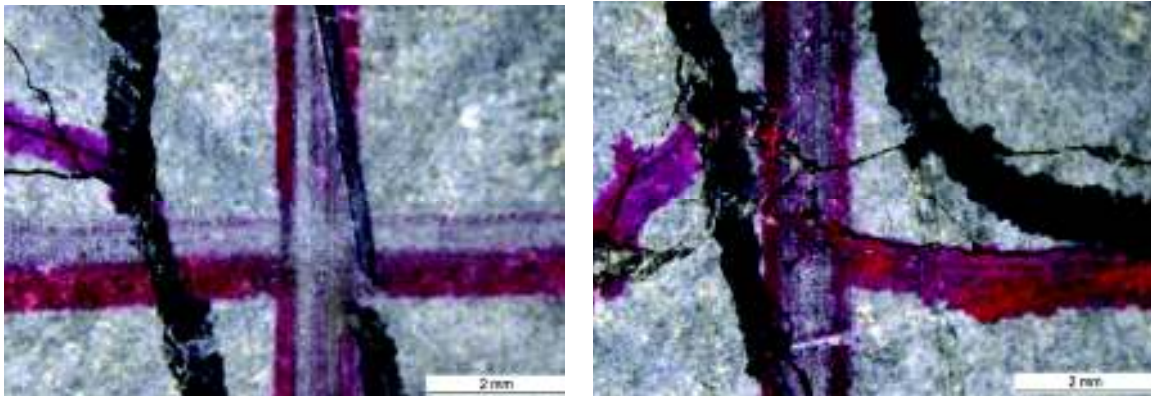


Fig. 6.82. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 R, ciclul I, detalii (microscop) pentru perimetrul central

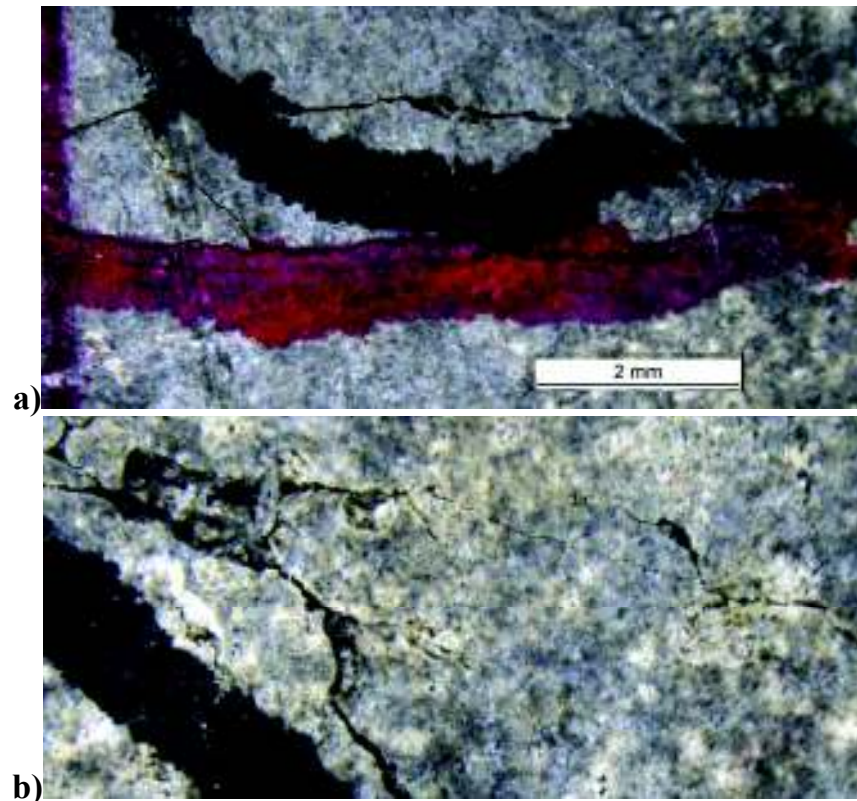


Fig. 6.83. M 3.2 R, ciclul I, rețea microfisuri: a) microfisuri cu ramificații; b) microfisuri discrete $w=8...15 \mu\text{m}$

Ciclul II, $h=1.0 \text{ m}$

Ciclul II de încărcare determină dezvoltarea rețelei de microfisuri prin extinderea acestora de-a lungul diagonalelor principale, lărgirea deschiderii acestora și apariția de ramificații adiacente și microfisuri discrete noi (N~15-18, vezi Figurile 6.84 și 6.85).

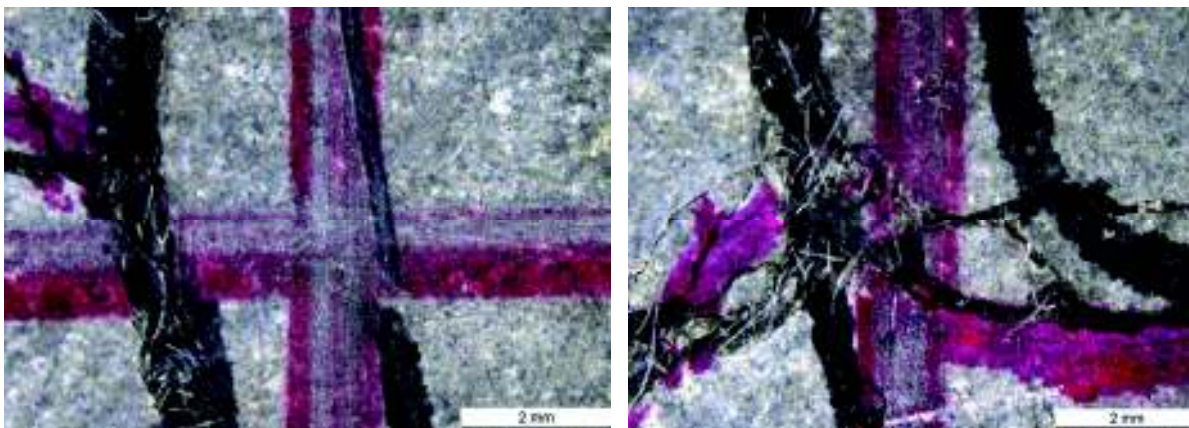


Fig. 6.84. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 R, Ciclul II, detalii (microscop) pentru perimetrul central

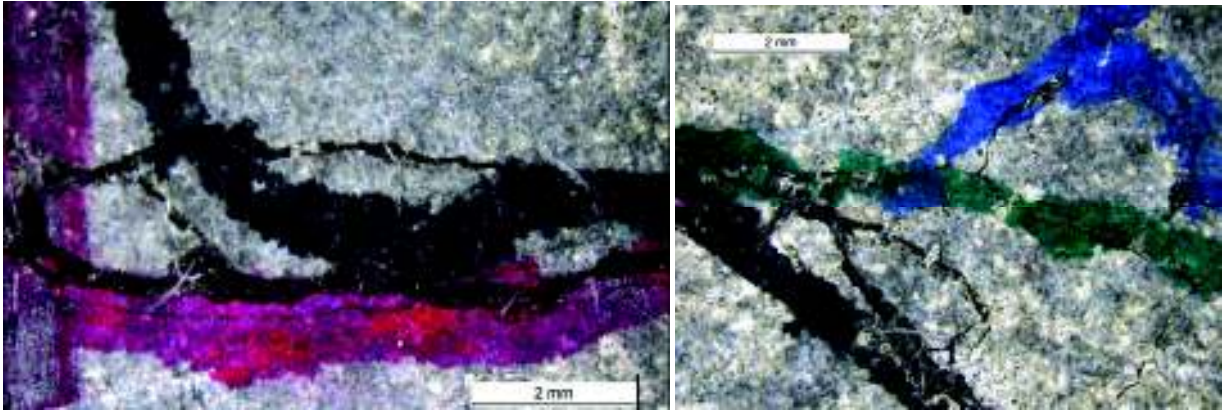


Fig. 6.85. M 3.2 R, ciclul II, rețea microfisuri

Fisura centrală atinge deschiderea maximă $w_{\max}=804.6 \mu\text{m}$, și o deschidere medie $w_{\text{med}}=666.9 \mu\text{m}$, evaluată pe lungimea critică de 3.0-4.0 mm, în partea centrală a plăcii (vezi Figura 6.84).

Ciclul II de încărcare determină apariția fisurilor pe fața superioară a plăcii, în trei din cele 4 colțuri aferente prinderilor clamelor de fixare, încă de la primul șoc aplicat de la înălțimea de 1.0 m. Aria centrală, de contact între bila metalică și placa ECC M 4.2, nu prezintă fisuri vizibile cu lupa de fisuri. Finalul ciclului II induce deschiderea semnificativă a fisurilor din zona de prindere clame.

Ciclul III, $h=1.5 \text{ m}$

Ciclul III (5 șocuri de la înălțimea $h = 1.5 \text{ m}$) determină lărgirea fisurilor existente până la valori critice. Deschiderea maximă atinge valoarea $w_{\max} = 2212.88 \mu\text{m}$, în zona centrală a plăcii, cu o medie $w_{\max} = 2129.4 \mu\text{m}$, determinată prin măsurători pe lungimea critică de 3.5 mm, în perimetrul median (vezi Figura 6.86, dreapta). Valorile deschideri maxime depășesc substanțial cele determinate pentru compozițiile M 1.4 și M 2.2, la nivel similar de solicitare. La modul general, odată cu creșterea cantității de cenușă FA din compoziția ECC, deschiderea de fisurare crește în consecință, fapt remarcat și în cazul testelor 4PB (vezi Capitolul 5). Rețeaua radială de microfisuri se extinde pe direcția diagonalelor principale, prin apariția de noi fisuri sau ramificații discrete (vezi Figura 6.87), confirmând capacitatea de dezvoltare microfisuri sub evoluția sarcinii (succesiunea șocurilor). Pe fața superioară a epruvetei fisurile din zonele de prindere a clamelor devin

critice; de asemenea în zona de centrală, de contact între cele două corpuri, apar microfisuri concentrice și de asemenea radiale, de-a lungul diagonalelor principale (Anexa 6.5).

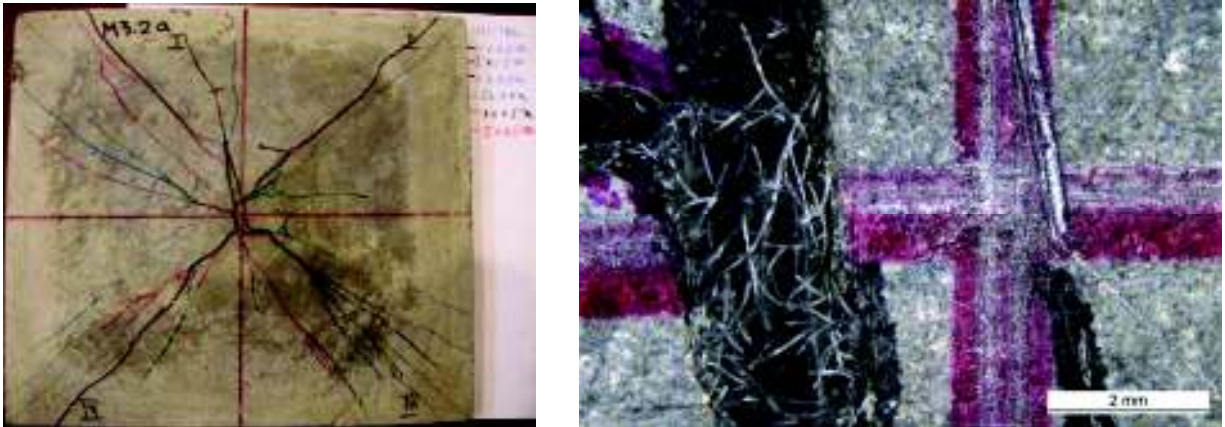


Fig. 6.86. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 R, Ciclul III (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

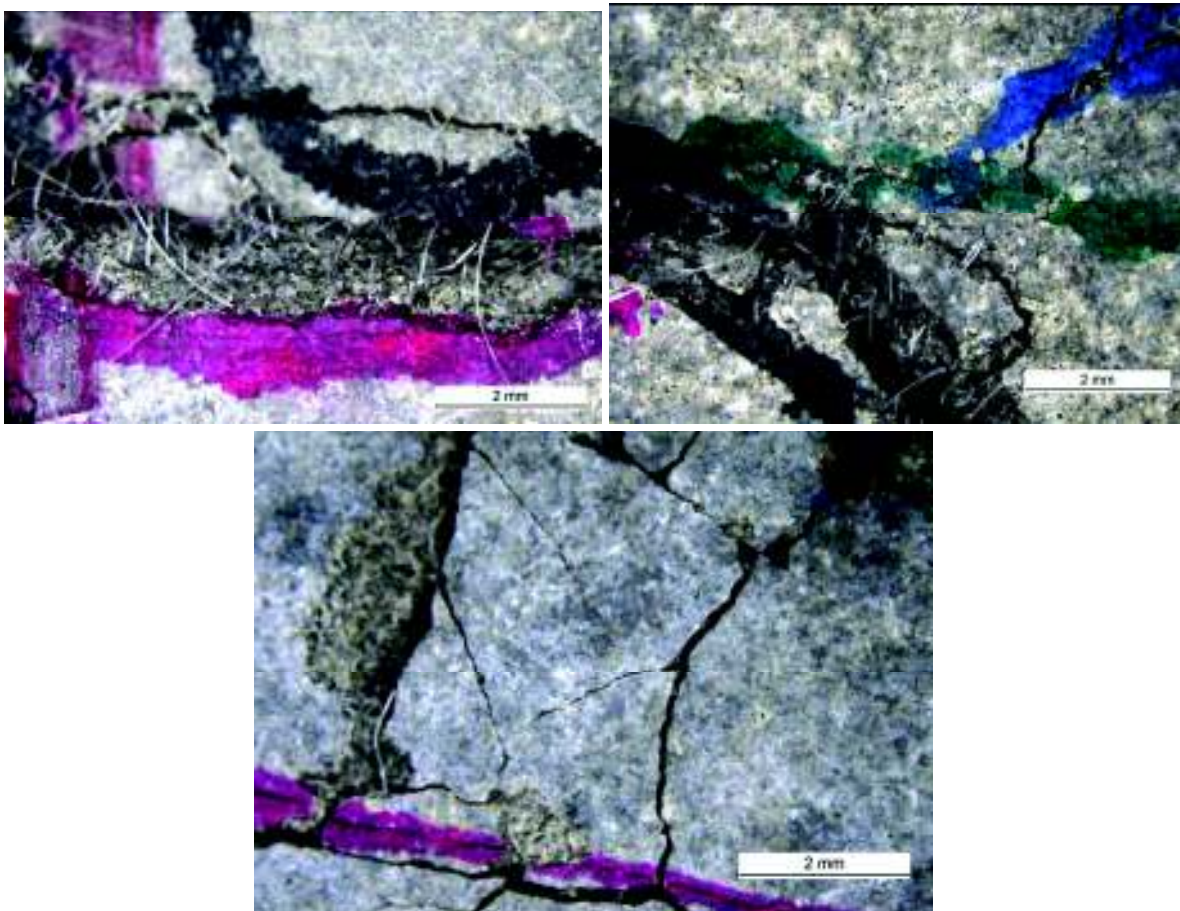


Fig. 6.87. M 3.2 R, ciclul III, rețea microfisuri

Ciclul III de încărcare este asimilat ruperii prin nivelul de degradare indus în probă, atât din punct de vedere al deformației plastice cât și al deschiderii fisurilor. Este consemnat faptul că proba nu se dezintegrează și își menține integritatea, nu se remarcă rupturi, spărturi, desprinderi din corpul acesteia.

6.5.3.2 Specimenul M 3.2 SH

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 3.2 SH sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.6.

Ciclul I*, $h = 0.5 m$

M 3.2 SH prezintă o comportare comparabilă cu a martorului M 3.2 R sub primul ciclu de încărcare, respectiv dezvoltarea unei rețele radiale de aproximativ 9-10 microfisuri, de-a lungul diagonalelor principale, cu ramificații adiacente (Figura 6.88, stânga). Deschiderea maximă identificată în zona centrală a plăcii, pe lungimea critică de aproximativ 0.5 mm, atinge valoarea $w_{max} = 401.8 \mu m$ și o valoare medie $w_{med} = 326.87 \mu m$. Media deschiderii de fisurare, aferentă celor cinci microfisuri radiale ce pornesc din punctul critic este de $w_{med} = 126.65 \mu m$.

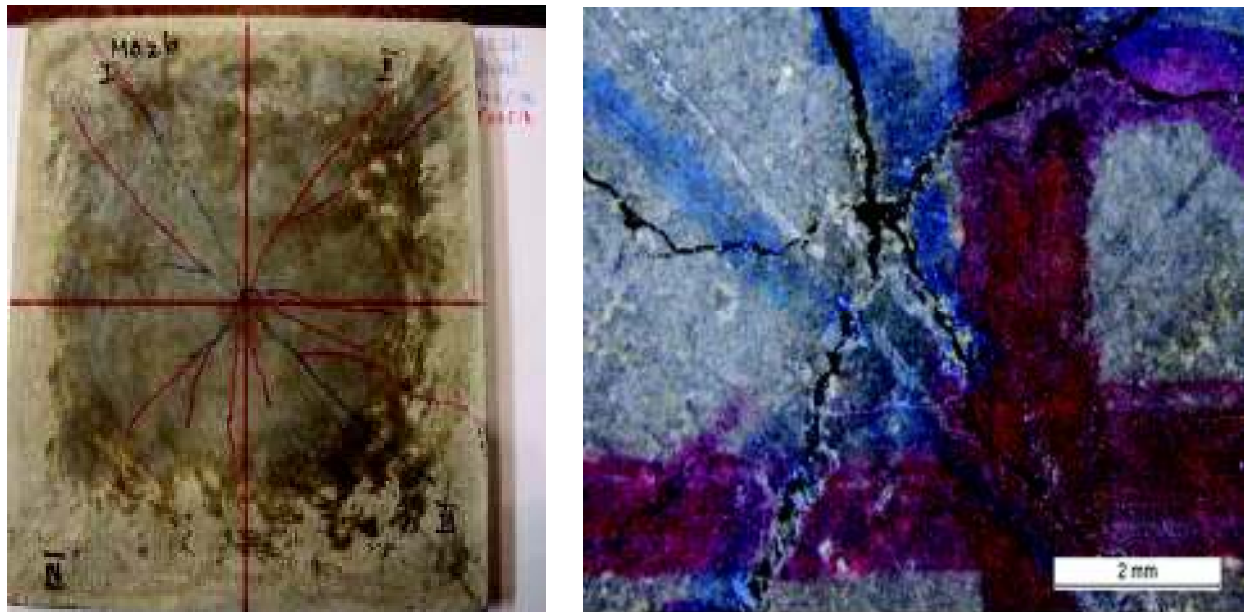


Fig. 6.88. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 3.2 SH, ciclul I* (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Evoluția fisurilor și ramificațiilor adiacente este similară, cu deschideri de fisurare stabilizate în intervalul 50-80 μm , sensibil mai mari comparativ cu compoziția M 3.2; Spre extremitățile epruvetei deschiderea acestora se reduce. Ramificațiile și microfisurile discrete, cu deschideri $< 15 \mu\text{m}$ sunt observate prin evaluare microscopică.

Pe fața superioară a plăcii se remarcă apariția timpurie a fisurilor localizate în colțuri, în vecinătatea clamelor de fixare (Vezi Anexa 6.4).

Evaluarea capacității de auto-sigare (SS) după expunerea epruvetei condiționării SH (28 cicluri)

Evaluarea epruvetei M 3.2 SH după expunerea la cele 28 de cicluri de autovindecare indică formarea aleatorie a produșilor de sigilare în fisurile rețelei dezvoltate în primul ciclu de șocuri. Figura 6.89 prezintă comparativ, aspectul fisurii

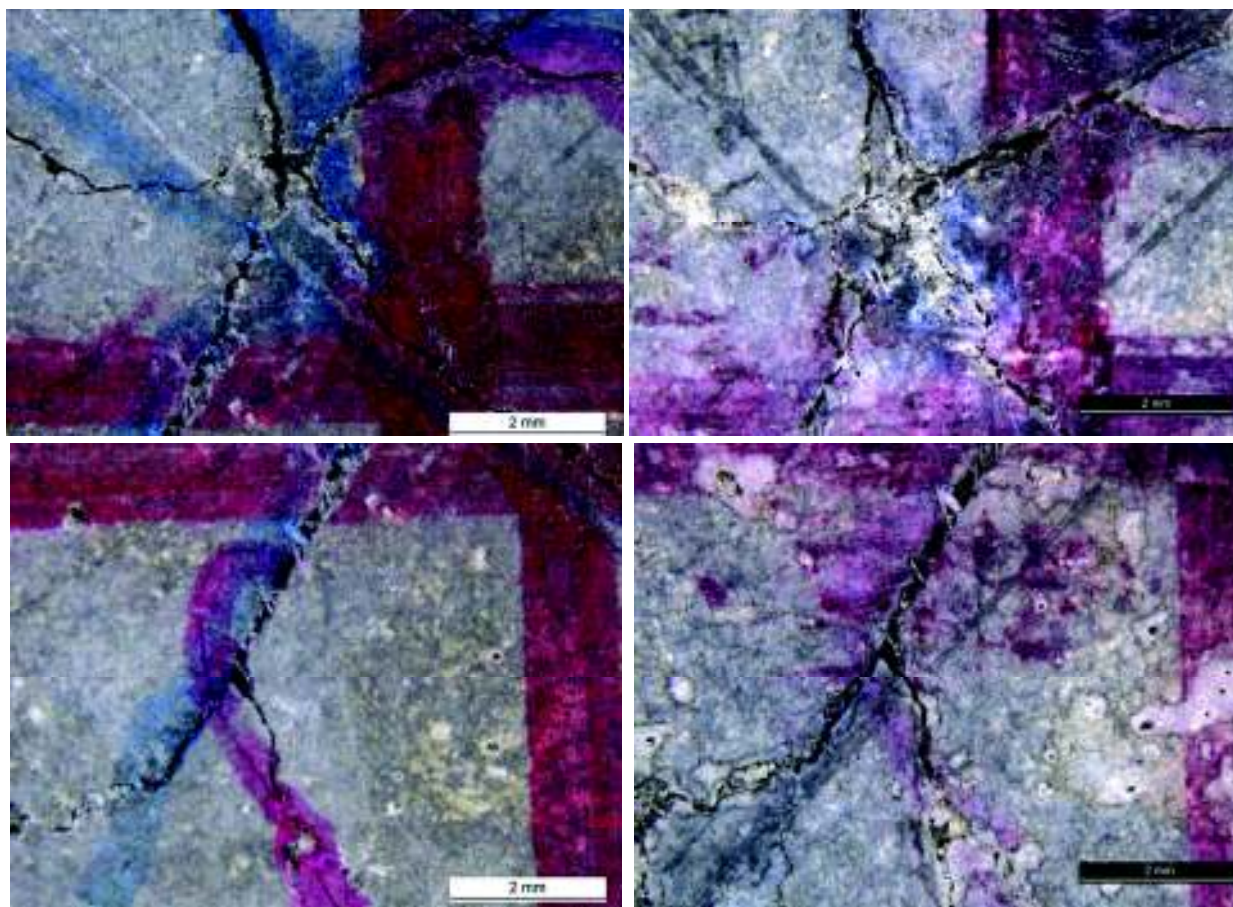


Fig. 6.89. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS: fisuri nesigilate după expunerea probei la condiționarea SH

înainte (stânga) și după (dreapta) expunerea la condiționarea SH. Analiza microscopică arată că eficiența de Auto -Sigilare (SS) este mai redusă în cazul compoziției M 3.2 decât în cazul compozițiilor M 1.4 sau M 3.2 9 (vezi Figura 6.89): incidența produșilor de precipitare este aleatoare, semnificativ mai puțin omogenă ca în cazul compoziției M 1.4.

Similar compoziției M 2.2, analiza microscopică pentru proba M 3.2 identifică pe buza fisurilor posibili produși de hidratare continuă; nu au aspect de cristal (specific carbonatului de calciu) și nu sigilează complet fisurile (Figura 6.90).

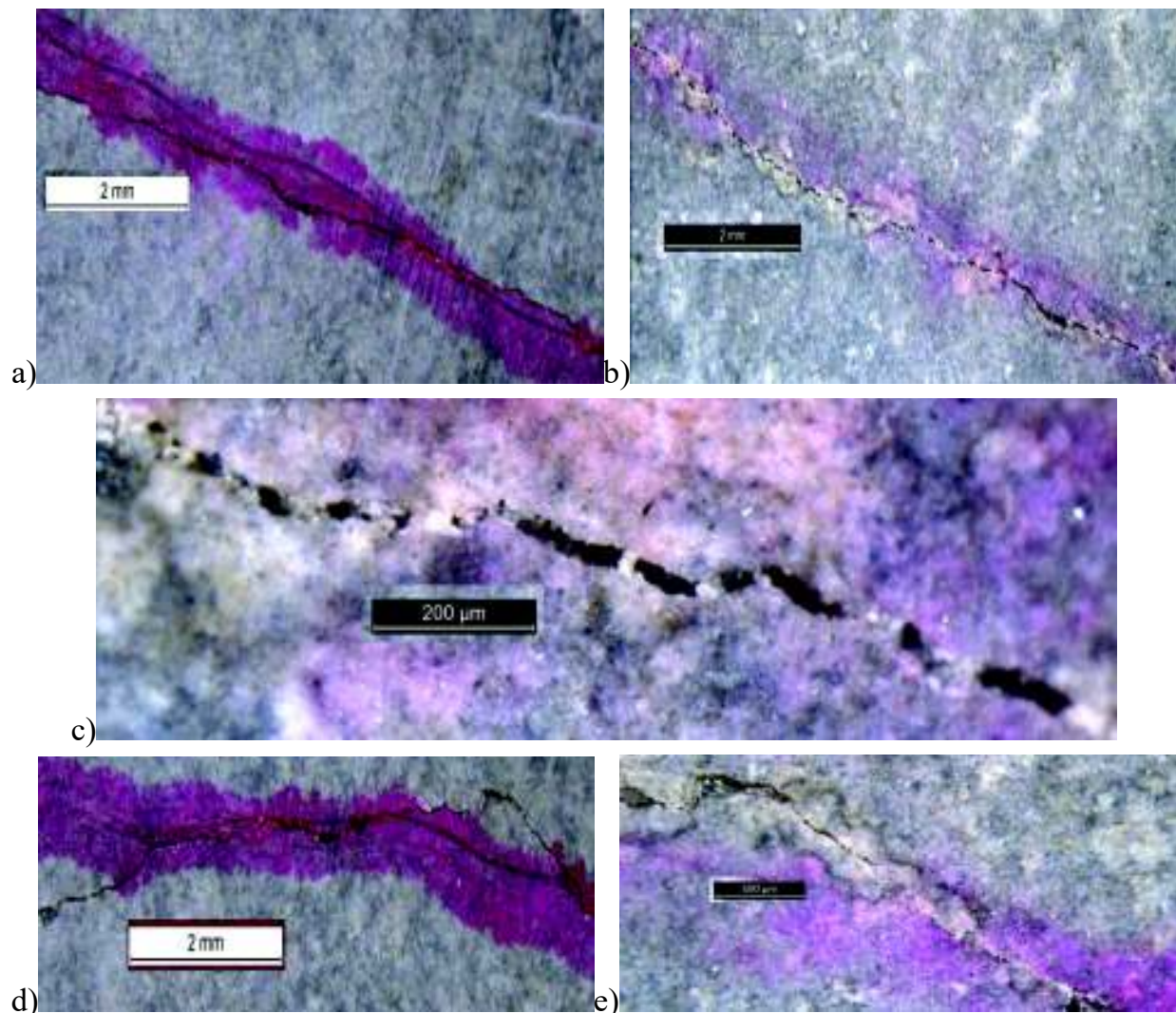


Fig. 6.90. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri cu grad redus de sigilare: a): fisură inițială după ciclul I*; b), c): fisură parțial închisă după condiționarea SH și detaliu produși de sigilare; d) fisură inițială; e) fisură parțial închisă

Este identificată ca posibilă închiderea completă a fisurilor cu deschidere mică, $w < 30\mu\text{m}$ și sigilarea parțială, aleatorie a fisurilor cu deschideri mai mari ($w > 60\mu\text{m}$) (vezi Figurile 6.91, 6.92 și 6.93).

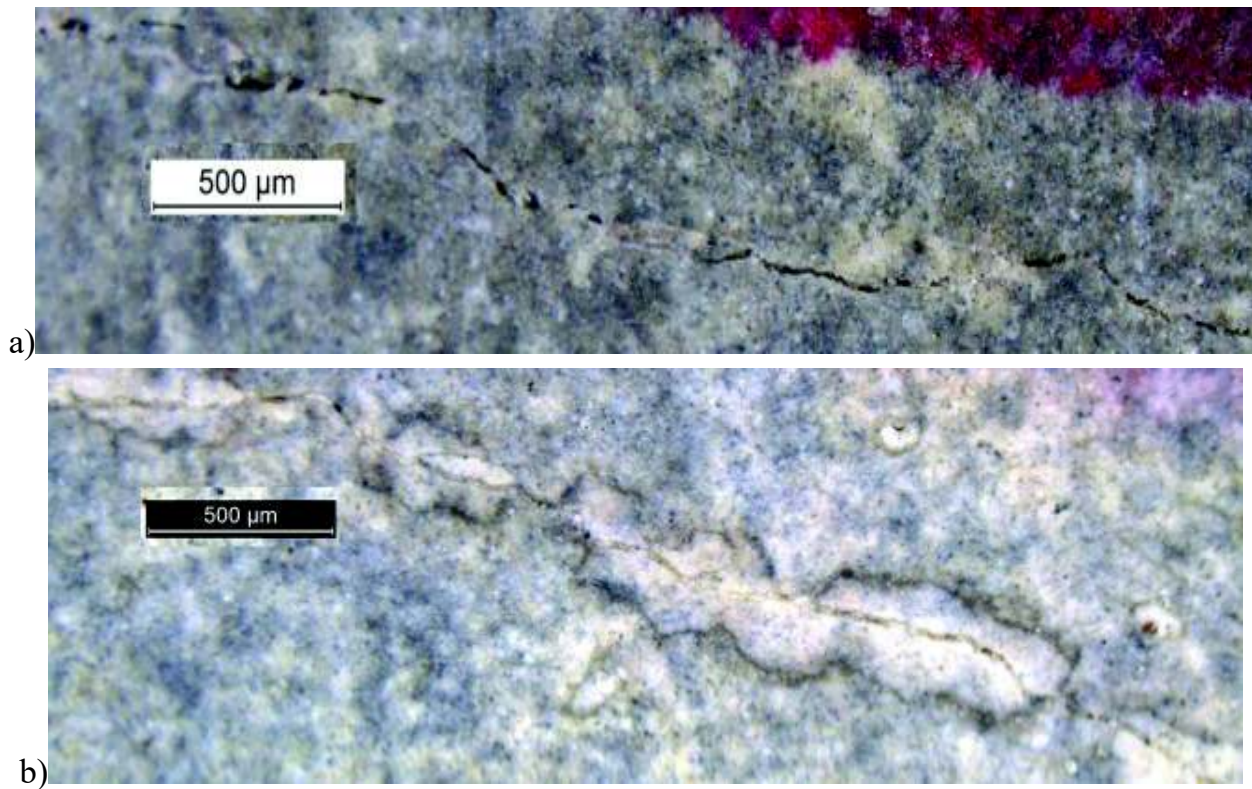


Fig. 6.91. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri sigilate complet: a): fisură inițială după ciclul I*; b): fisură sigilată după condiționarea SH

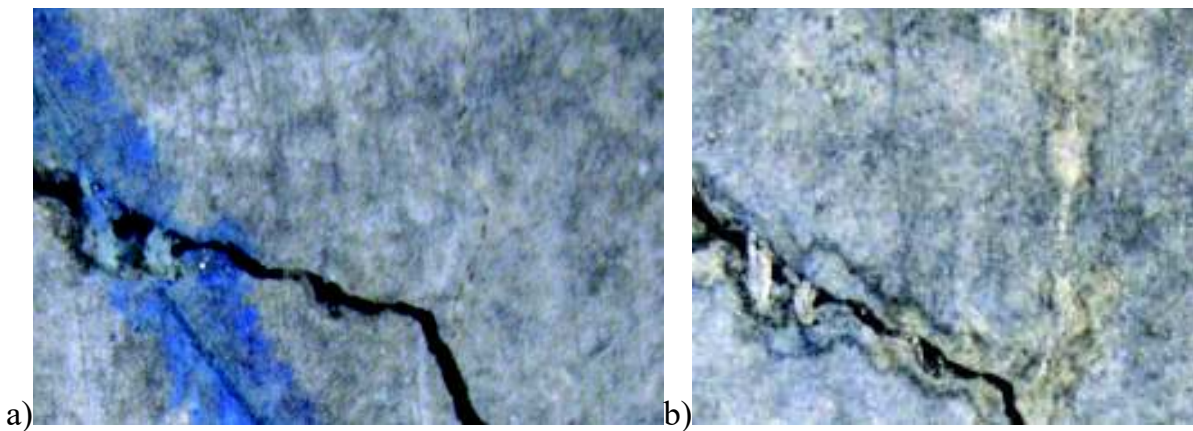


Fig. 6.92. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri sigilate complet: a): fisură inițială după ciclul I*; b): fisură sigilată după condiționarea SH

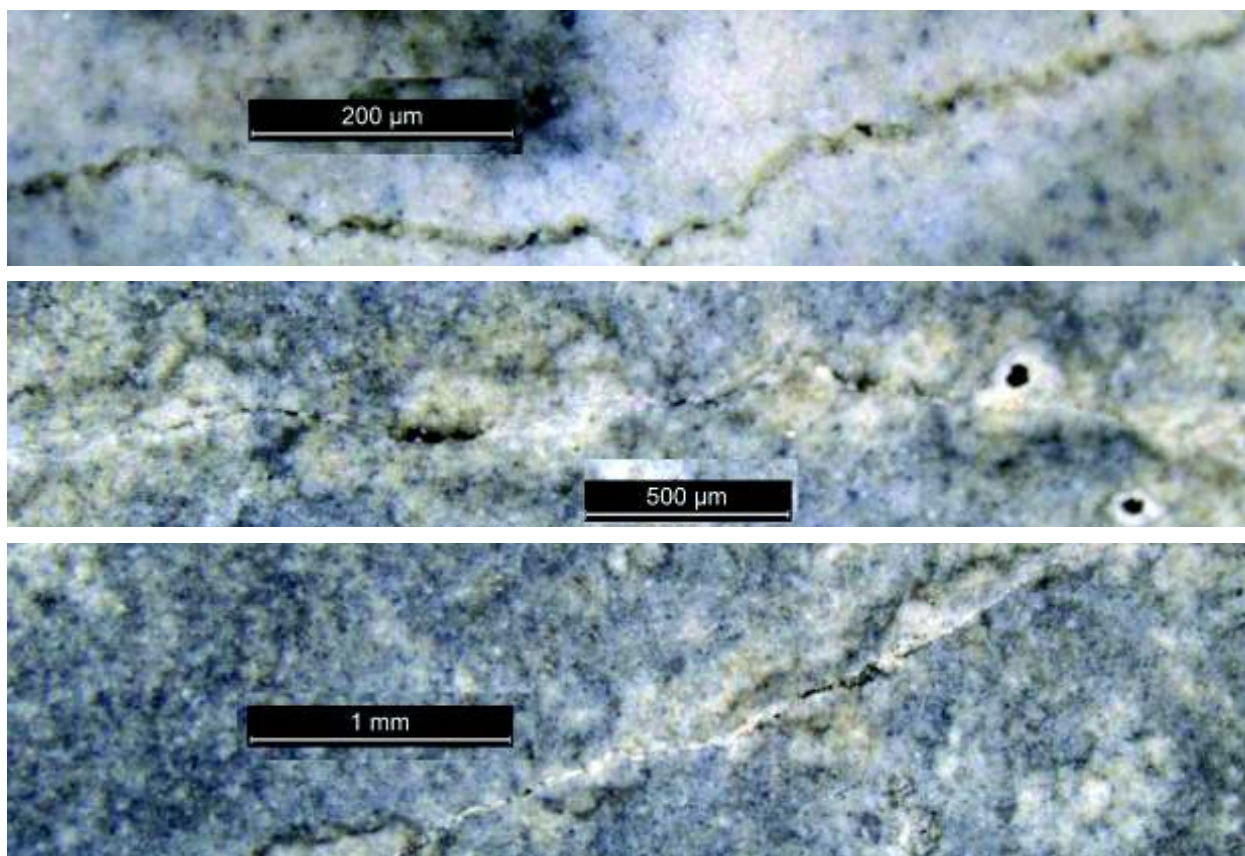


Fig. 6.93. M 3.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; detalii de fisuri parțial sau complet sigilate

Detaliile din Figura 6.93, ce prezintă imagini din interiorul microfisurii, surprinse cu un grad mai ridicat de amplificare, indică prezența unor compuși pe buza pereților de fisurare, compuși cu aspect diferit de produșii dezvoltăți în fisurile curente

Retestare la vârsta de 270 zile, ciclul I, h = 0.5 m

Ciclul I ($5 \times h = 0.5 \text{ m}$) din etapa de retestare a plăcii M 3.2 SH determină deschiderea suplimentară a fisurilor principale și ramificațiilor dezvoltate în timpul ciclului inițial I*, în zona centrală a probei, cea mai solicitată din punctul de vedere a stării de eforturi și deformații. Zona critică cu aspect de stea, de intersectare a celor 5 fisuri principale prezintă o creștere semnificativă a deschiderii maxime până la valoarea $w_{\max} = 1163.14 \text{ } \mu\text{m}$ și o deschidere medie $w_{\text{med}} = 978.22 \text{ } \mu\text{m}$, evaluată pe lungimea critică $< 0.5 \text{ mm}$. (vezi Figura 6.94). Deschiderea medie a fisurilor din imediata vecinătate a punctului critic de intersecție este de $w_{\max} = 253.7 \text{ } \mu\text{m}$, care se înscrie în registrul valorilor obținute anterior.

Se remarcă extinderea ramificațiilor fisurilor inițiale, deschiderea suplimentară a fisurilor inițiale (Figura 6.95) și apariția microfisurilor noi (vezi Figura 6.96).

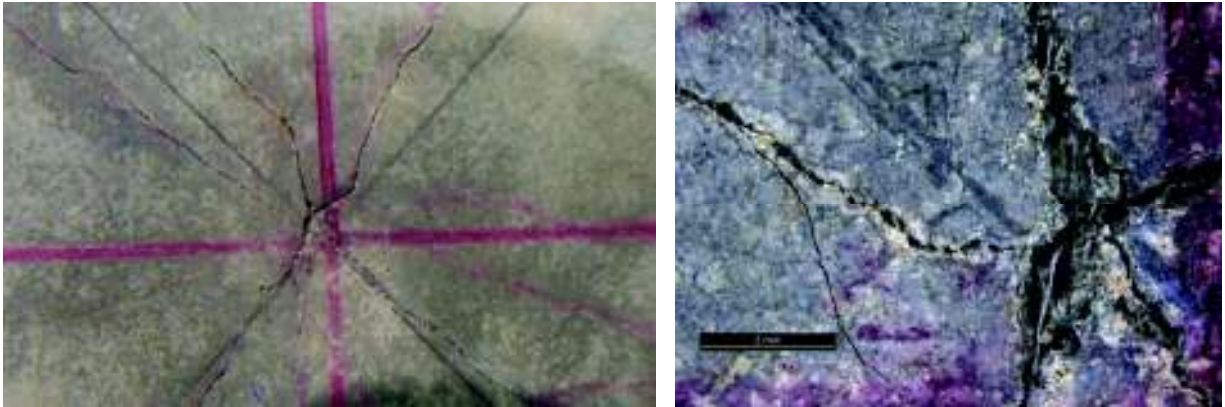


Fig. 6.94. M 3.2 SH, ciclul I, rețea microfisuri

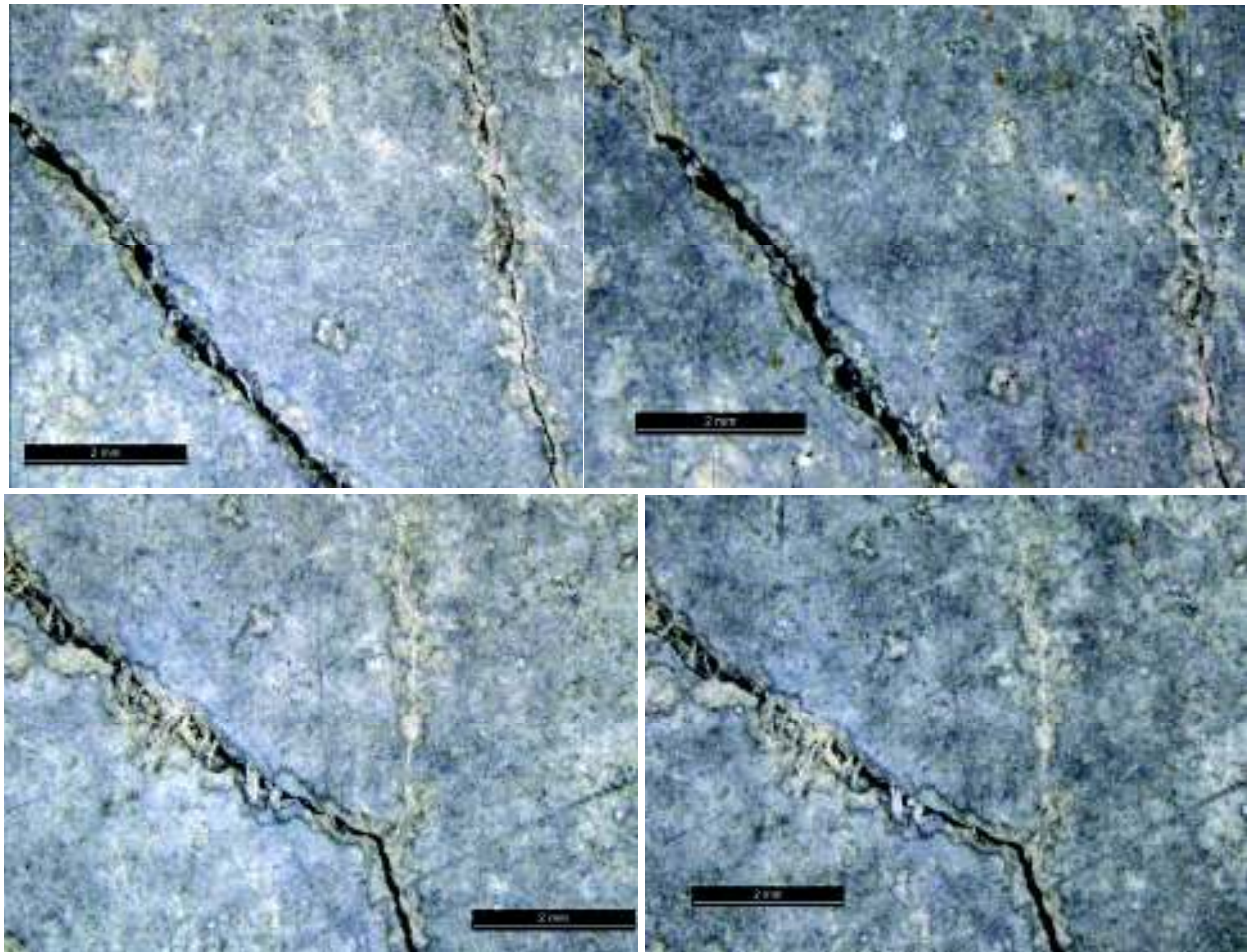


Fig. 6.95. M 3.2 SH, ciclul I, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului I de încărcare)

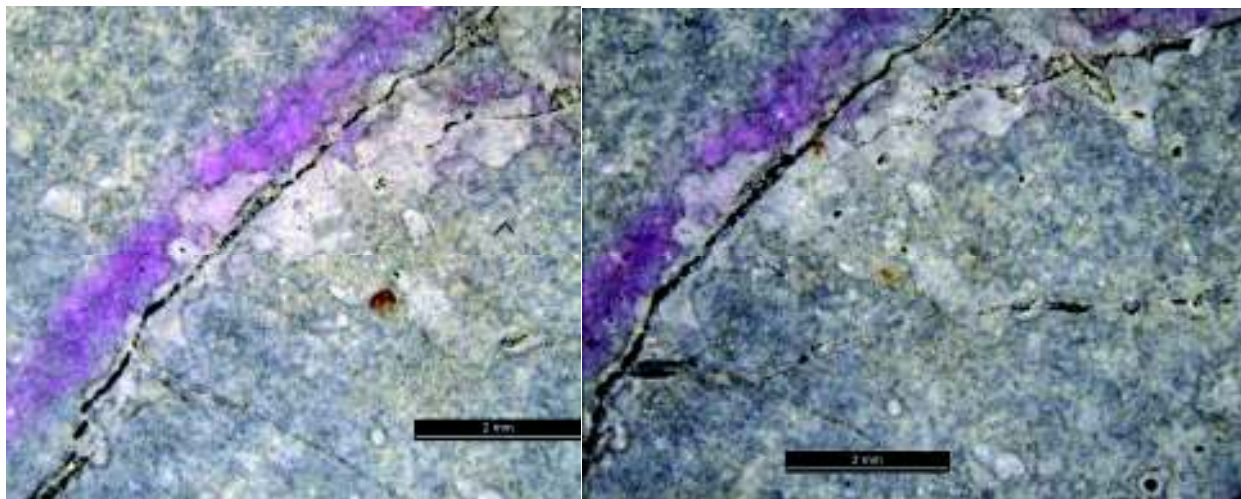


Fig. 6.96. M 3.2 SH, ciclul I, evoluția rețelei de microfisuri prin apariția de noi microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului I de încărcare)

Se remarcă de asemenea evoluția fisurilor din partea superioară a epruvetei, în zona de prindere a clamelor (vezi Anexa 6.6); nu se remarcă apariția fisurilor în zona centrală, la contactul corpurilor.

Ciclul II, h = 1.0 m

Ciclul II de retestare induce stabilizarea lungimii critice, care nu înregistrează decât o creștere sensibilă a deschiderii, respectiv este atinsă valoarea maximă $w_{\max}=1186.4 \mu\text{m}$ și o valoare medie determinată prin 5 măsurători individuale $w_{\text{med}}=1038.4 \mu\text{m}$ (vezi Figura 6.97). În schimb deschiderea celor cinci fisuri principale înregistrează o creștere semnificativă, exprimată prin deschiderea medie $w_{\text{med}}=1038.4 \mu\text{m}$.

Sub succesiunea șocurilor din ciclul II de retestare, fisurile existente ale probei M 3.2 SH își largesc deschiderea (vezi Figura 6.98) sau se redeschid (vezi Figura 6.99) și se extind, odată cu apariția unor microfisuri și ramificații noi, confirmând capacitatea preconizată de microfisurare sub sarcină (vezi Figura 6.100). În același timp sunt remarcate fisuri care, sigilate (parțial sau integral după condiționarea SH), se mențin constante și după ciclul II de retestare (vezi Figura 6.101).



Fig. 6.97. M 3.2 SH, ciclul II, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

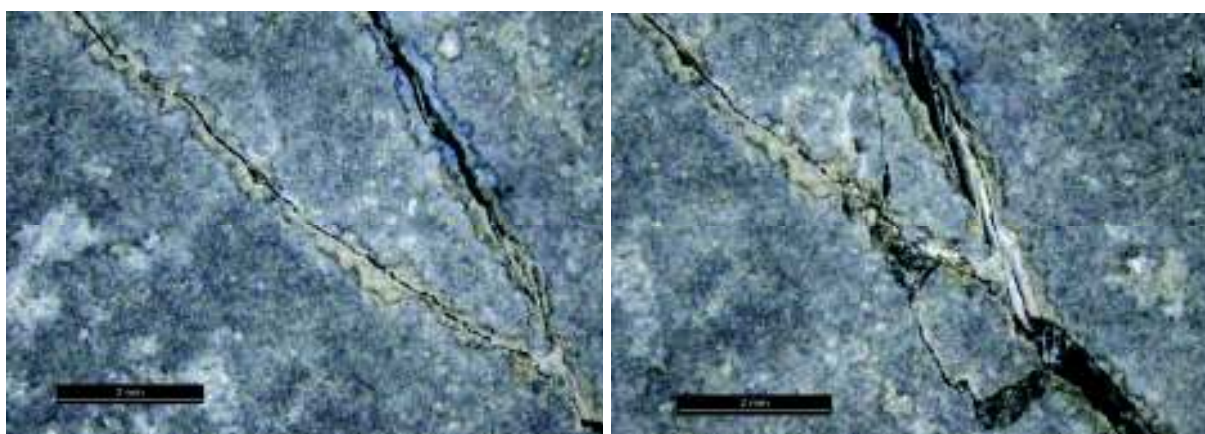


Fig. 6.98. M 3.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după ciclul I; dreapta: microfisuri după ciclul II de încărcare)

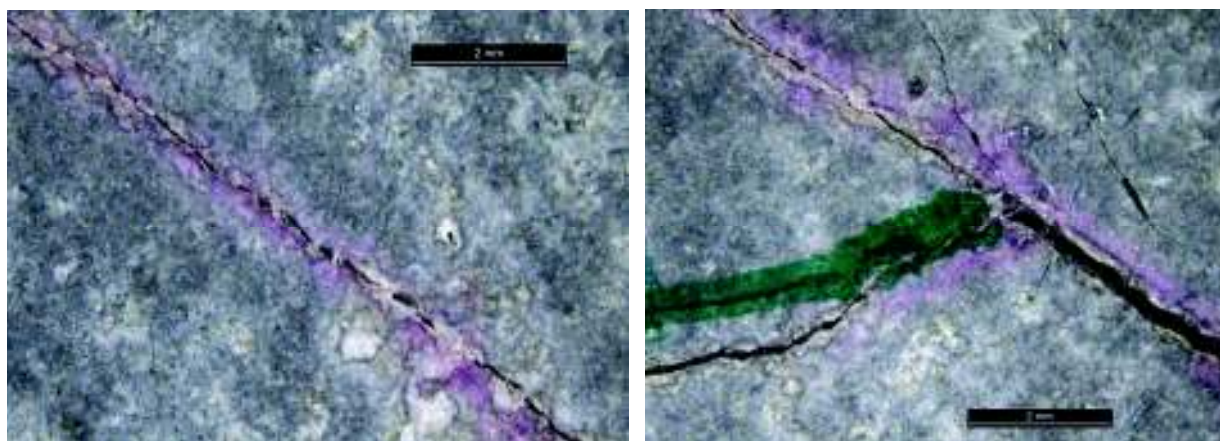


Fig. 6.99. M 3.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului II de încărcare – microfisură nouă și fisură redeschisă sub șocuri)

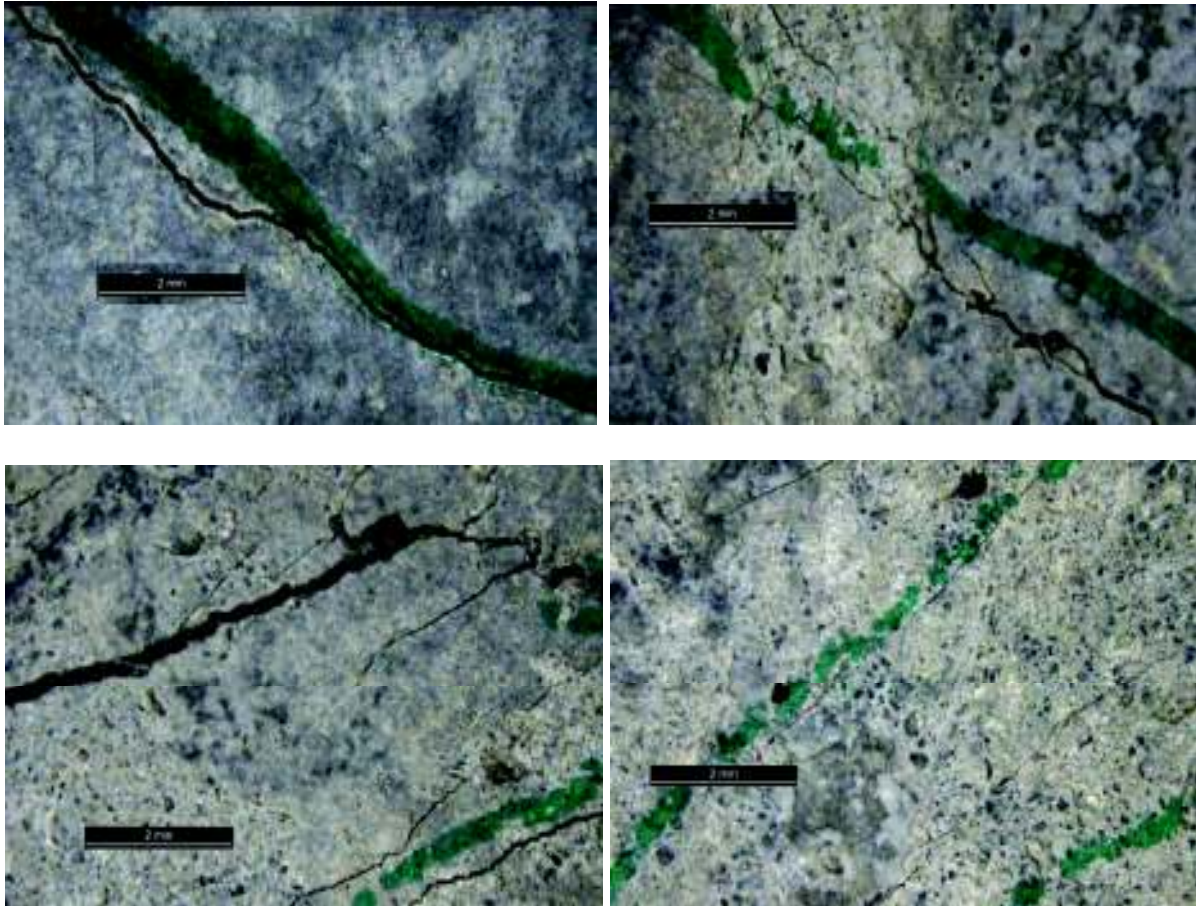


Fig. 6.100. M 3.2 SH, Ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: exindere și ramificare fisuri existente; dezvoltare microfisuri noi

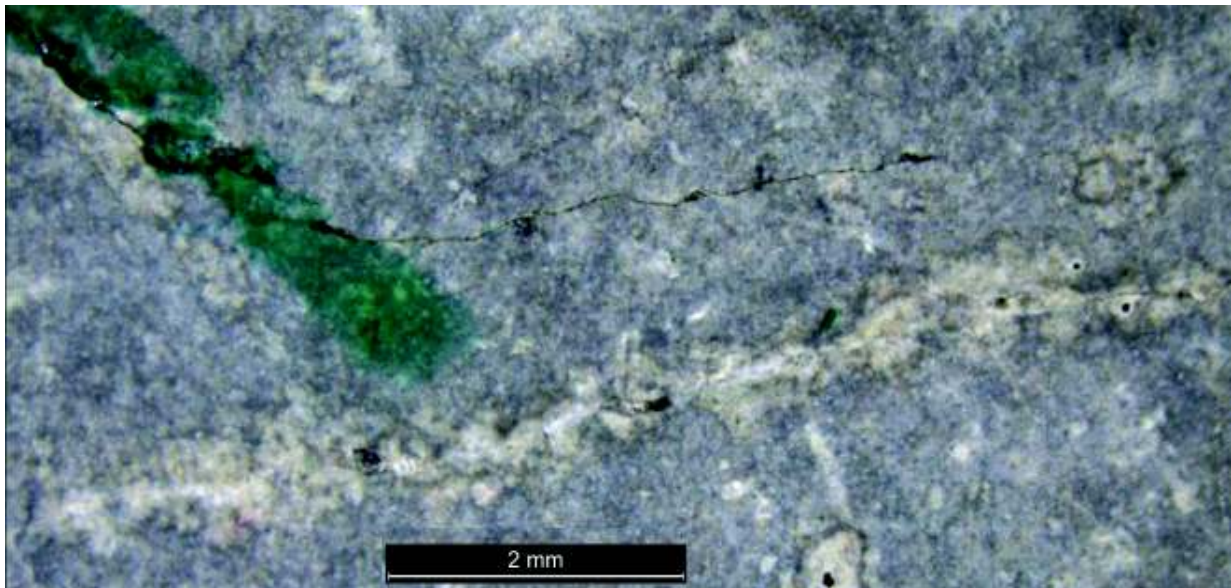


Fig. 6.101. M 3.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri

Fisurile inițiale de la partea superioară a epruvetei, dezvoltate încă din primul ciclu de încărcare, înregistrează o evoluție semnificativă, atât ca și număr cât și deschidere (Anexa 6.6). Nu sunt remarcate fisuri în zona centrală, de contact.

Ciclul III, $h = 1.5 \text{ m}$

Ciclul III de retestare induce un nivel ridicat de degradare în epruvetă, atât prin prisma deformațiilor cât și a deschiderii de fisurare: zona critică de intersecție a celor cinci fisuri atinge deschiderea maximă $w_{\max} = 2301.3 \text{ }\mu\text{m}$ și o deschidere medie $w_{\text{med}}=1972.1 \text{ }\mu\text{m}$. Deschiderea celor cinci fisuri principale înregistrează o creștere semnificativă, exprimată prin deschiderea medie $w_{\text{med}}=1440.4 \text{ }\mu\text{m}$ (Figura 6.102).

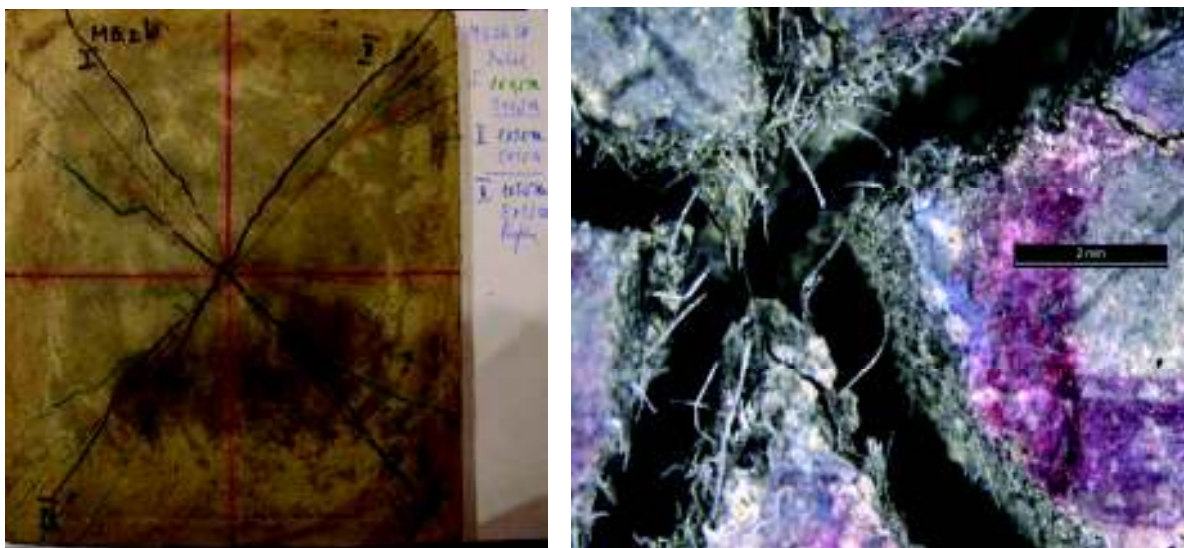


Fig. 6.102. M 3.2 SH, ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Primul șoc din ciclul III de retestare induce o deformare semnificativă în epruvetă, evoluția semnificativă a fisurilor în partea superioară a plăcii, degradarea puternică a unui colț, în zona de prindere a clamelor de fixare și apariția fisurilor în zona centrală, de contact (vezi Anexa 6.6).

Evoluția rețelei de microfisurare se aliniază în tipicul probelor anterior analizate: se produce preponderent deschiderea suplimentară a fisurilor inițiale simultan extinderii lungimii lor (vezi Figura 6.103).

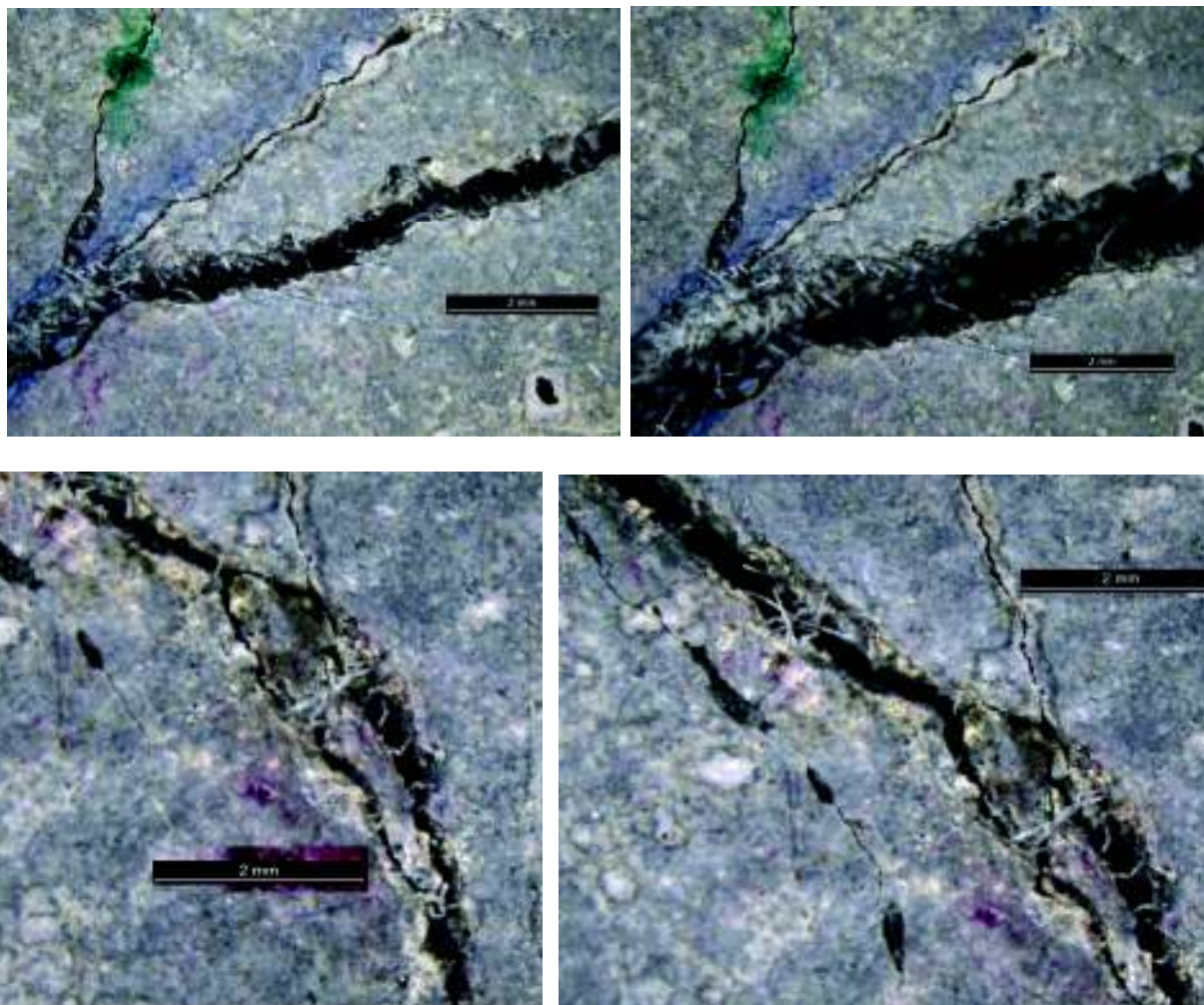


Fig. 6.103. M 3.2 SH, ciclul III, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după ciclul II; dreapta: microfisuri după ciclul III de încărcare)

6.5.4 Compoziția ECC M 4.2

6.5.4.1 Specimenul M 4.2 R

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 4.2 R sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.7.

Ciclul I, $h=0.5 m$

Primul șoc aplicat plăcii M 4.2 R induce apariția a trei fisuri și ramificațiile adiacente, dezvoltate de-a lungul diagonalelor principale, având deschiderea maximă de $w < 0.05 \text{ mm}$, evaluată cu ajutorul lupei și riglei de fisuri. Al doilea șoc induce apariția a încă două fisuri, cu deschidere $w < 0.05 \text{ mm}$.

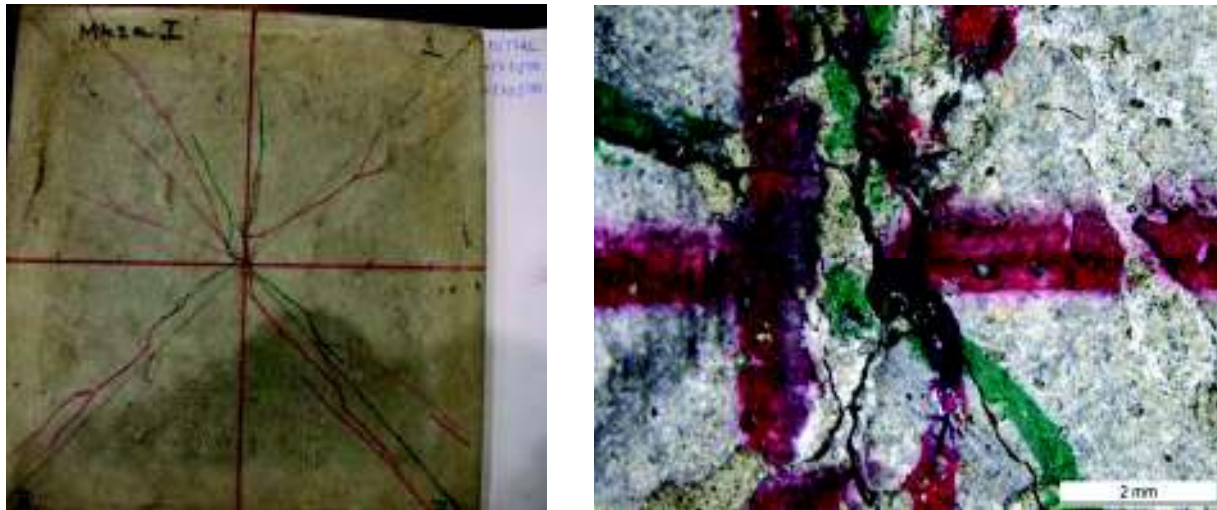


Fig. 6.104. Evoluția rețelei de microfisure pentru proba M 4.2 R, ciclul I (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Ciclul I de încărcare induce o rețea radială de microfisuri, ($N \sim 15$, Figura 6.104), mai complexă decât în cazul compozițiilor precedente, dezvoltată de-a lungul diagonalelor principale cu ramificațiile aferente. Lungimea critică este identificată în zona centrală, pe o lungimea $l=0.8$ mm a unei fisuri din cadrul rețelei și prezintă deschiderea maximă $w_{\max}=322.85$ μm , cu o valoare medie $w_{\text{med}}=309.18$ μm . Deschiderea medie a celor 3 fisuri principale din zona adiacentă perimetrului critic este de 124.86 μm , iar ramificațiile secundare din rețea prezintă o deschidere medie de 32.2 μm .

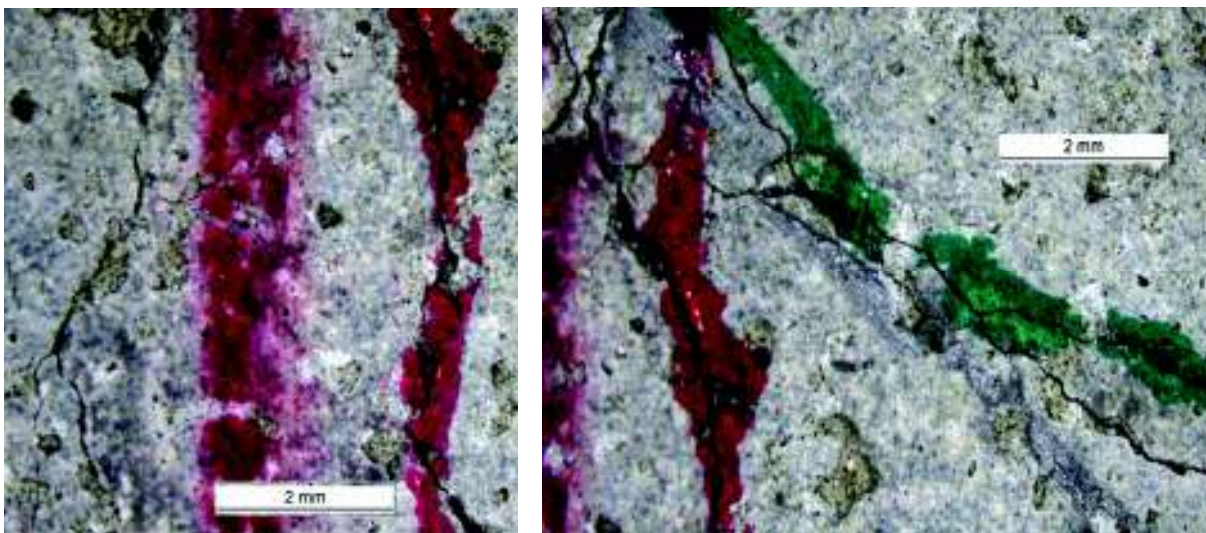


Fig. 6.105. M 4.2 R, ciclul I, rețea microfisure: a) microfisuri cu ramificații; b) microfisuri discrete $w=8\dots15$ μm

Partea superioară a epruvetei nu prezintă modificări după primul ciclu de încărcare, nu se remarcă apariția fisurilor identificabile cu lupa de fisuri nici în zona colțurilor, de prindere a clamelor de fixare, nici în zona centrală, de contact (vezi Anexa 6.7).

Evoluția tipică a rețelei de fisuri, cu ramificațiile și microfisurile discrete formate sub șoc este prezentată în Figura. 6.105, confirmând capacitatea previzionată de microfisurare sub sarcină. Primul ciclu de încărcare nu induce apariția fisurilor pe partea superioară a plăcii, în zona centrală (de contact între epruvetă și corpul de impact) sau în zona de prindere a clamelor pentru fixarea probei în cadrul de încercare.

Ciclul II, $h=1.0\text{ m}$

Ciclul II de încărcare determină dezvoltarea rețelei de microfisuri prin extinderea acestora de-a lungul diagonalelor principale, lărgirea deschiderii acestora și apariția de ramificații adiacente și microfisuri discrete noi ($N \sim 20$, vezi Figurile 6.106 și 6.107). Lungimea de $l = 0.8\text{ mm}$ identificată inițial ca fiind critică, prezintă o evoluție privind deschiderea maximă: $w_{\max} = 613.94\ \mu\text{m}$ și deschiderea medie de $w_{\text{med}} = 459.7\ \mu\text{m}$, însă perimetrul critic se translatează de-a lungul unei fisuri principale adiacente, dezvoltând o deschidere maximă $w_{\max} = 959.5\ \mu\text{m}$ și o valoare medie a acesteia $w_{\text{med}} = 881.14\ \mu\text{m}$.

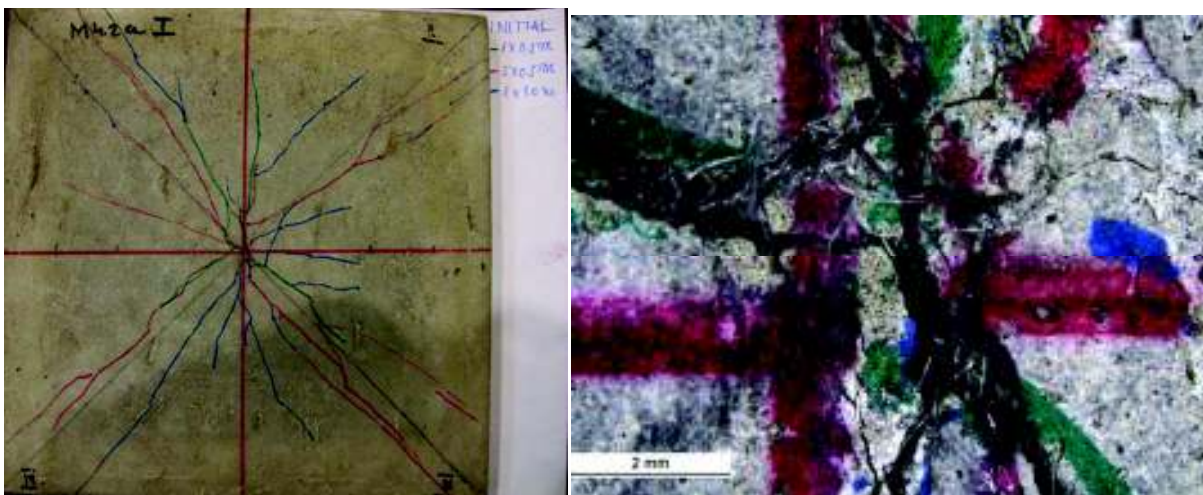


Fig. 6.106. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 4.2 R, ciclul II, (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

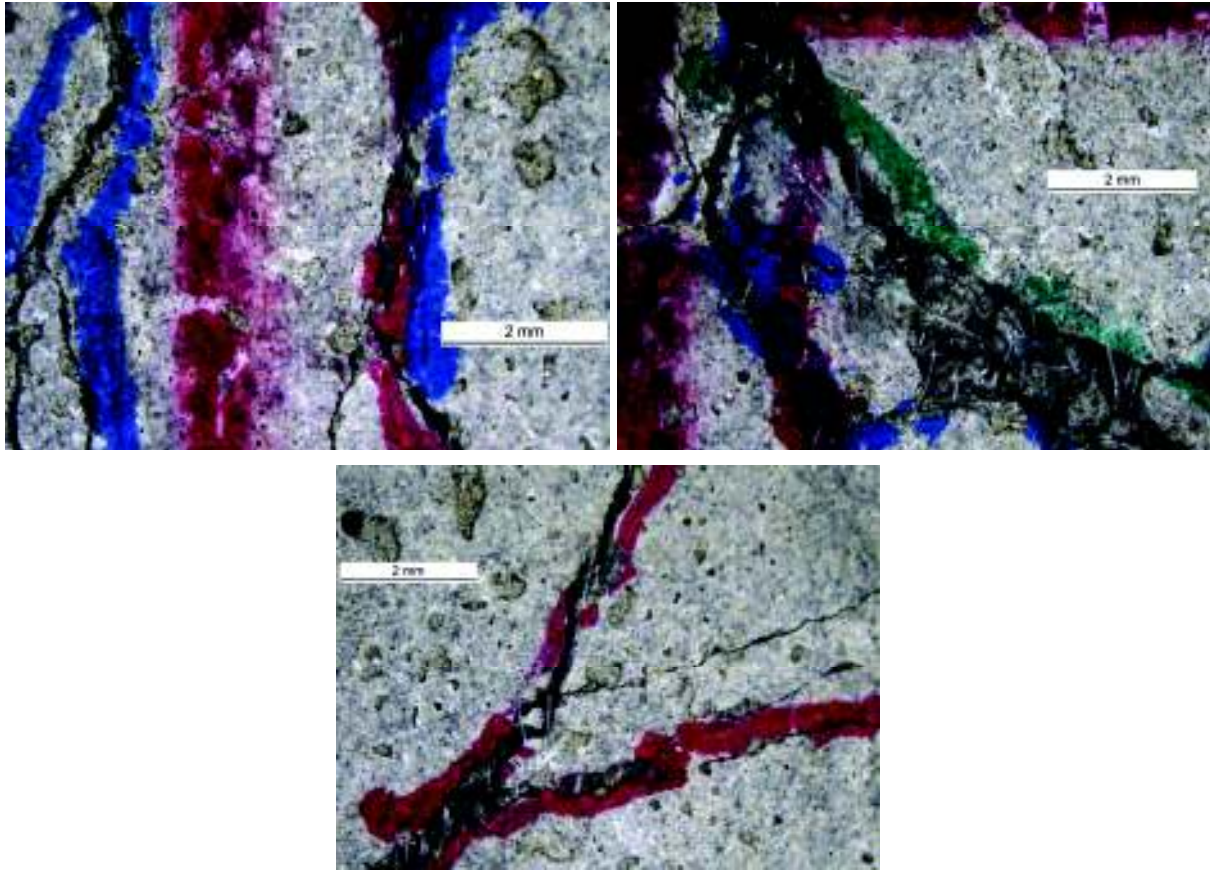


Fig. 6.107. M 4.2 R, ciclul II, rețea microfisuri

Fisurile adiacente perimetrului critic înregistrează o evoluție până la valoare medie $w_{med} = 361.9 \mu m$, iar ramificațiile secundare din rețea prezintă o deschidere medie de $49.22 \mu m$. Evoluția rețelei include, pe lângă creșterea deschiderii și extinderea lungimii fisurilor existente apariția de ramificații și microfisuri noi (Figura 6.107). Ciclul II de încărcare induce de la primul șoc apariția, pe fața superioară a plăcii, fisuri în zona colțurilor, de prindere a clamelor de fixare, fisuri care prezintă o evoluție semnificativă la finalul ciclului II. Totodată este remarcată apariția fisurilor în zona centrală, de contact.

Ciclul III, $h=1.5 m$

Ciclul III (5 șocuri de la înălțimea $h = 1.5 m$) determină lărgirea fisurilor existente până la valori critice. Deschiderea maximă a zonei critice atinge valoarea $w_{max} = 2700.3$

μm , cu o medie $w_{\text{max}} = 2399.84 \mu\text{m}$, (vezi Fig. 6.108, dreapta). Valorile deschideri maxime depășesc substanțial cele determinate pentru compozițiile M 1.4 și M 2.2, la nivel similar de solicitare. La modul general, odată cu creșterea cantității de cenușă FA din compoziția ECC, deschiderea de fisurare crește în consecință, fapt remarcat și în cazul testelor 4PB (vezi Capitolul 5).

Rețeaua radială de microfisuri se extinde pe direcția diagonalelor principale, prin apariția de noi fisuri (Figura 6.109), confirmând capacitatea de dezvoltare microfisuri sub evoluția sarcinii (succesiunea șocurilor). Pe fața superioară a epruvetei fisurile din zonele de prindere a clamelor devin critice; de asemenea în zona de centrală, de contact între cele două corpuri, apar microfisuri concentrice și de asemenea radiale, de-a lungul diagonalelor principale (Anexa 6.7).

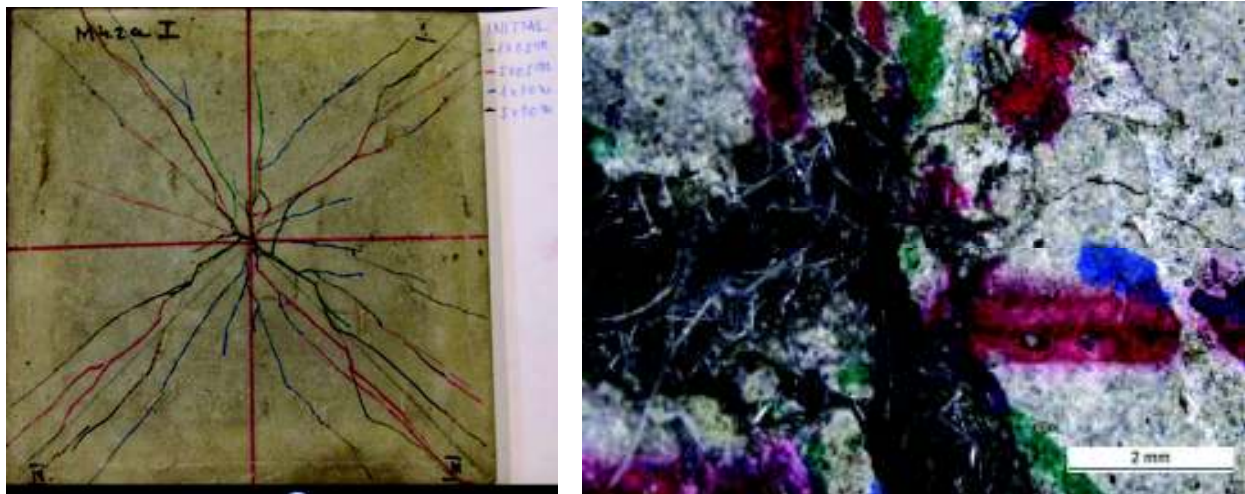


Fig. 6.108. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 4.2 R, ciclul III (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Ciclul III de încărcare este asimilat Ruperii prin nivelul de degradare indus în probă, atât din punct de vedere al deformației plastice cât și al deschiderii fisurilor. Este consemnat faptul că proba nu se dezintegrează și își menține integritatea, nu se remarcă rupturi, spărturi, desprinderi din corpul acesteia.

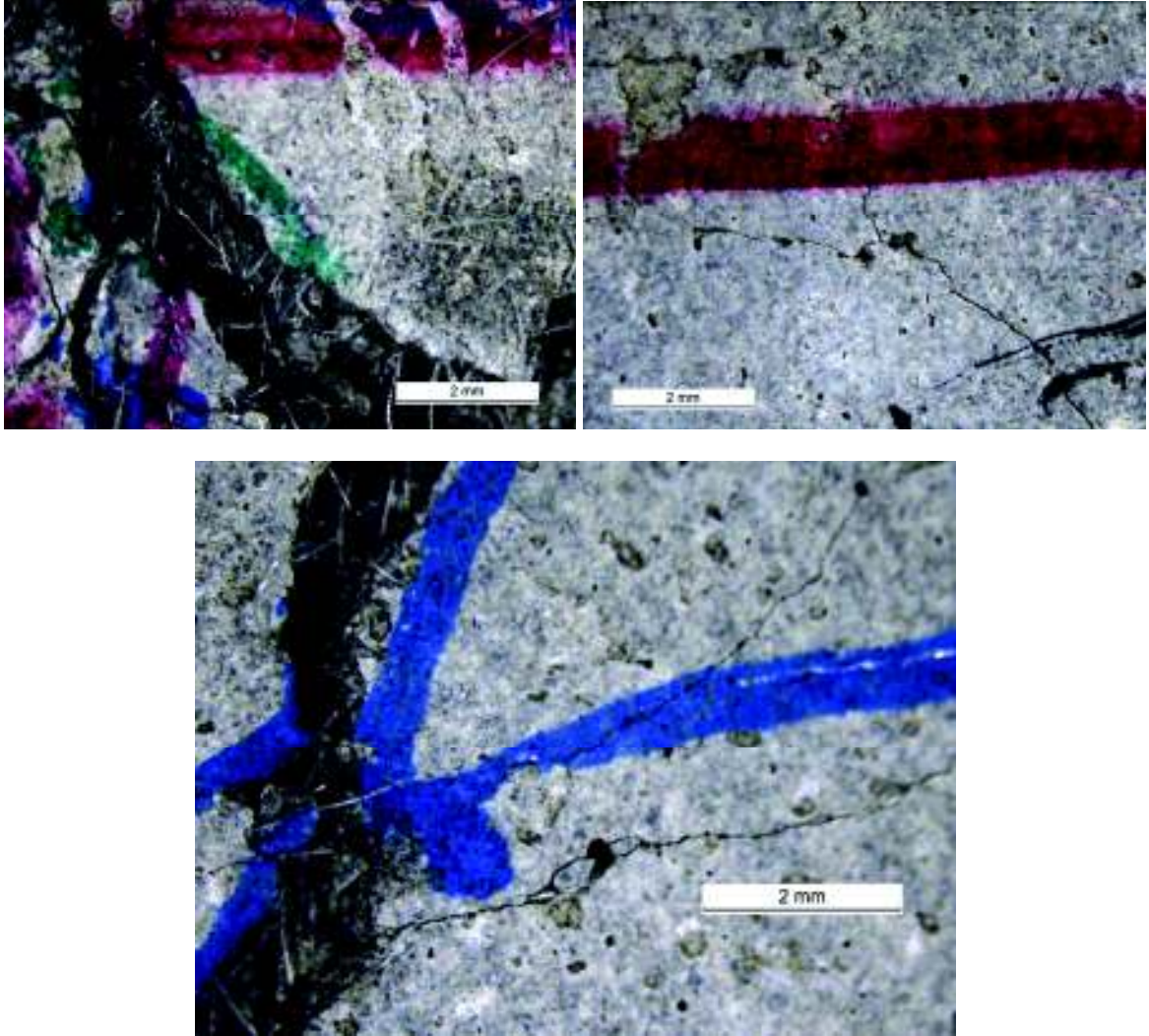


Fig. 6.109. M 4.2 R, ciclul III, rețea microfisuri

6.5.4.2 Specimenul M 4.2 SH

Evoluția rețelei de microfisurare la placa M 4.2 SH sub ciclurile încercării la impact DWT este prezentată în detaliu sub format foto în Anexa 6.8.

Ciclul I*, $h = 0.5 m$

M 4.2 SH prezintă o comportare comparabilă cu a martorului M 4.2 R sub primul ciclu de încărcare, respectiv dezvoltarea unei rețele radiale complexe de aproximativ 13-15 microfisuri, de-a lungul diagonalelor principale, cu ramificații adiacente (vezi Figura 6.110.a). Zona critică de degradare din partea centrală a plăcii se identifică pe traseul a două fisuri principale: fisura F1 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 1.7 mm

deschiderea maximă $w_{\max} = 417.3 \mu\text{m}$ și valoare medie $w_{\text{med}} = 400.7 \mu\text{m}$. (Figura 6.110, b); fisura F2 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 3.6 mm deschiderea maximă $w_{\max} = 482.3 \mu\text{m}$ și valoare medie $w_{\text{med}} = 241.9 \mu\text{m}$. (Figura 6.110, c). Media deschiderii de fisurare, aferentă celor cinci microfisuri radiale ce pornesc din punctul critic este de $w_{\text{med}} = 90.9 \mu\text{m}$. Rețeaua de microfisurare prezintă o evoluție foarte asemănătoare celei aferente probei M 3.2 SH, ca urmare a ciclului de încărcare I*.

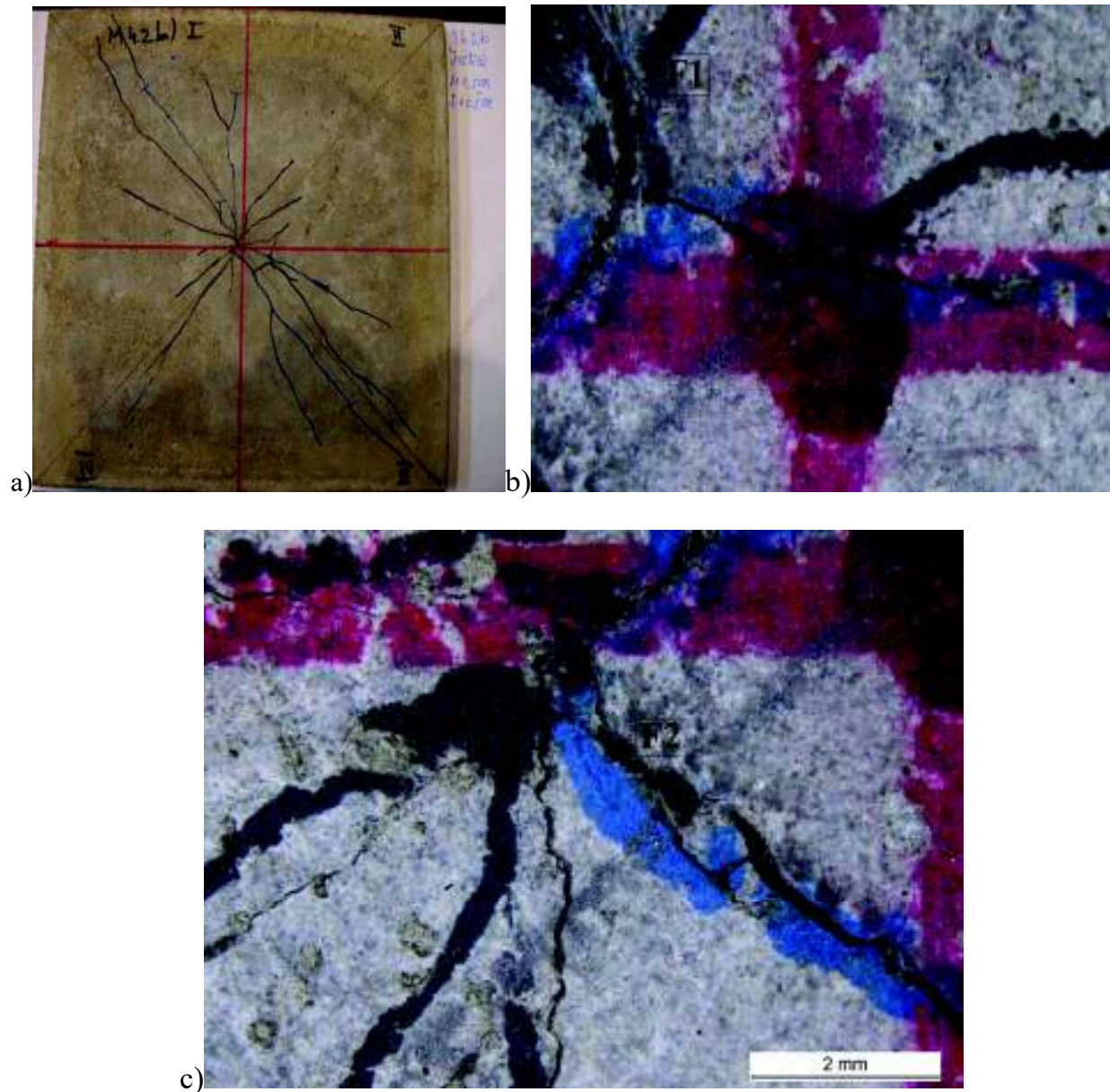


Fig. 6.110. Evoluția rețelei de microfisurare pentru proba M 4.2 SH, Ciclul I* (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Pe fața superioară a plăcii se remarcă apariția fisurilor localizate în colțuri, în vecinătatea clamelor de fixare (vezi Anexa 6.8). Nu este observată apariția fisurilor în zona centrală, de contact.

Evaluarea capacității de auto-sigare (SS) după expunerea epruvetei condiționării SH (28 cicluri)

Evaluarea epruvetei M 4.2 SH după expunerea la cele 28 de cicluri de autovindecare indică formarea aleatorie a produșilor de sigilare în fisurile rețelei dezvoltate în primul ciclu de șocuri. Figura 6.111 prezintă comparativ, aspectul fisurii înainte (stânga) și după (dreapta) expunerea la condiționarea SH. Analiza microscopică arată că eficiența de Auto -Sigilare (SS) este mai redusă în cazul compoziției M 4.2 decât

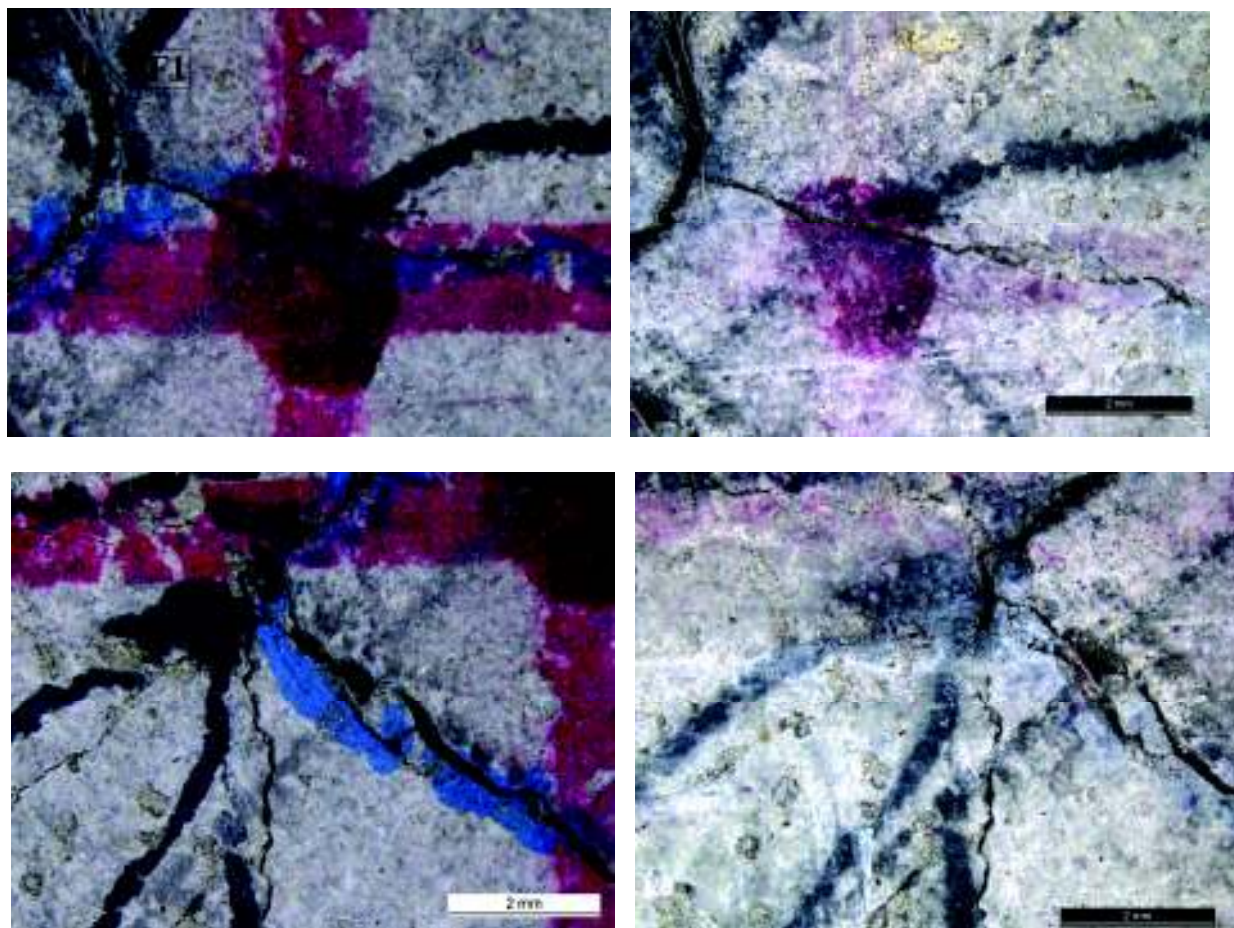


Fig. 6.111. M 4.2 SH:e (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS: fisuri nesigilate după expunerea probei la condiționarea SH

în cazul compozițiilor M 1.4 sau M 2.2 dar apropiată de cea a compoziției M 3.2: incidența produșilor de precipitare este aleatoare, semnificativ mai puțin omogenă ca în cazul compoziției M 1.4.

Similar compoziției M 2.2, analiza microscopică pentru proba M 4.2 identifică pe buza fisurilor posibili produși de hidratare continuă; nu au aspect de cristal (specific carbonatului de calciu) și nu sigilează complet fisurile (Figura 6.112).

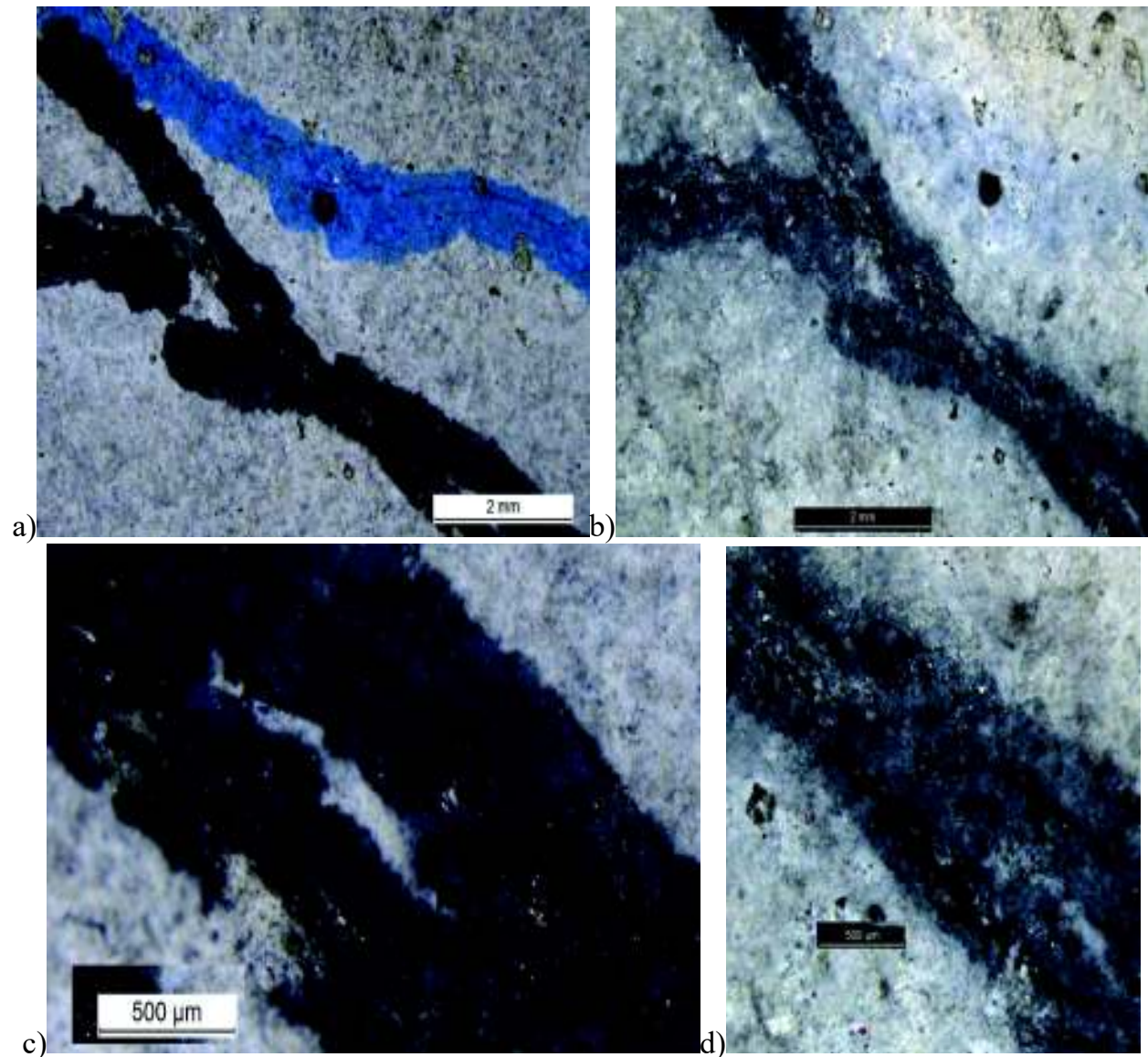


Fig. 6.112. M 4.2 SH: evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; fisuri cu grad redus de sigilare: a), c): fisură inițială după ciclul I*; b), d): fisură parțial închisă după condiționarea SH și detaliu produși de sigilare

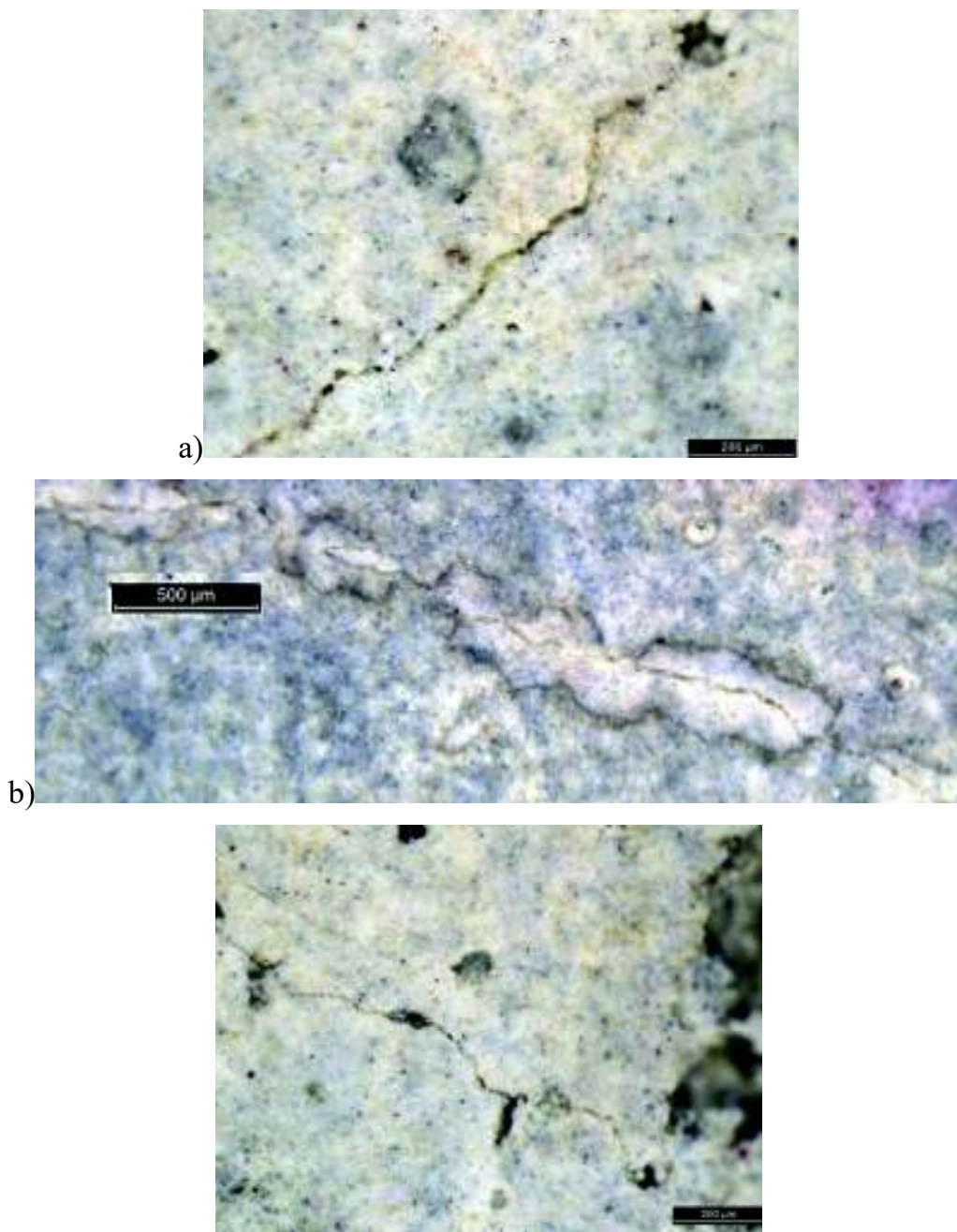


Fig. 6.113. M 4.2 SH: Evaluarea (prin analiză vizuală microscopică) a capacității SS; Fisuri sigilate complet după condiționarea SH

Este identificată ca posibilă închiderea completă a fisurilor cu deschidere mică, $w < 30\mu\text{m}$ și sigilarea parțială, aleatorie a fisurilor cu deschideri mai mari ($w > 60\mu\text{m}$) (Figura 6.113). Detaliile ce prezintă imagini din interiorul microfisurii, surprinse cu un grad mai ridicat de amplificare, indică prezența unor compuși pe buza pereților de fisurare, compuși cu aspect diferit de produșii dezvoltăți în fisurile curente

Retestare la vârsta de 270 zile, ciclul I, h = 0.5 m

Ciclul I ($5 \times h = 0.5 \text{ m}$) din etapa de retestare a plăcii M 4.2 SH determină deschiderea suplimentară a fisurilor principale și ramificațiilor dezvoltate în timpul ciclului inițial I*, în zona centrală a probei, cea mai solicitată din punctul de vedere a stării de eforturi și deformații. Fisurile critice evoluează după cum urmează, fără să înregistreze deschideri semnificative: fisura F1 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 1.7 mm deschiderea maximă $w_{\max} = 520.7 \mu\text{m}$ și valoare medie $w_{\text{med}} = 414.7 \mu\text{m}$, iar fisura F2 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 3.6 mm deschiderea maximă $w_{\max} = 786.9 \mu\text{m}$ și valoarea medie $w_{\text{med}} = 729.5 \mu\text{m}$. (Figura 6.114).

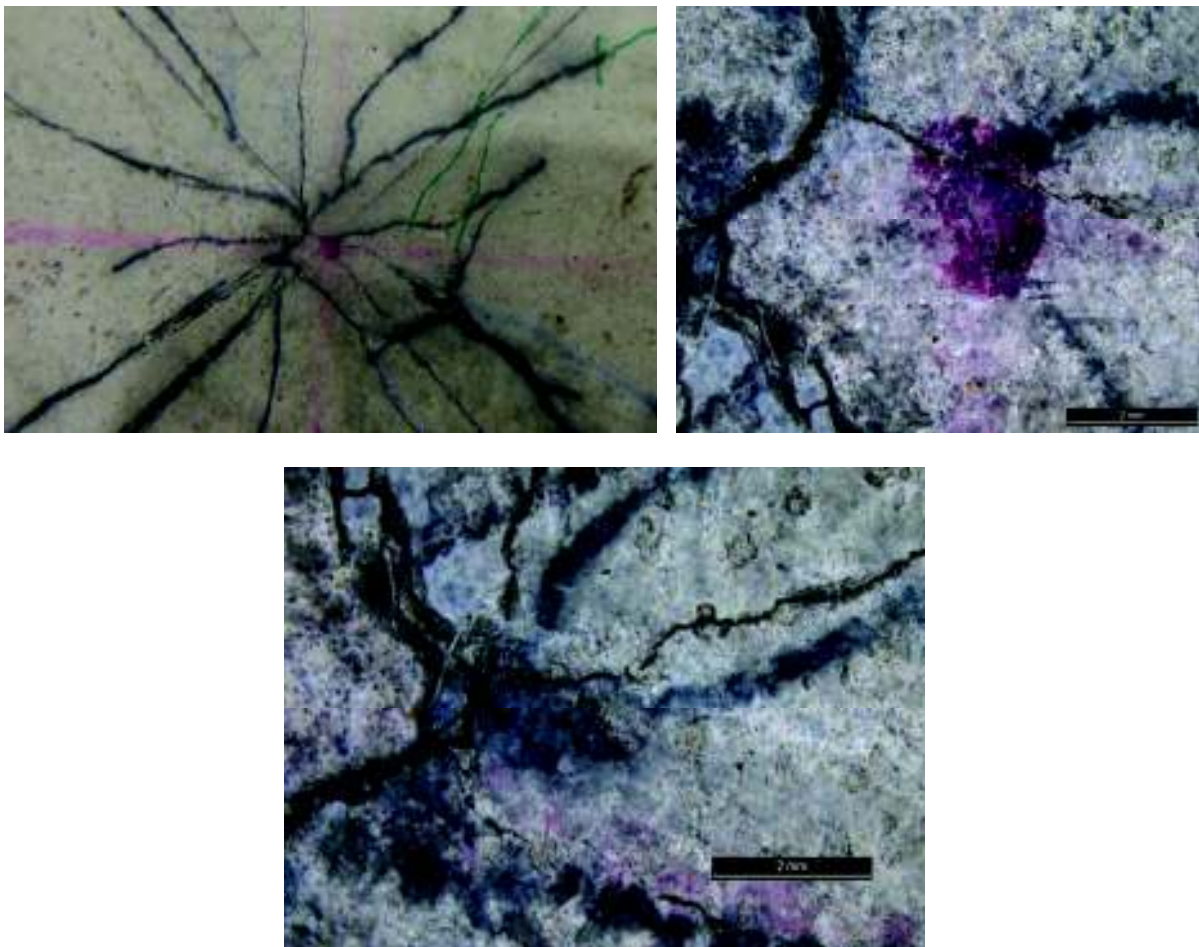


Fig. 6.114. M 4.2 SH, ciclul I, rețea microfisuri

Se remarcă extinderea ramificațiilor fisurilor inițiale împreună cu deschiderea lor suplimentară. De asemenea se remarcă apariția microfisurilor noi (vezi Figura 6.115).

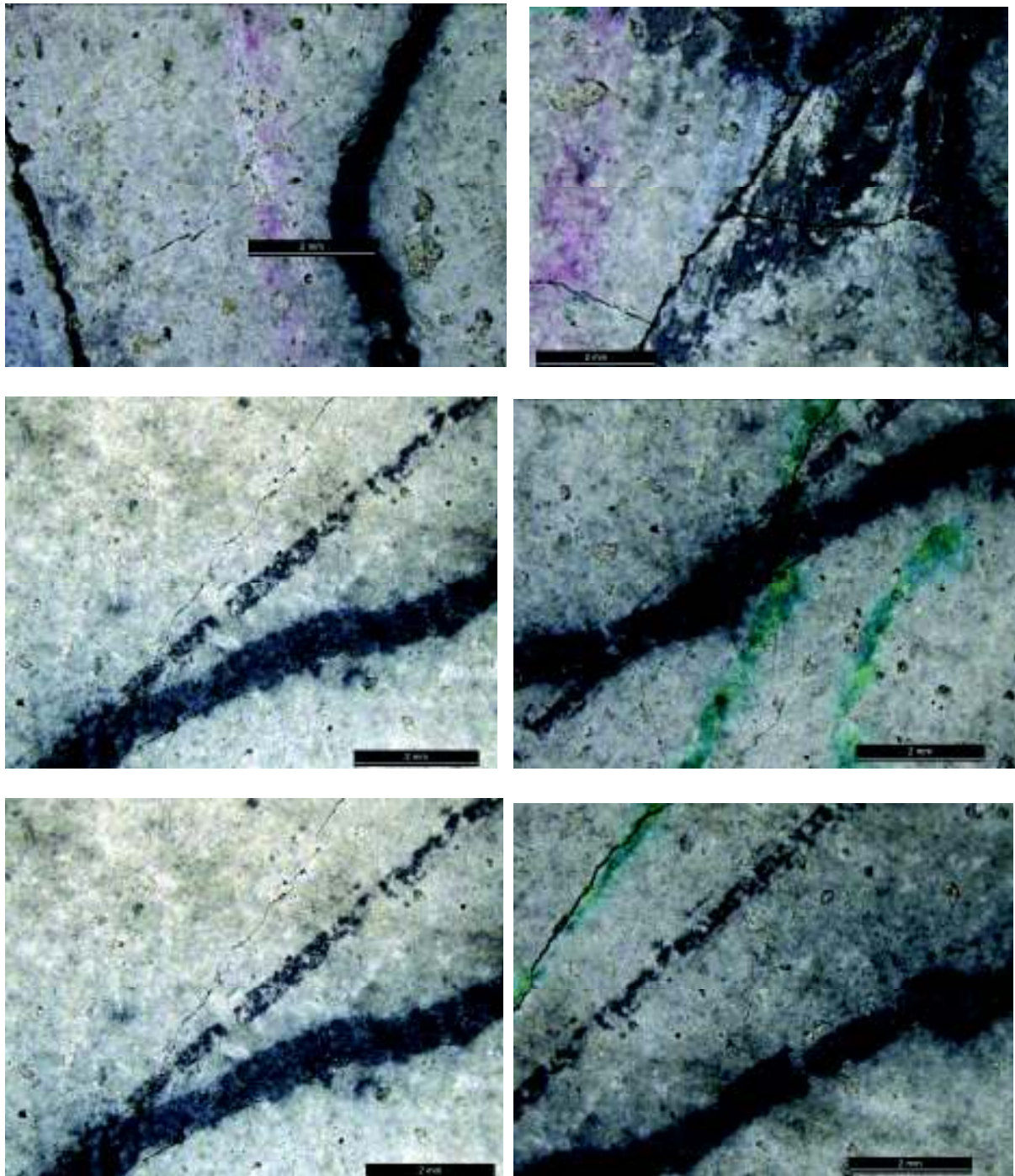


Fig. 6.115. M 4.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: (stânga: microfisuri după SH; dreapta: microfisuri după efectuarea ciclului I de încărcare)

Se remarcă de asemenea evoluția fisurilor din partea superioară a epruvetei, în zona de prindere a clamelor (vezi Anexa 6.8); nu se remarcă apariția fisurilor în zona centrală, la contactul corpurilor.

Ciclul II, $h = 1.0$ m

Ciclul II de retestare produce deplasări și deformații semnificative în placă, împreună cu deschiderea substanțială a fisurilor existente, dar și dezvoltarea unor microfisuri și ramificații noi. Fisurile critice evoluează după cum urmează, înregistrând deschideri previzibile: fisura F1 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 1.7 mm deschiderea maximă $w_{\max} = 745.1 \mu\text{m}$ și valoare medie $w_{\text{med}} = 681.9 \mu\text{m}$, iar fisura F2 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 3.6 mm deschiderea maximă $w_{\max} = 1161.9 \mu\text{m}$ și valoarea medie $w_{\text{med}} = 1081.5 \mu\text{m}$. (Figura 6.116).

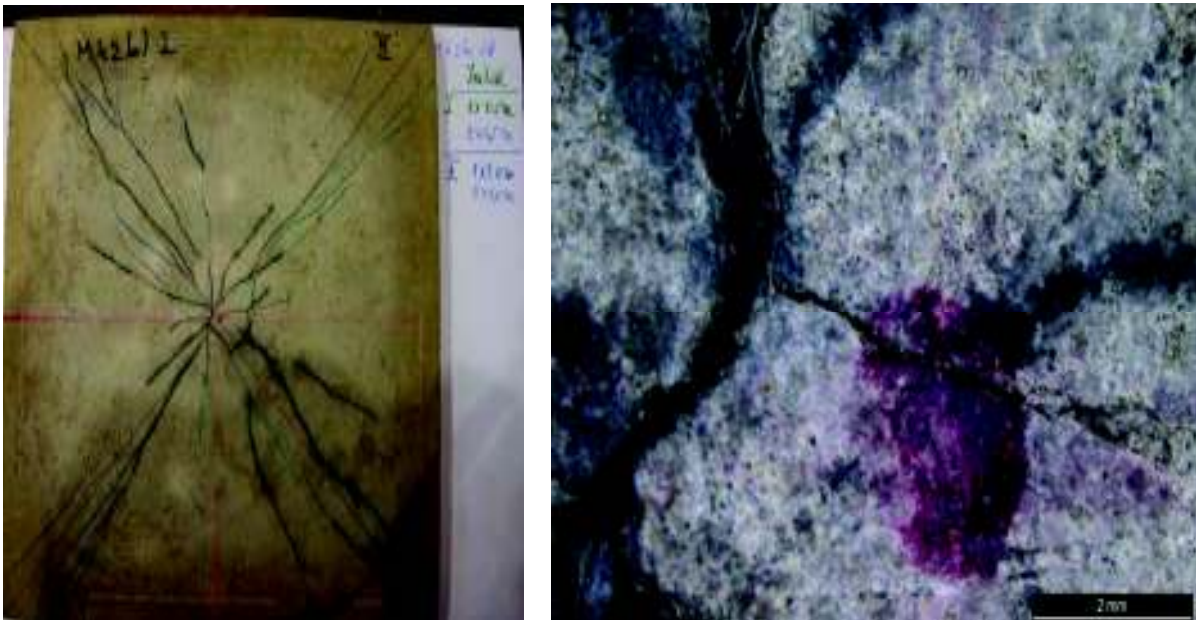


Fig. 6.116. M 4.2 SH, ciclul II, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

Sub succesiunea șocurilor din ciclul II, fisurile existente ale probei M 4.2 SH își măresc deschiderea sau se redeschid, se extind vezi (Figura 6.117) odată cu apariția unor microfisuri și ramificații noi, confirmând capacitatea de microfisurare sub sarcină (vezi Figura 6.118).

Fisurile inițiale de la partea superioară a epruvetei, dezvoltate încă din primul ciclu de încărcare, înregistrează o evoluție semnificativă, atât ca și număr cât și deschidere (Anexa 6.8). Se remarcă apariția fisurilor în zona centrală, de contact.

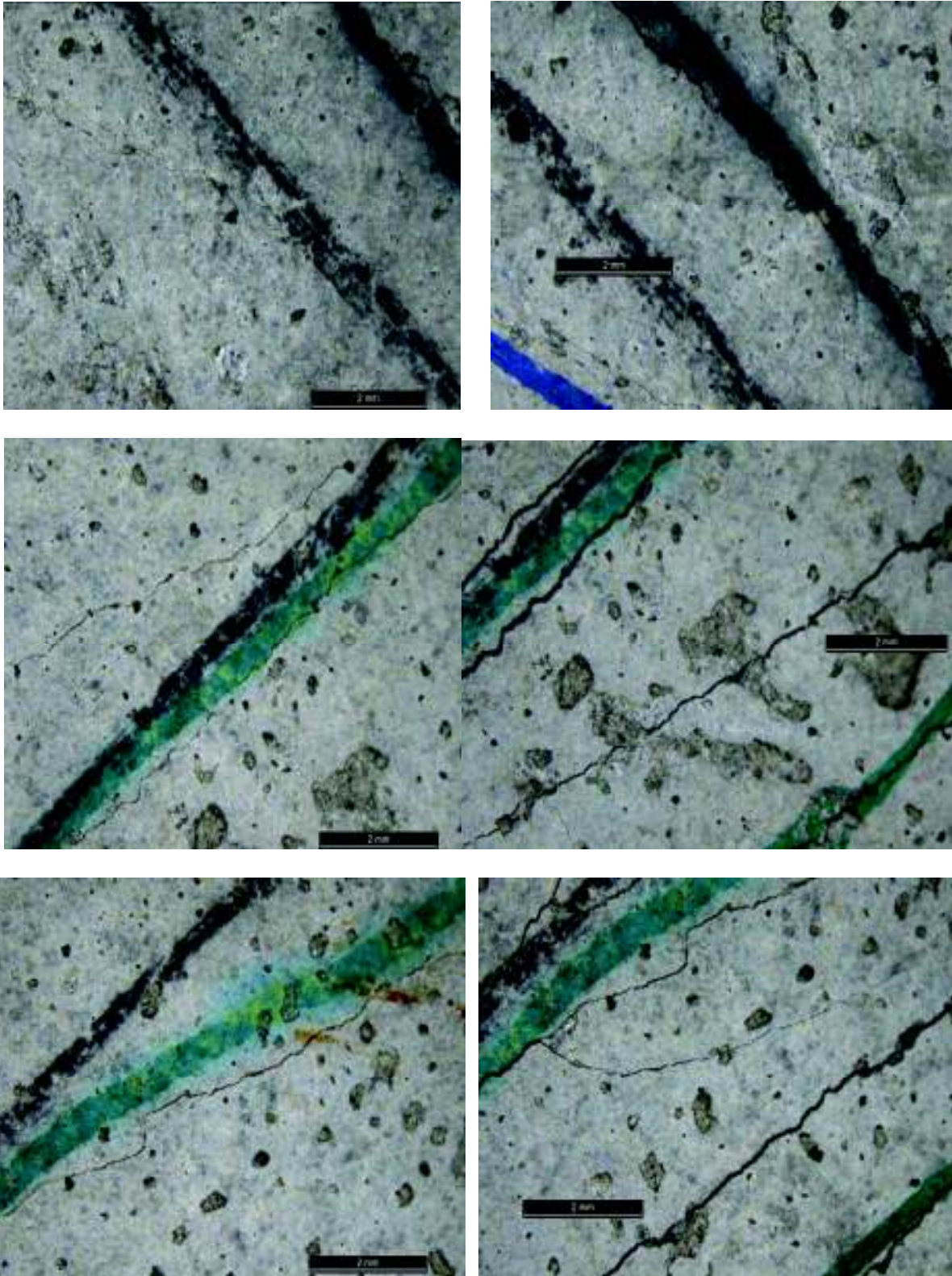


Fig. 6.117. M 4.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri: stânga: microfisuri după ciclul I; dreapta: microfisuri după ciclul II de încărcare

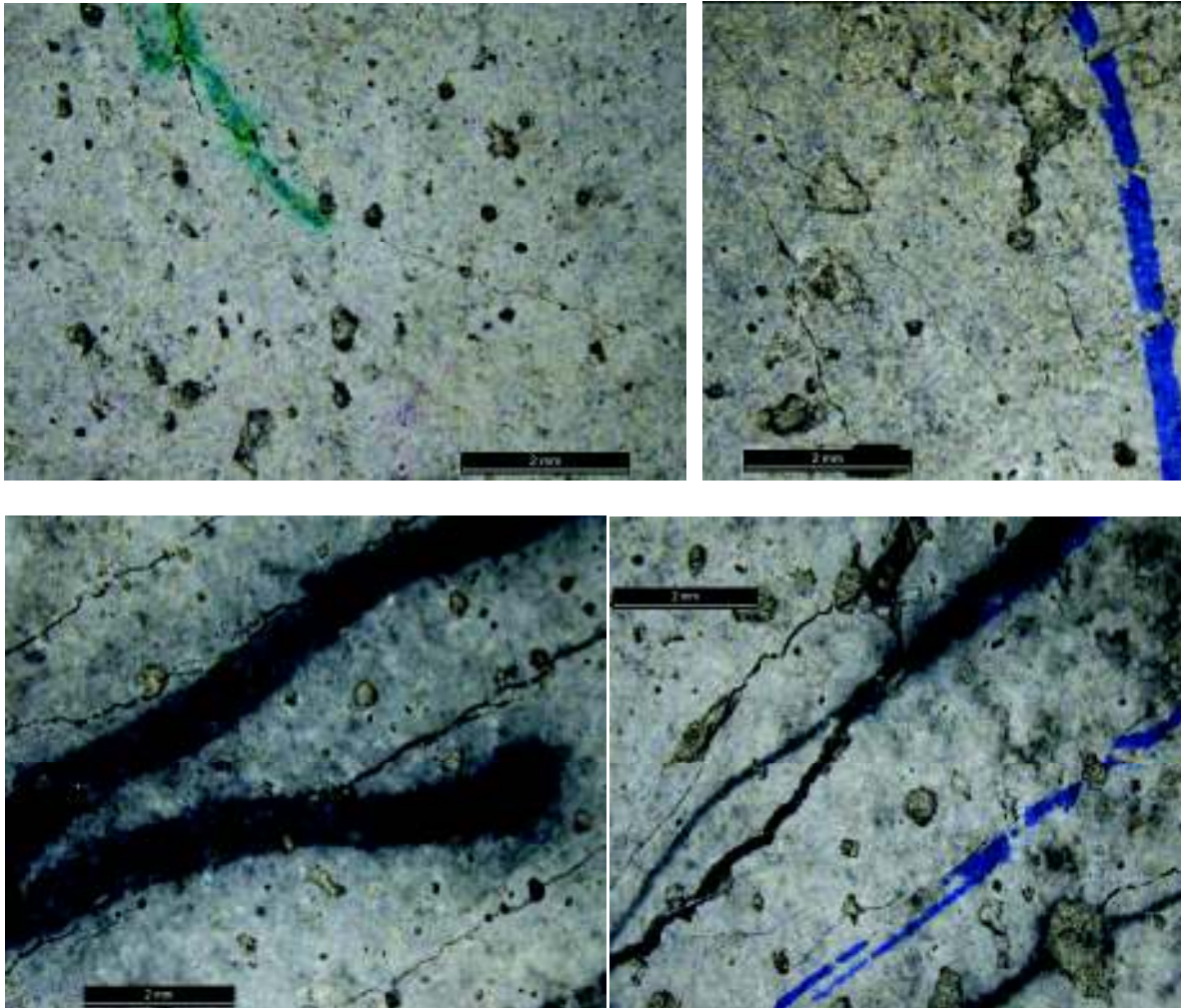


Fig. 6.118. M 4.2 SH, ciclul II, evoluția rețelei de microfisuri prin dezvoltarea de noi microfisuri sub șocurile ciclului II

Ciclul III, h = 1.5 m

Ciclul III de retestare induce un nivel ridicat de degradare în epruvetă, atât prin prisma deformațiilor cât și a deschiderii de fisurare. Fisurile critice evoluează după cum urmează, înregistrând deschideri previzibile: fisura F1 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 1.7 mm deschiderea maximă $w_{\max}=1144.2 \mu\text{m}$ și valoare medie $w_{\text{med}}=933.8 \mu\text{m}$, iar fisura F2 prezintă pe lungimea critică de aproximativ 3.6 mm deschiderea maximă $w_{\max} = 1893.9\mu\text{m}$ și valoarea medie $w_{\text{med}} = 1801.1 \mu\text{m}$. (vezi Figura 6.119). În același timp se evidențiază capacitatea de a dezvolta noi ramificații și microfisuri sub șocuri, net superioară compozițiilor precedente (vezi Anexa 6.8 și Figura 6.120).

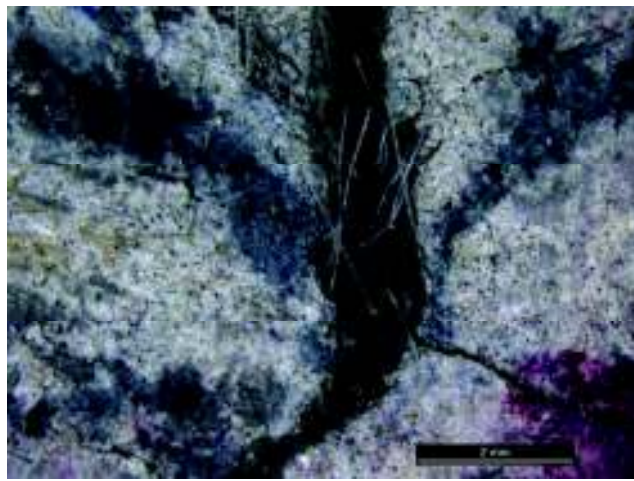
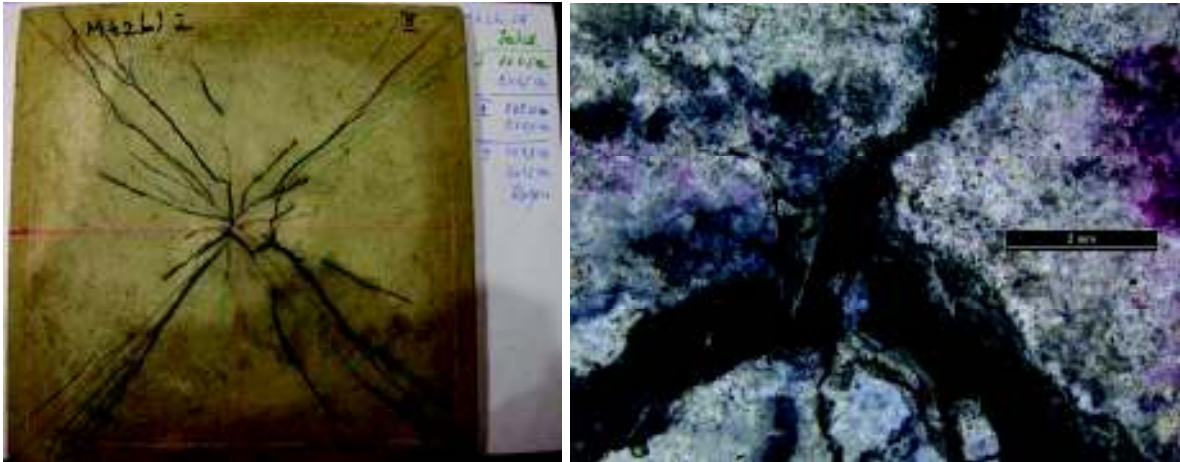


Fig. 6.119. M 4.2 SH, ciclul III, rețea microfisuri: (stânga: ansamblul rețelei; dreapta: detaliu central - microscop)

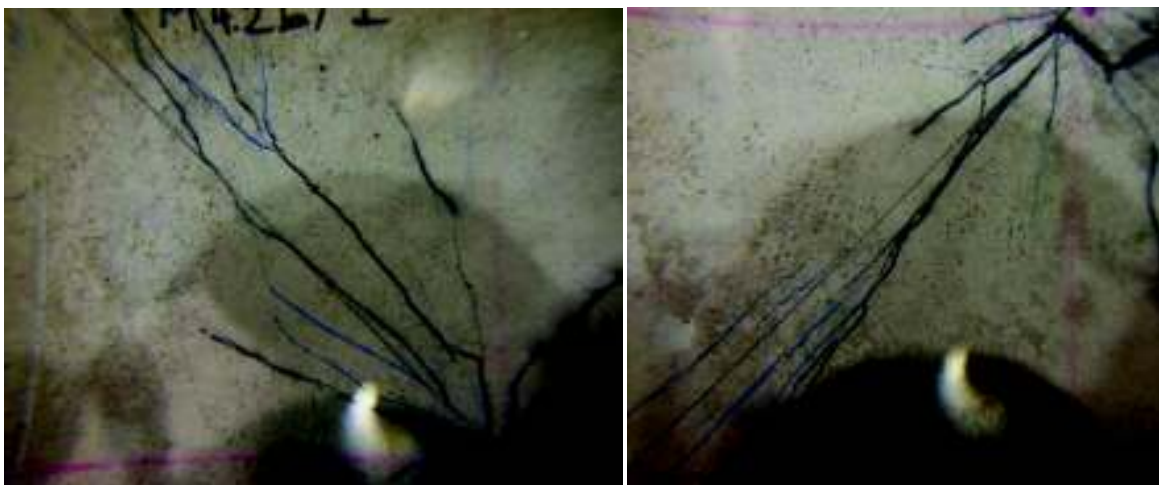


Fig. 6.120. M 4.2 SH, ciclul III, evoluția rețelei prin dezvoltarea unui număr semnificativ de microfisuri și ramificații sub succesiunea șocurilor

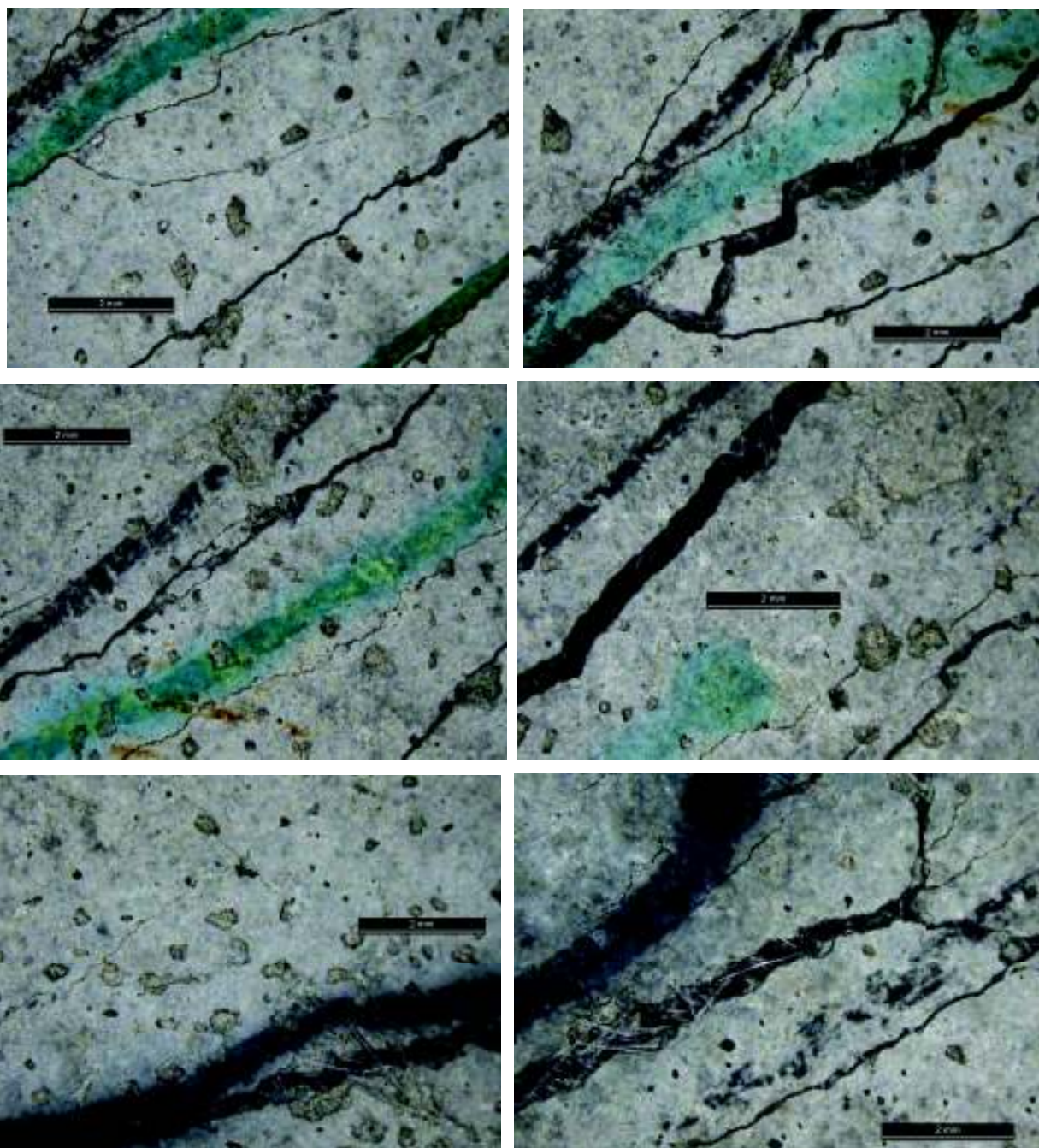


Fig. 6.121. M 4.2 SH, Ciclul III, evoluția rețelei de microfisuri: stânga: microfisuri după Ciclul II; dreapta: microfisuri după ciclul III de încărcare

Primul șoc din ciclul III de retestare induce o deformare semnificativă în epruvetă, evoluția semnificativă a fisurilor în partea superioară a plăcii, degradarea puternică a unui colț, în zona de prindere a clamelor de fixare și apariția fisurilor în zona centrală, de contact (vezi Anexa 6.8).

Evoluția rețelei de microfisurare se aliniază în tipicul probelor anterior analizate: se produce preponderent deschiderea suplimentară a fisurilor inițiale simultan extinderii lungimii lor (vezi Figura 6.121).

7 CONCLUZII

7.1 Îndeplinirea obiectivelor cercetării

Obiectivul 1: a fost atins printr-un studiu intensiv al literaturii de specialitate, materializat prin prezentarea stadiului actual de cunoaștere privind eficiența mecanismelor de autovindecare ale materialelor cementoase, cuprins în Capitolul 2;

Obiectivul 2: a fost atins prin dezvoltarea unor compoziții cementoase avansate de tip ECC cu materiale locale, evaluate sub aspect fizico-mecanic și sub aspectul capacității de autovindecare, în cadrul Capitolului 3;

Obiectivul 3: a fost atins prin dezvoltarea și optimizarea compozițiilor ECC cu superioare la solicitările din încovoiere și impact, pe parcursul Capitolului 4;

Obiectivul 4: a fost atins prin evaluare experimentală specifică, detaliată în cadrul Capitolului 5 și Capitolului 6;

Obiectivul 5: a fost atins prin evaluare experimentală specifică, detaliată în cadrul Capitolului 5 și Capitolului 6;

Obiectivul 6: În urma cercetărilor efectuate în cadrul stagiului doctoral, sunt propuse direcțiile de dezvoltare prezentate la punctul 7.3.

7.2 Contribuții originale și concluzii finale

Prin teză se aduc următoarele contribuții originale:

- abordarea unei tematici de cercetare de vârf, cu cele două direcții: a) descifrarea mecanismelor de autovindecare a compozitelor cementoase; b) dezvoltarea betoanelor ductile (de tip ECC), ambele în premieră în România;
- concepția și realizarea unor compoziții ECC inovatoare, realizate cu materiale locale și individualizarea unui amestec cu potențial de autovindecare autogenă, utilizat la realizarea structurilor prefabricate hibride;
- optimizarea unor compoziții ECC cu potențial de autovindecare;
- concepția unui program experimental complex, având ca scop evaluarea capacității de autovindecare a compozitelor ECC în urma deprecierii probelor specifice prin solicitări la întindere prin încovoiere (4PB) și impact/ șoc (DWT);
- elaborarea a două metodologii de evaluare a capacității de autovindecare a ECC-urilor depreciate în urma testelor specifice anterior menționate, prin identificarea a două seturi de indicatori de cuantificare a gradului de autoreparare (SR).

Autoarea tezei apreciază că demersul de cercetare și-a îndeplinit toate obiectivele propuse. Așa cum se pune în evidență în Figurile 7.1 și 7.2, compozițiile ECC prezintă un potențial real de autovindecare (SH) atât sub aspectul capacității de rezistență dovedită prin coeficienții de restituție, cât și din punctul de vedere al elasticității. Evoluția în timp a autovindecării poate fi estimată în primul rând prin controlul raportului FA/C și tipul de cenușă. Cu cât ponderea cenușii este mai mare în conținutul de liant, potențialul de vindecare se distribuie pe o durată mai mare. În final trebuie subliniat că amestecurile ECC se pretează a fi proiectate individualizat, pentru o mare diversitate de aplicații structurale.

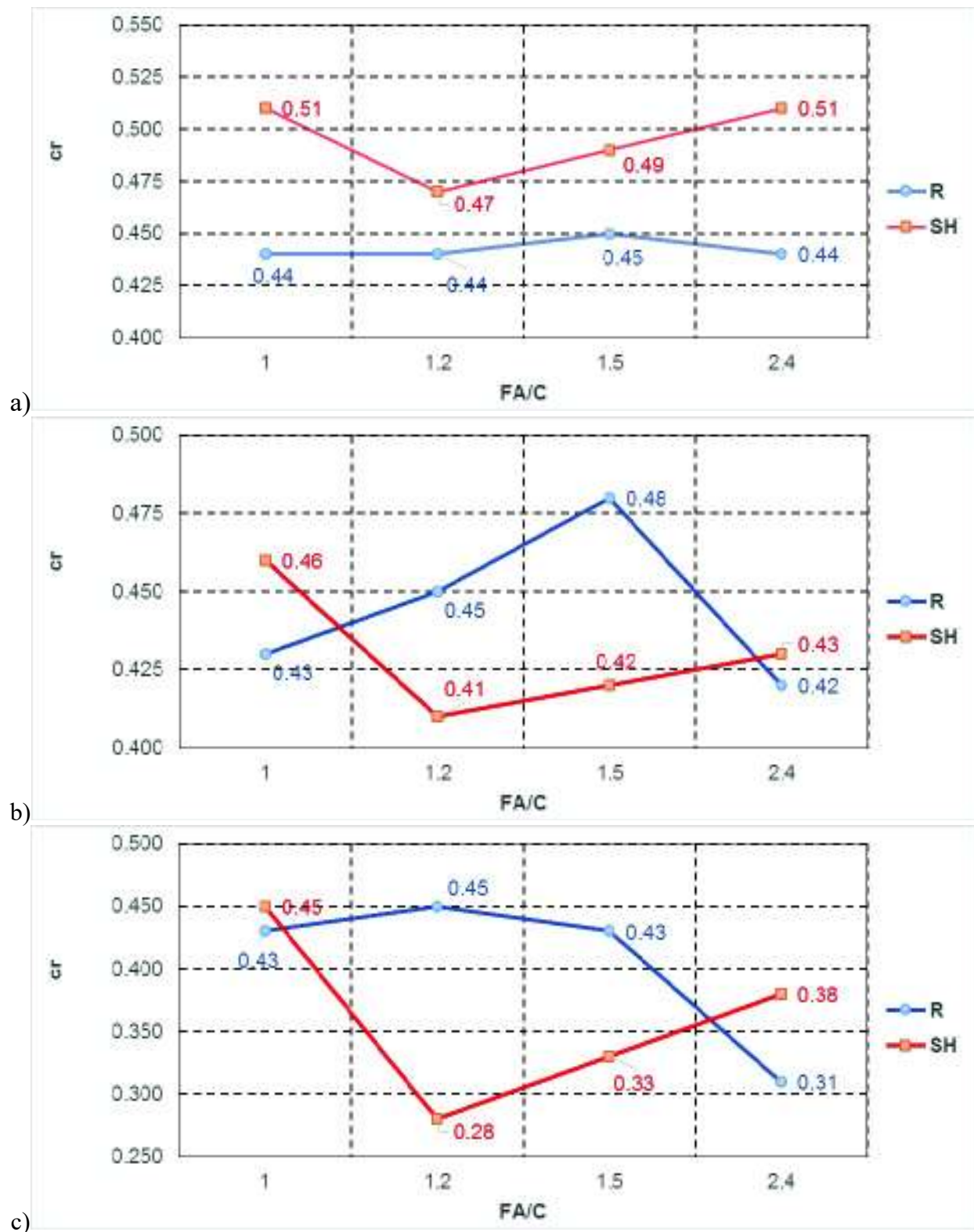


Fig. 7.1. Coeficienți de restituire la testul de impact a) ciclul I $h=0.5$ m; b) ciclul II $h=1.0$ m; c) ciclul III $h=1.5$ m

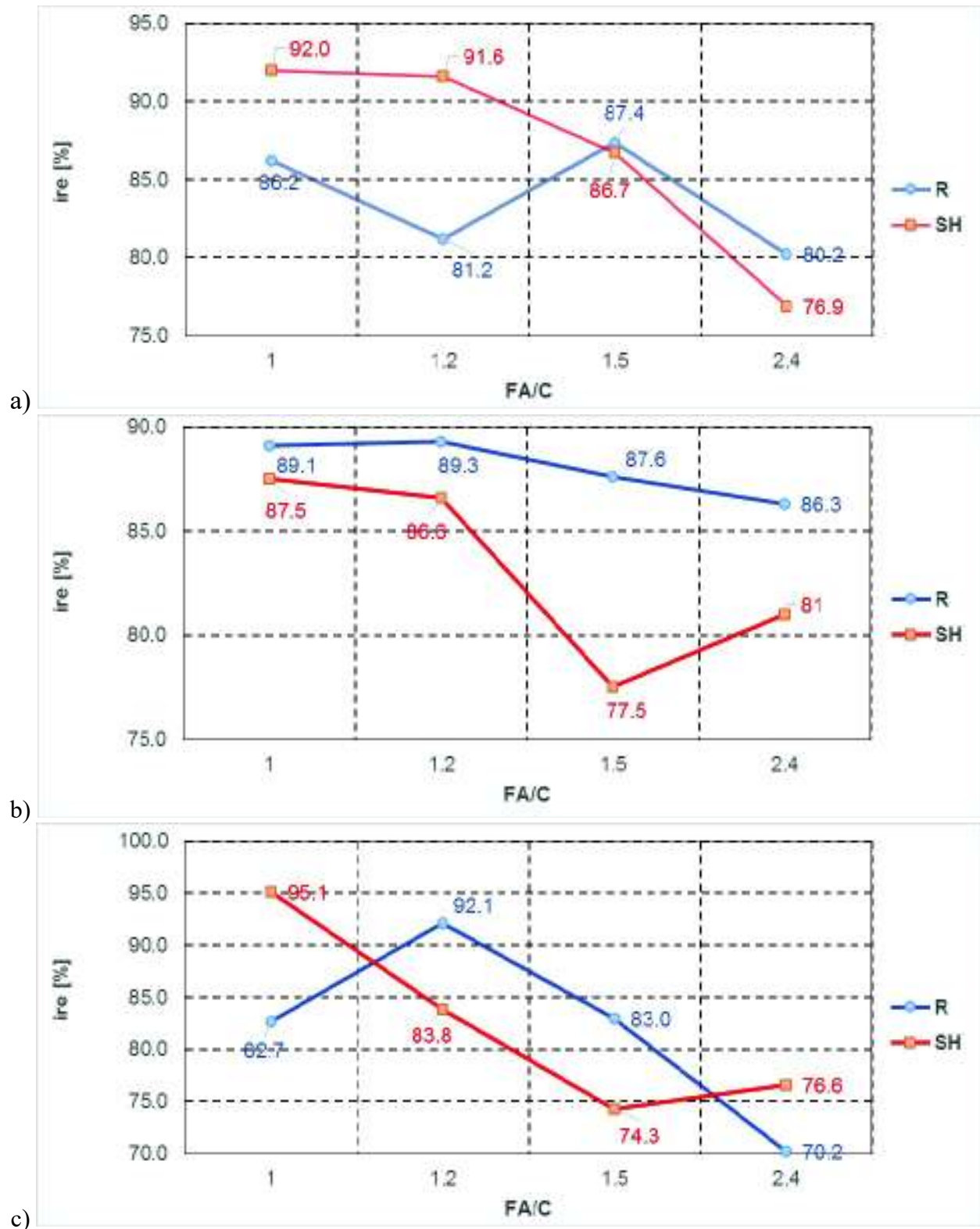


Fig. 7.2. Indicele de revenire elastică la testul de impact a) ciclul I $h=0.5$ m; b) ciclul II $h=1.0$ m; c) ciclul III $h=1.5$ m

7.3 Direcții viitoare de cercetare

Pe termen scurt se are în vedere:

- procesarea statistică pentru stabilirea eficienței autosigilării fisurilor;
- procesarea în continuare a datelor experimentale pentru probele efectuate (evaluările acustice, încercări alternative la impact).

Pe termen mediu și lung se propun:

- proiectarea și optimizarea unor compoziții ECC cu procent ridicat de cenușă;
 - studiul pe termen lung a potențialului de autovindecare a compozitelor cementoase cu procent ridicat de cenușă de termocentrală (FA);
 - optimizarea compozițiilor ECC pentru performanțe superioare la impact, prin utilizarea unor sisteme de fibre hibride;
 - proiectarea unor compoziții ECC cu controlul sigilării fisurilor pe termen scurt, mediu și lung.

Bibliografie

1. De Rooij, M. R., and E. Schlangen. "Self-healing phenomena in cement-based materials." Draft of State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee (2011).
2. Mihashi H. and Nishiwaki T., Development of Engineered self-healing and self-repairing concrete-State-of-the-Art, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 10, 2012, pp. 170-184.
3. GHOSH, Swapan Kumar (ed.). Self-healing Materials, Wiley-VCH, 2009, 307 pp.
4. Van Tittelboom, Kim, and Nele De Belie. "Self-healing in cementitious materials—A review." *Materials* 6.6 (2013): 2182-2217
5. Dry, Carolyn. "Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices." *Smart Materials and Structures* 3.2 (1994): 118
- 6 White, S.R.; Sottos, N.R.; Moore, J.; Geubelle, P.; Kessler, M.; Brown, E.; Suresh, S.; Viswanathan, S. Autonomic healing of polymer composites. *Nature* 2001, 409, 794–797.
7. Zwaag, Sybrand, ed. Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science. Springer Science+ Business Media BV, 2008.
8. CEBV-FIB Model Code
9. BUCHMAN J., ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999, 87 pp.
10. LAUER, Kenneth R., et al. Autogenous healing of cement paste. In: *Journal Proceedings*. 1956. p. 1083-1098.
11. Igarashi, S., M. Kunieda, and T. Nishiwaki. "Autogenous Healing in cementitious materials." Technical committee report: JCI-TC075B, Japan Concrete Institute, Digest ed (2009): 91-102.
12. Neville, Adam. "Autogenous healing—a concrete miracle." *Concrete International* 24.11 (2002): 76-82.
13. Edvardsen, C., Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, *ACI Materials journal - American Concrete Institute*, 1999, Vol. 96, No. 4, pp. 448-454.

14. Yang, E.-H., Designing added functions in Engineered cementitious composites, Ph.D. Thesis, University of Michigan, Department of Civil Engineering, Michigan, USA, 2008
15. Van Tittelboom, Kim, et al. "Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation." *Construction and Building Materials* 37 (2012): 349-359.
16. Li, V. C., *Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance* (2nd Edn.), 2008.
17. Jansson, A., Löfgren, I., & Gylltoft, K. (2008). Design methods of fibre reinforced concrete: a state-of-the-art review. Submitted to *Nordic Concrete Research*.
18. Romualdi, N.P. and Batson, G.B., Mechanics of crack arrest in concrete. *Proc. ASCE Eng. Mech. J.*, 1963, 89(EM3): 147–168.
19. Romualdi, J.P. and Mandel, J.A., Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short lengths of wire reinforcement. *Proc. ACI J.* 1964, 61(6), 657–671.
20. Aveston, J., Cooper, G.A., and Kelly, A., Single and multiple fracture. In *The Properties of Fiber Composites*, Conference Proceedings IPC Science and Technology Press, Guildford, U.K 1971, pp. 15–24.
21. Krenchel, H. and Stang, H., Stable microcracking in cementitious materials. In *Brittle Matrix Composites 2*, Brandt, A.M. and Marshall, J.H., Eds., 1989, pp. 20–33. Elsevier, Amsterdam.
22. Allen, H.G.: Stiffness and strength of two glass-fiber reinforced cement laminates. *J. Composite Mater.* 1971, 5(2), 194–207.
23. Lankard, D.R., Preparation, properties and applications of cement based composites containing 5–20 percent steel fiber reinforcement. In *Steel Fiber Concrete*, Shah, S.P. and Skarendahl, A., Eds. Elsevier, Amsterdam, 1986.
24. Naaman, A.E., SIFCON: Tailored properties for structural performance. In *High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites*, Reinhardt, H.W. and Naaman, A.E., Eds., 1992, pp. 18–38. E&FN Spon, London.
25. Geneza unei științe și celebritatea savantului George (Gogu) Constantinescu - *Univers ingineresc*, anul XXII, nr. 16 (494), 16 - 31 august 2011.

26. Noi tipuri de betoane speciale - C. Avram, C. Bob, Editura Tehnică, 336 pag., 1980.
27. Muntean R., Elemente eficiente din beton armat dispers cu fibre sintetice din polipropilenă – Teză de doctorat, 2012, Universitatea Transilvania Braşov.
28. Ghid privind stabilirea criteriilor de performanță și a compozițiilor pentru betoanele armate dispers cu fibre metalice GP 075-2002.
29. Naaman A. E. (2003): Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 241-252.
30. Bentur A. and Mindess S., *Fibre reinforced cementitious composites* 2nd edition, Taylor & Francis, 2006
31. Snoeck, Didier. Self-healing and microstructure of cementitious materials with microfibres and superabsorbent polymers. 2015. PhD Thesis. Ghent University.
32. Chanvillard, G., & Rigaud, S. (2003, June). Complete characterization of tensile properties of Ductal® UHPFRC according to the French recommendations. In *Proceedings of the 4th International RILEM workshop High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites* (pp. 21-34).
33. Li VC. From Micromechanics to structural engineering ± the design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE J of Struc Mechan and Earthquake Eng* 1993;10(2):37±48.
34. Li, V.C., Stang, H., & Krenchel, H. (1993). Micromechanics of Crack Bridging in Fibre-Reinforced Concrete. *Materials and Structures*, 26(8), 486-494.
35. Li, V.C., Wang, S., & Wu, C. (1997). Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492.
36. Wang, S. (2005). *Micromechanics Based Matrix Design for Engineered Cementitious Composites*. University of Michigan, Ann Arbor, pp. 221.
37. Li, V.C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., & Saito, T. (2002). Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol - Engineered Cementitious Composites (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*, 99(5), 463-472.

38. Wang, S., & Li, V.C. (2006). Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances. Paper presented at the International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, RILEM Publications S.A.R.L., 65-73
39. Sahmaran, M., Li, M., & Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, 104(6), 604-611.
40. Li VC, Kanda T. Engineered cementitious composites for structural applications. *ASCE J Mater Civil Engin* 1998;10(2):66±9.
41. Wang, Y., Backer, S., & Li, V.C. (1987). An experimental study of the synthetic fibre reinforced cementitious composites. *Journal of Materials Science*, 22(12), 4281-4291.
42. Boshoff, W.P. and van Zijl G.P.A.G., (2007), Tensile creep of SHCC. In Proceedings of the Fifth International RILEM Workshop on High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCC 5), Reinhardt, H.W. and Naaman, A.E., Eds., pp. 87–96. RILEM, Paris
43. Li, V.C. and Lepech, M., (2004), Crack-resistant concrete material for transportation construction. In Proceedings of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting, Compendium of Papers CD-ROM, Paper 04-4680. Transportation Research Board, Washington, D.C.
44. Li, V.C., Fischer, G., Kim, Y.Y., Lepech, M., Qian, S., Weimann, M., and Wang, S., (2003) Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites, RC-1438. Michigan Department of Transportation, Lansing.
45. Li, V.C., Horikoshi, T., Ogawa, A., Torigoe, S., and Saito, T. 2004a. Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater. J.*, 101(3), 242–248
46. Li, M., Sahmaran, M., and Li, V.C. 2007. Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment. In Proceedings of the Fifth International RILEM Workshop on High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCC 5), Reinhardt, H.W. and Naaman, A.E., Eds., pp. 313–322. RILEM, Paris.
47. Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W., Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites. In Proceedings of the Fourth International RILEM

Workshop on High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4), Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W., Eds. 2003, RILEM, Paris

48. Wang, S. and Li, V.C.: High early strength engineered cementitious composites. *ACI Mater. J.* 2006a, 103(2), 97–105.

49. Wang, S. and Li, V.C.: Materials design of lightweight PVA-ECC. In *Proceedings of the Fourth International RILEM Workshop on High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4)*, Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W., Eds. 2003, pp. 379–390. RILEM, Paris.

50. Lepech, M.D., Li, V.C., Robertson, R.E., and Keoleian, G.A.: Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability. *ACI Mater. J.* 2007, submitted.

51. Li, V.C. and Yang, E.H.: Self-healing in concrete materials. In *Self-Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, van der Zwaag, S., Ed. 2007, pp. 161–193. Springer, New York.

52. Yang, Y., Lepech, M., and Li, V.C.: Self-healing of engineered cementitious composites under cyclic wetting and drying. In *Proceedings of the International Workshop on the Durability of Reinforced Concrete Under Combined Mechanical and Climatic Loads (CMCL)*, October 27–28, 2005, Qingdao, China, pp. 231–242.

53. Şahmaran, M., Yildirim, G., & Erdem, T.K. (2013). Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 89-101

54. Li, M., & Li, V.C. (2011). Cracking and Healing of Engineered Cementitious Composites under Chloride Environment. *ACI Materials Journal*, 108(3), 333-340.

55. Li, V.C., Lim, Y.M., & Chan, Y.W. (1988). Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. *Composites Part B*, 29(6), 819-827.

56. Kan, L., & Shi, H. (2012). Investigation of self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) materials. *Construction and Building Materials*, 29, 348-356.

57. Qian, S.Z., Zhou, J., & Schlangen, E. (2010). Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 686-693.

58. Snoeck, D., & De Belie, N. (2012). Mechanical and self-healing properties of cementitious composites reinforced with flax and cottonised flax, and compared with polyvinyl alcohol fibres. *Biosystems Engineering*, 111(4), 325-335.
59. Snoeck, D., & De Belie, N. (2015c). Repeated autogenous healing in strain-hardening cementitious composites by using superabsorbent polymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04015086, 1-11.
60. Snoeck, D., Dewanckele, J., Cnudde, V., & De Belie, N. (2015a). X-ray computed microtomography to study autogenous healing of cementitious materials promoted by superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Composites*, 1-11. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.016
61. Snoeck, D., Smetryns, P.-A., & De Belie, N. (2015d). Improved multiple cracking and autogenous healing in cementitious materials by means of chemically-treated natural fibres. *Biosystems Engineering*, 139, 87-99.
62. Li, V.C., & Herbert, E. (2012). Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218.
63. Homma, D., Mihashi, H., & Nishiwaki, T. (2009). Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites. *Advanced Concrete Technology*, 7(2), 217-228
64. Yang, E.-H., Yang, Y., & Li, V.C. (2007a). Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness. *ACI Materials Journal*, 104(6), 303-311.
65. Yan, P., & Chen, Z. (2014). Autogenous shrinkage of fly ash concrete with different water-binder ratios. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 42(5), 585-589.
66. Yildirim, G., Şahmaran, M., & Ahmed, H. (2014). Influence of Hydrated Lime Addition on the Self-Healing Capability of High-Volume Fly Ash Incorporated Cementitious Composites.
67. Zhou, Z.H., Li, Z.Q., Xu, D.Y., & Yu, J.H. (2011). Influence of Slag and Fly Ash on the Self-Healing Ability of Concrete. *Advanced Materials Research*, 306-307, 1020-1023.
68. De la Varga, I., Castro, J., Bentz, D.P., & Weiss, W.J. (2012). Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 1001-1008.

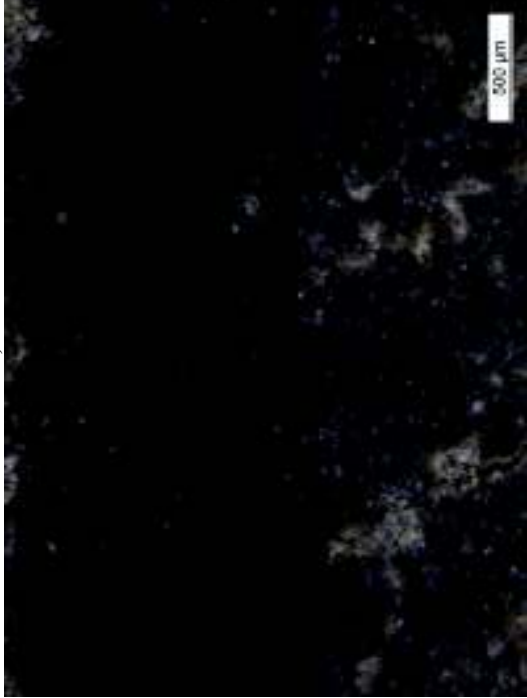
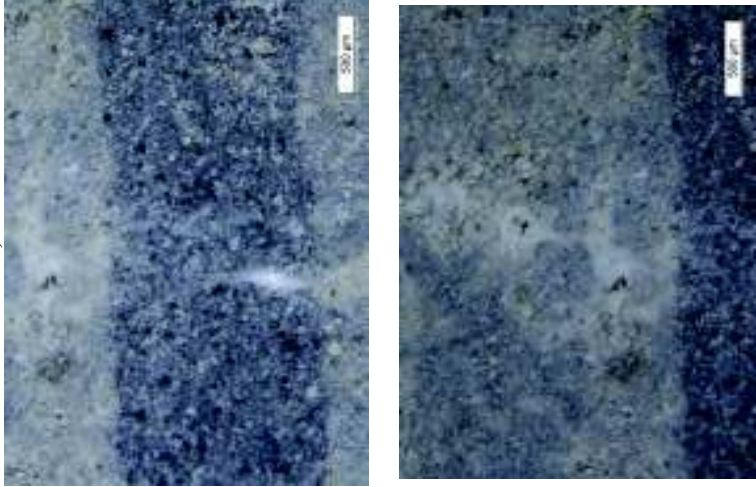
69. Na, S.H., Hama, Y., Taniguchi, M., Katsura, O., Sagawa, T., & Zakaria, M. (2012). Experimental Investigation on Reaction Rate and Self-healing Ability in Fly Ash Blended Cement Mixtures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(8), 240-253.
70. Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y., & Saito, T. (2009). Self-healing ability of fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Composites*, 31(3), 195-203.
71. Li, V. C. (2003). Durable overlay systems with engineered cementitious composites (ECC). *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 9(3), 215-234
72. Y.M. Lim, and V.C. Li, Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites. *J. Cement and Concrete Composites*, 19, 4, 373-385 (1997).
73. EN 196-1: 2006 - Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 1: Determinarea rezistențelor mecanice;
74. EN 450-1:2012 - Cenușă zburătoare pentru beton. Partea 1: Definiții, condiții și criterii de conformitate
75. Yang, E. H., & Li, V. C. (2012). Tailoring engineered cementitious composites for impact resistance. *Cement and Concrete Research*, 42(8), 1066-1071.
76. EN 1015-10:2002/A1:2007 - Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 10: Determinarea densității aparente a mortarului întărit;
77. EN 1015-11:2002/A1:2007 - Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 11: Determinarea rezistenței la încovoiere și compresiune a mortarului întărit
78. Cazan, Oana Eugenia. "Betoane de înaltă rezistență cu fibre mixte", 2013, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții.
79. Musselman, Eric. Characterizing blast and impact resistance of long carbon fiber reinforced concrete. Diss. The Pennsylvania State University, 2007.
80. Saatci S. (2007), Behaviour and modelling of reinforced concrete structures subjected to impact loads, Doctoral Thesis, University of Toronto, Toronto, Canada
81. Kennedy R. P. (1976), A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects *Nuclear Engineering and Design* 37(2):183-203.
82. Thomson, James Robert. "Engineering safety assessment. An introduction." (1987).

83. Ten Hoeve, John E., and Mark Z. Jacobson. "Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident." *Energy & Environmental Science* 5.9 (2012): 8743-8757.
84. Banthia N. P. (1987), Impact resistance of concrete, Doctoral Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
85. Banthia N., Mindess S., Bentur A., Pigeon M. (1989), Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine *Experimental Mechanics* 29(1):63-69.
86. Zhang J., Maalej M., Quek S. T. (2007), Performance of hybrid-fiber ECC blast/shelter panels subjected to drop weight impact *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(10):855-863.
87. Zhang J., Maalej M., Quek S. T., Teo Y. Y (2005), Drop weight impact on hybrid-fiber ECC blast/shelter panels, *Proceedings of third international conference on construction materials: performance, innovation and structural applications*, Vancouver, Canada.
88. <http://www.pdhonline.com/courses/s164/s164content.pdf>
89. Rehacek, Stanislav, et al. "Two Type of Impact Load Tests, Tested on Fibre Reinforced Concrete Specimens." *Procedia Engineering* 65 (2013): 278-283.
90. EN ISO 10545-5: Plăci și dale ceramice. Partea 5: Determinarea rezistenței la impact prin măsurarea coeficientului de restituire.
91. NBN B 27-005: Produse ceramice; Determinarea rezistenței la impact [80];
92. ACI Committee 544. (1989), Measurement of properties of fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal* 583-593.

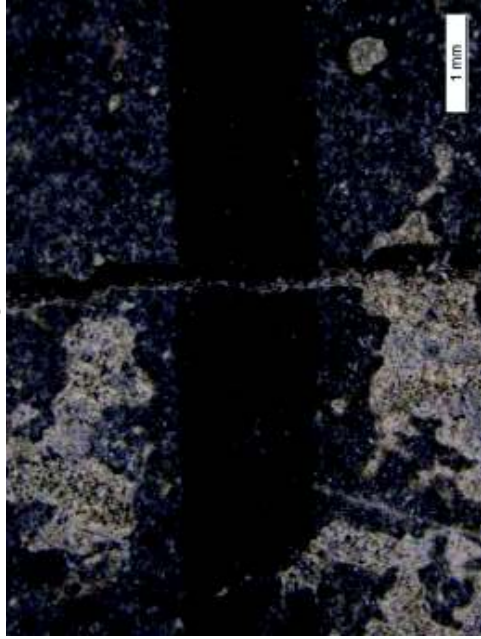
ANEXA 5.1– Analiză microscopică a evoluției fisurilor probelor ECC testate la 4PB

I. Compoziții supuse ciclului de încărcare până la rupere (R) sub diferite rate de încărcare

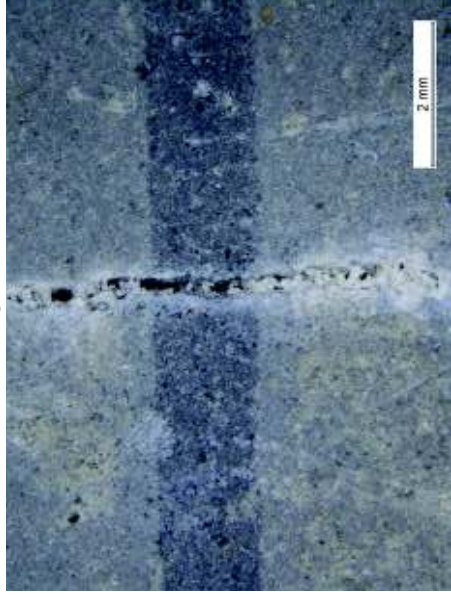
M 1.4 I R

Initial C1, C2	SH C1 SH, C2 SH
	

C3



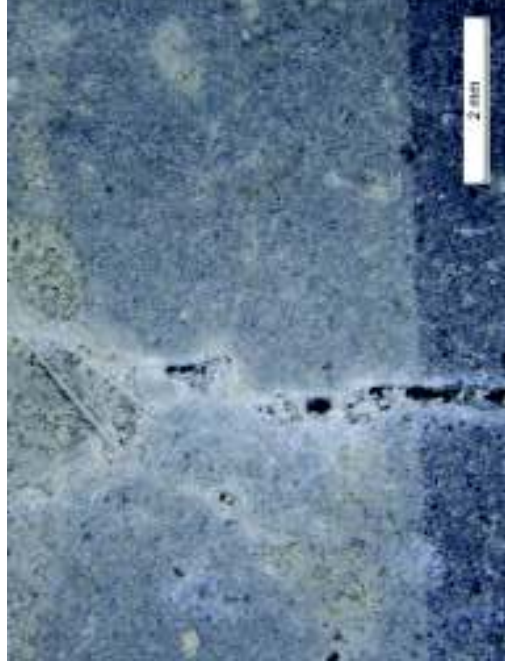
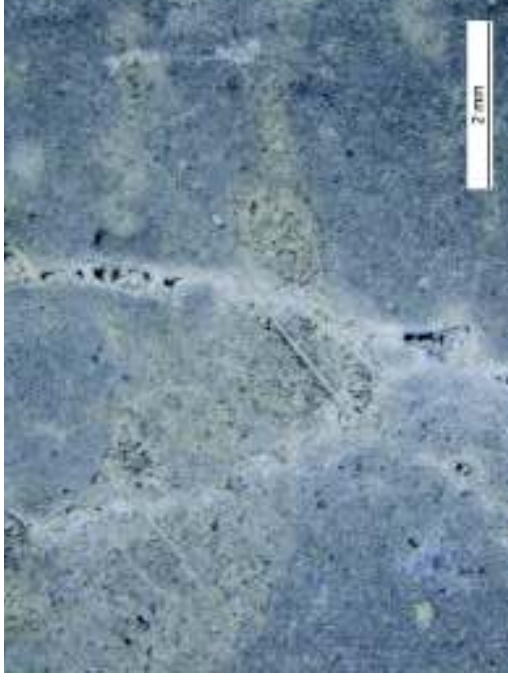
C3 SH



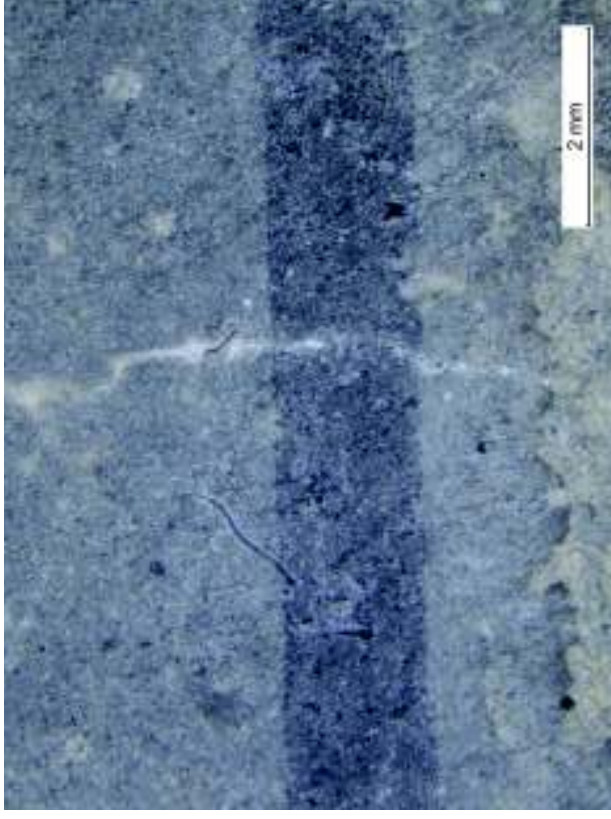
C3 ramificatie



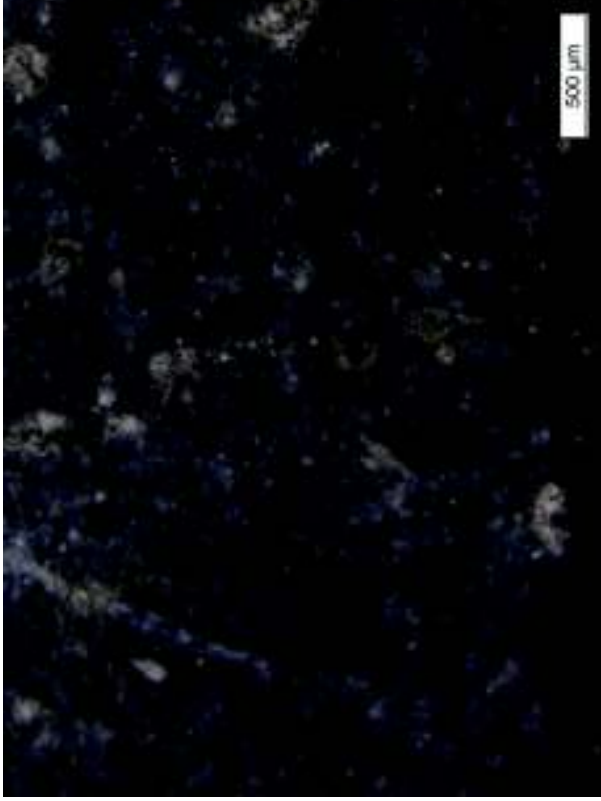
C3 ramificatie SH



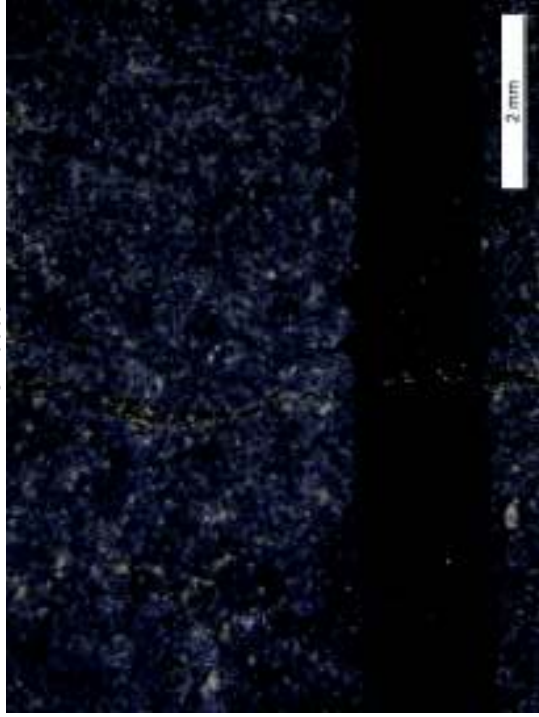
C4 - 0011



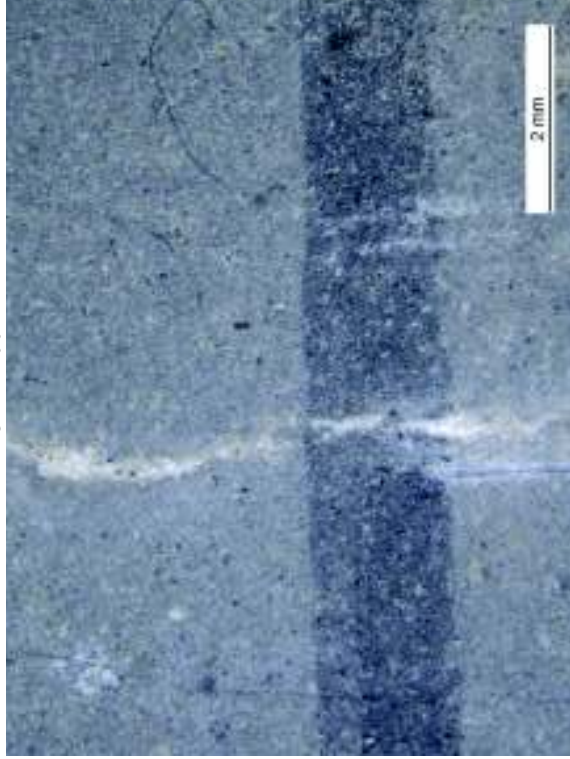
C4 - 0005



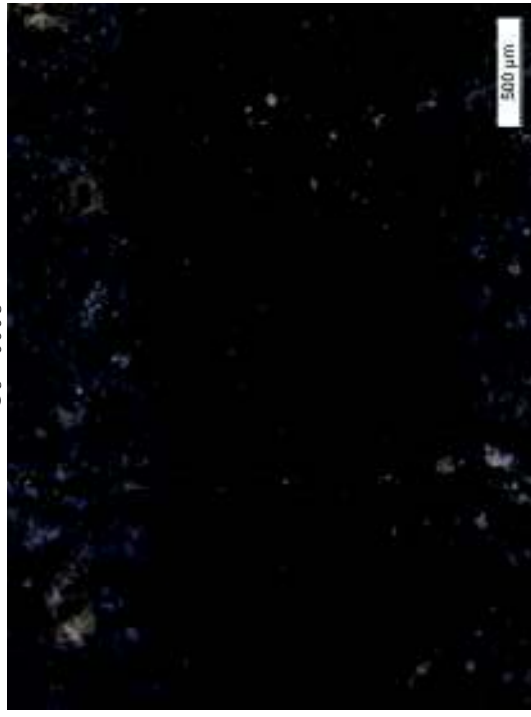
C5 - 0006



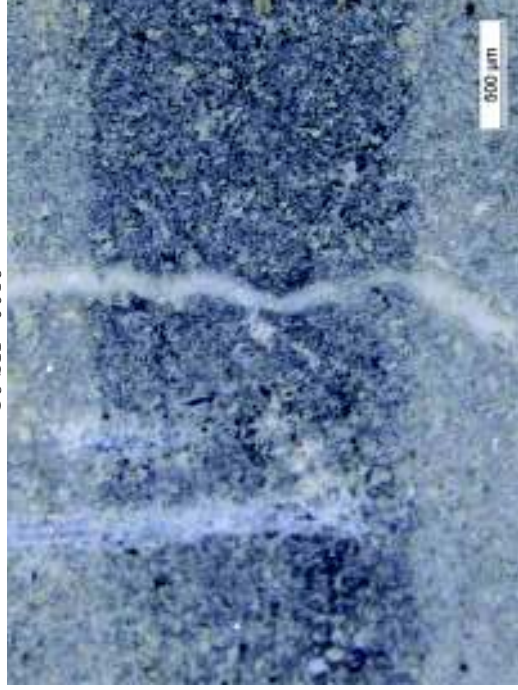
C5 SH - 0012



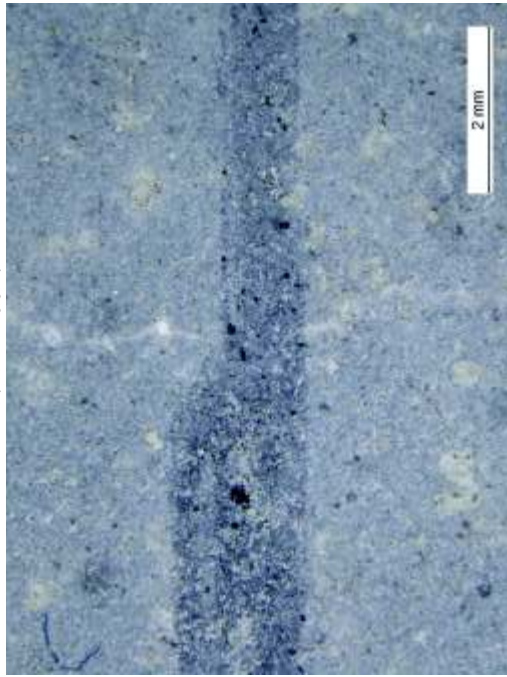
C6 - 0008



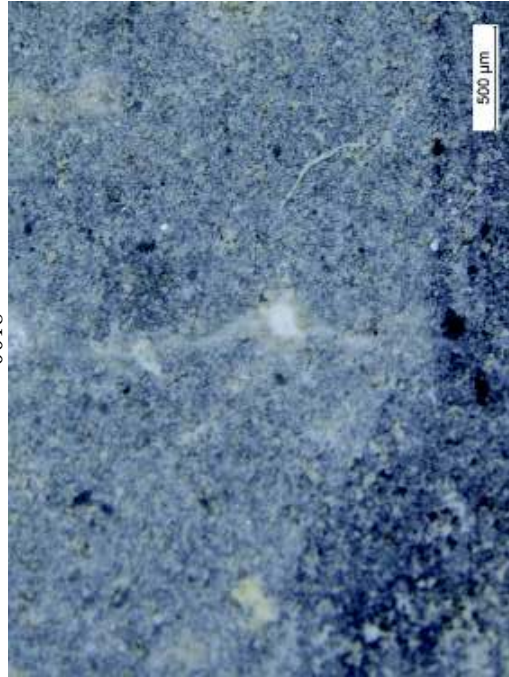
C6 SH - 0016



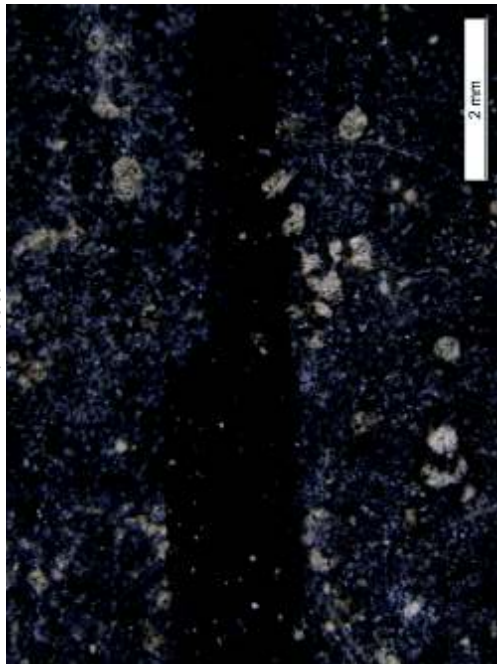
C7 SH - 0017



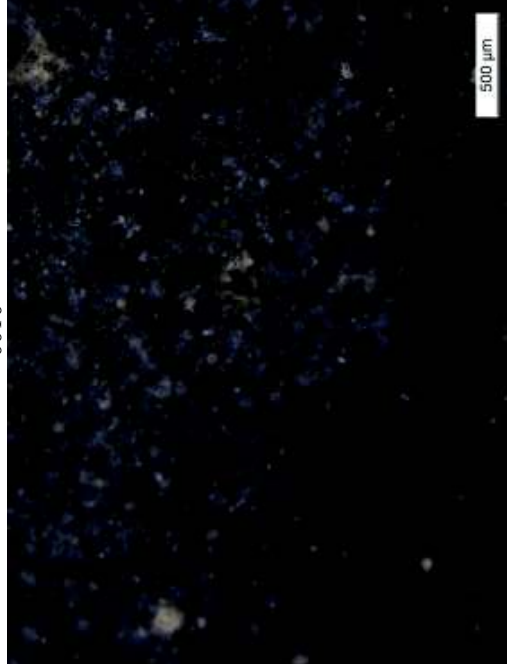
0018



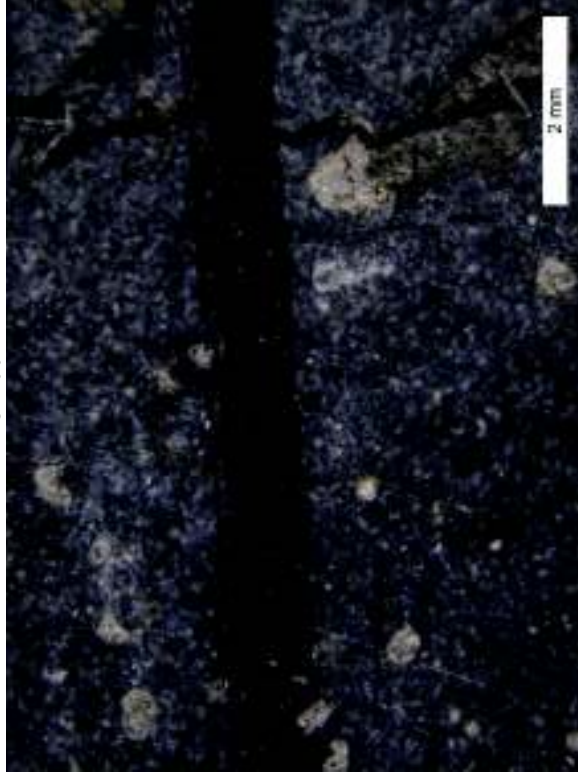
C7 - 0009



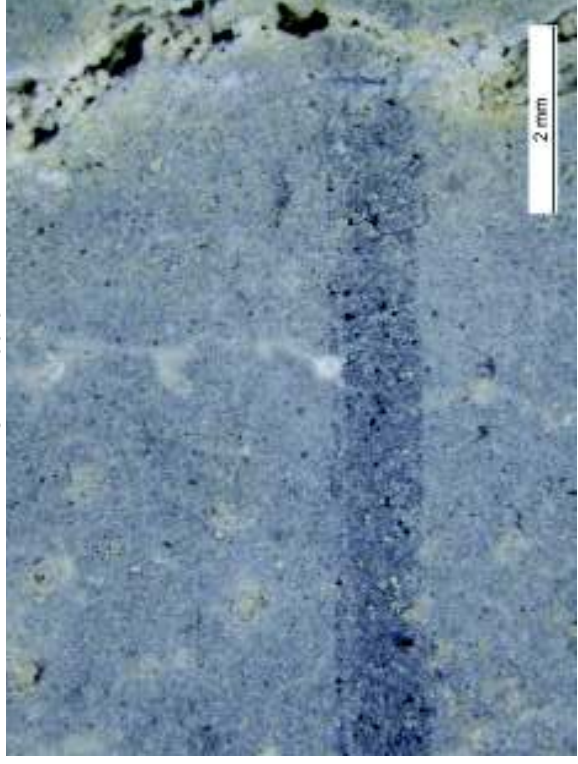
-0010



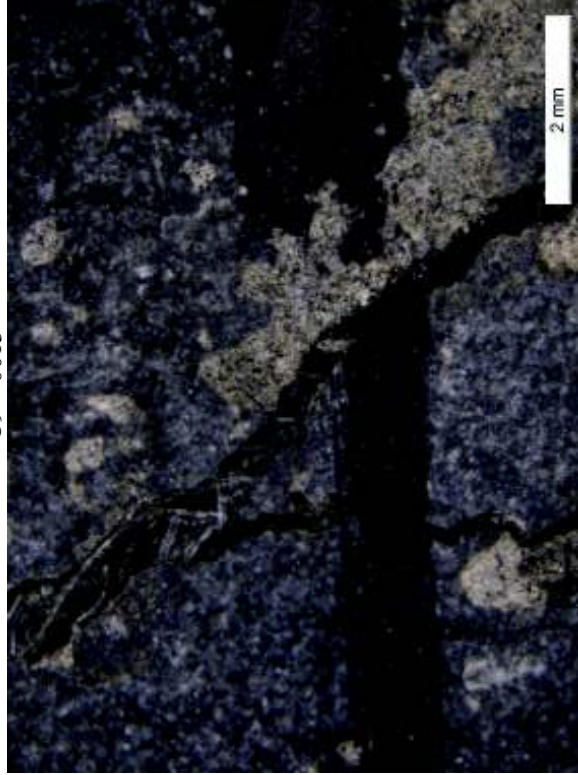
C8 - 0011



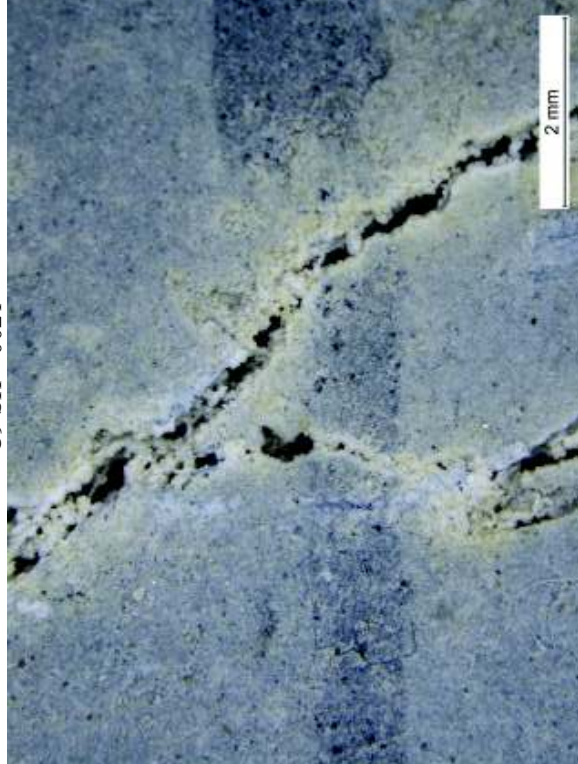
C8SH - 0019

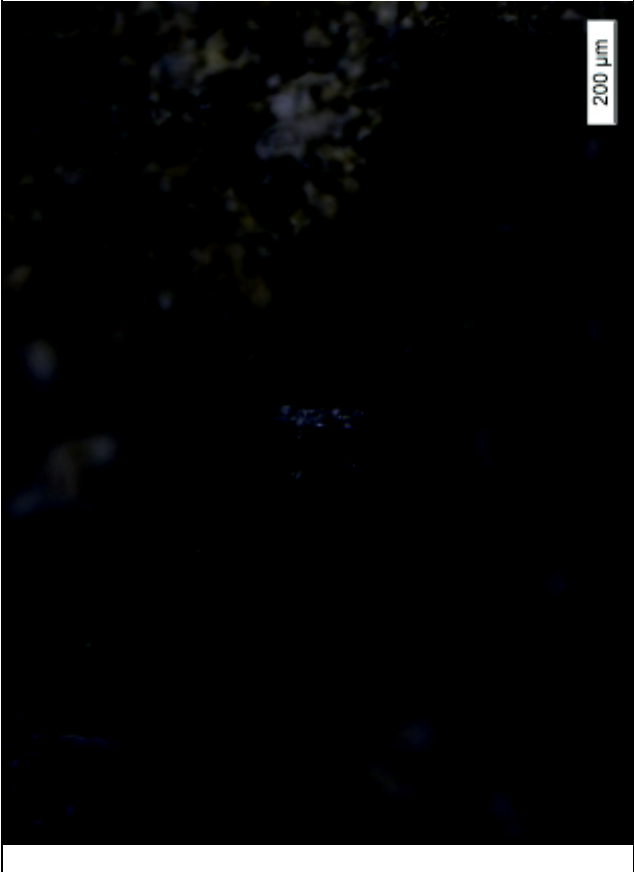


C9 - 0013

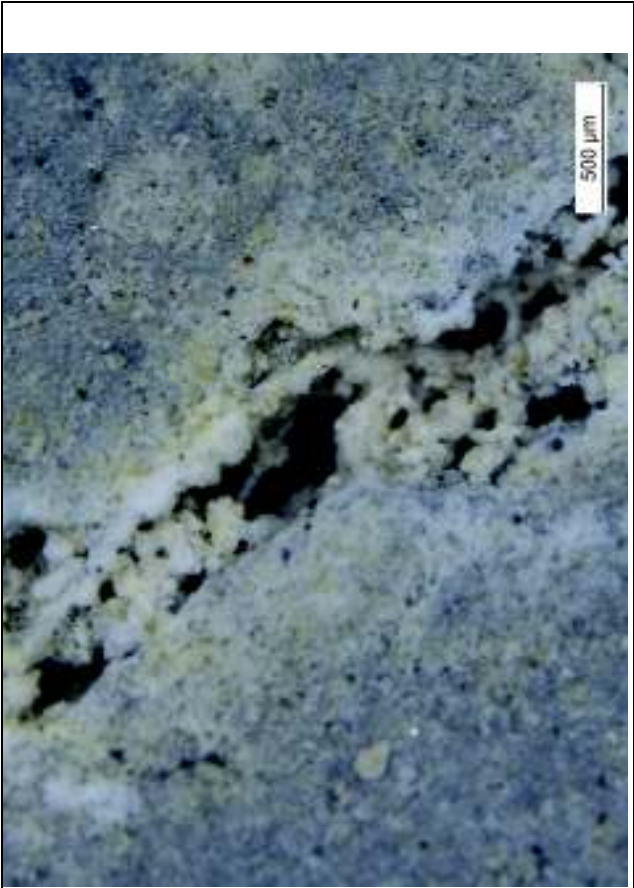


C9 SH - 0021

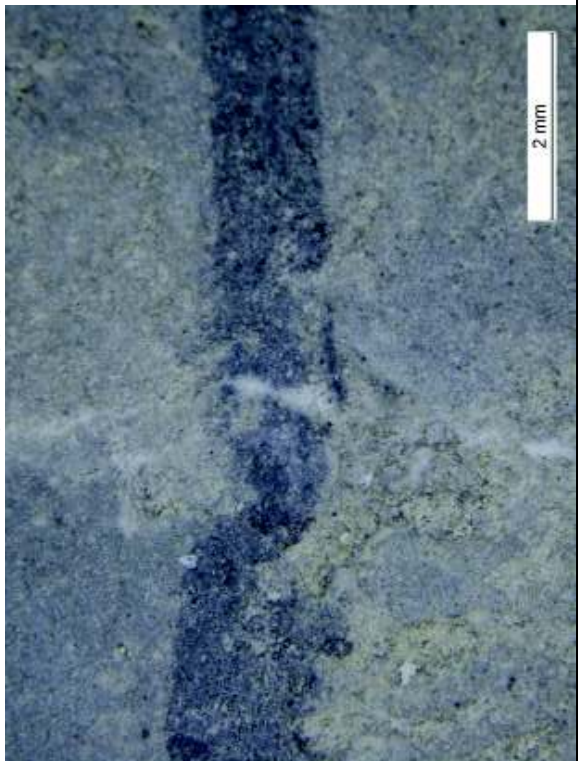
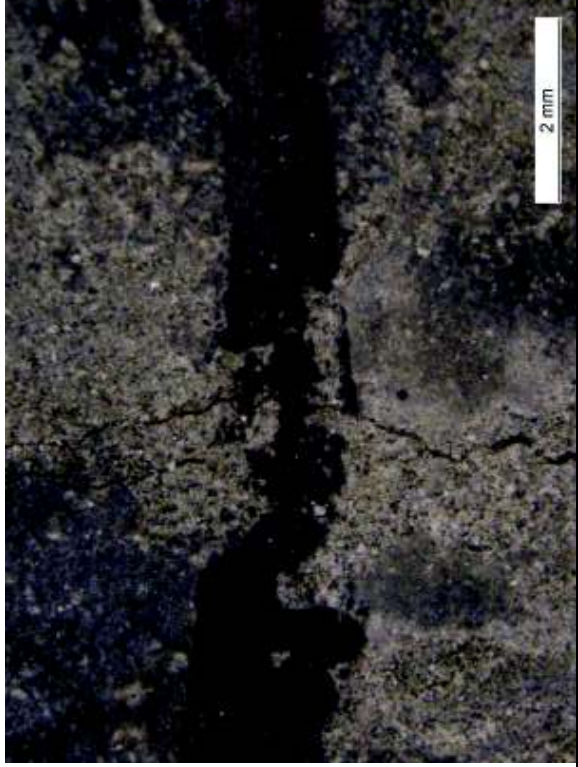


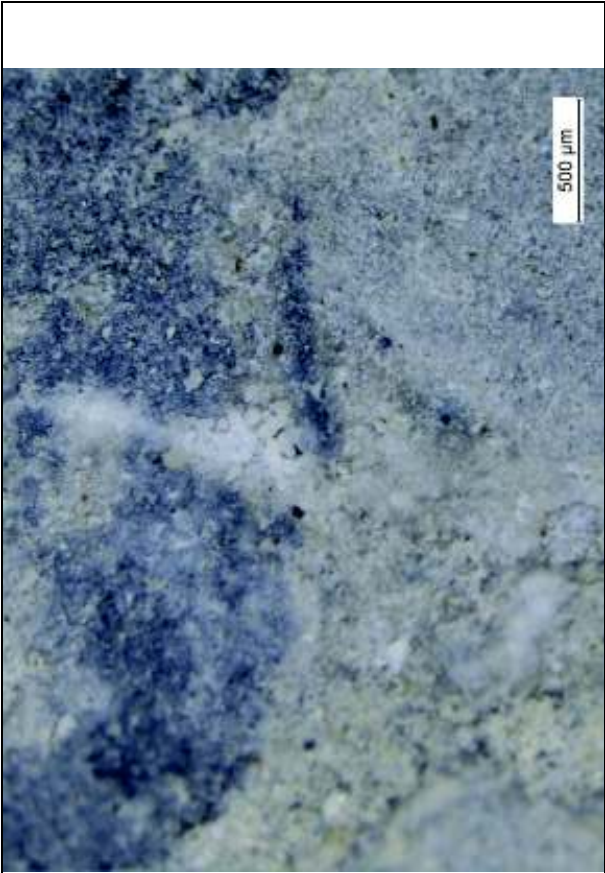


C10 - 0017



C10 SH - 0025

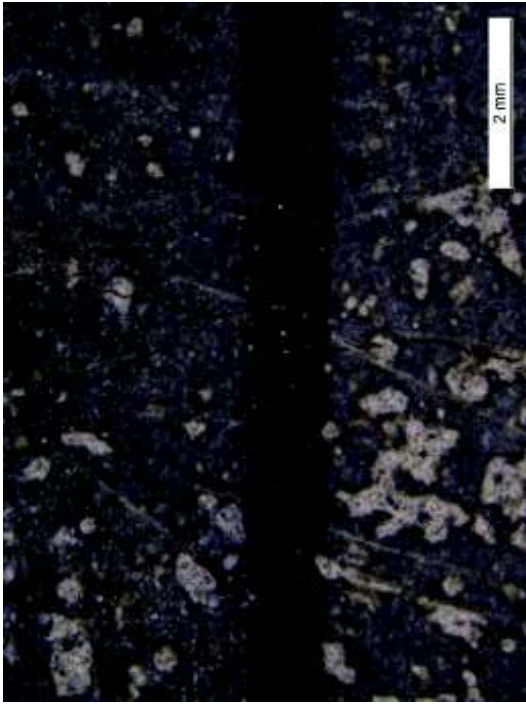




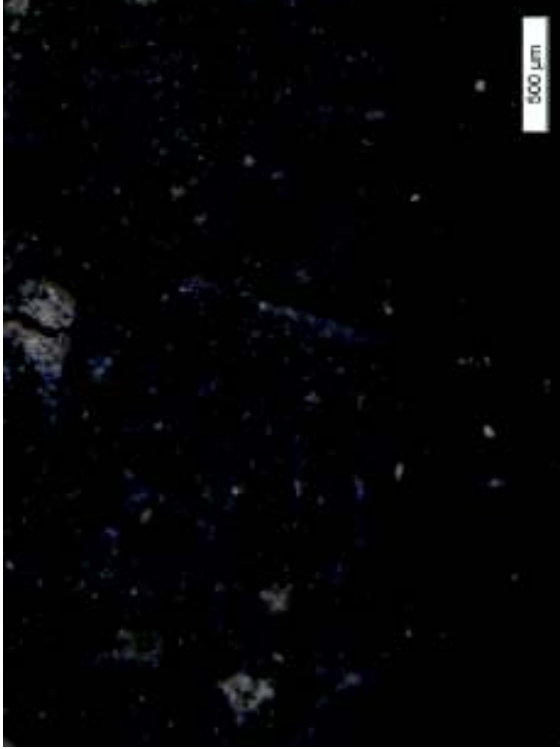
M 1.4 II R

Initial

Cl --

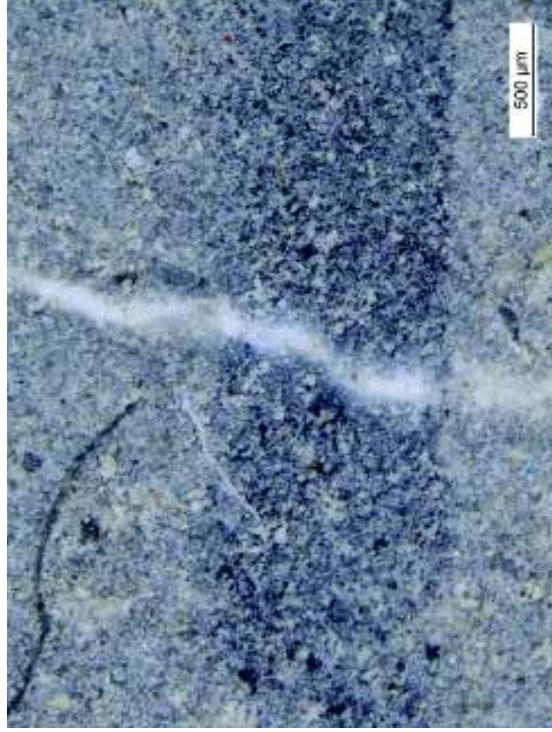
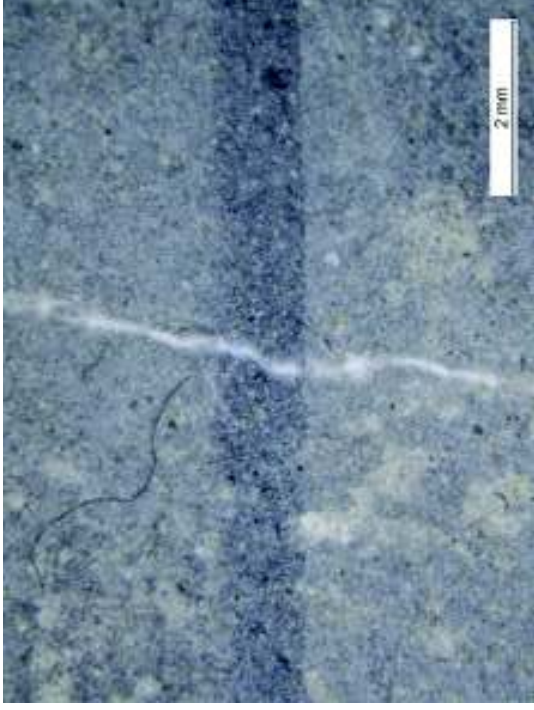


0001

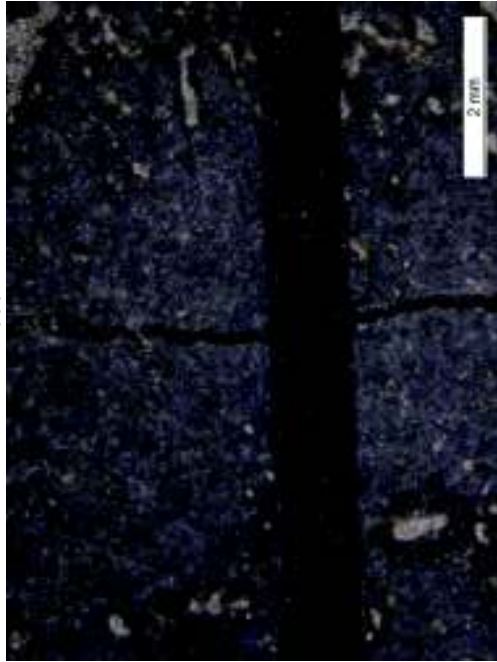


SH

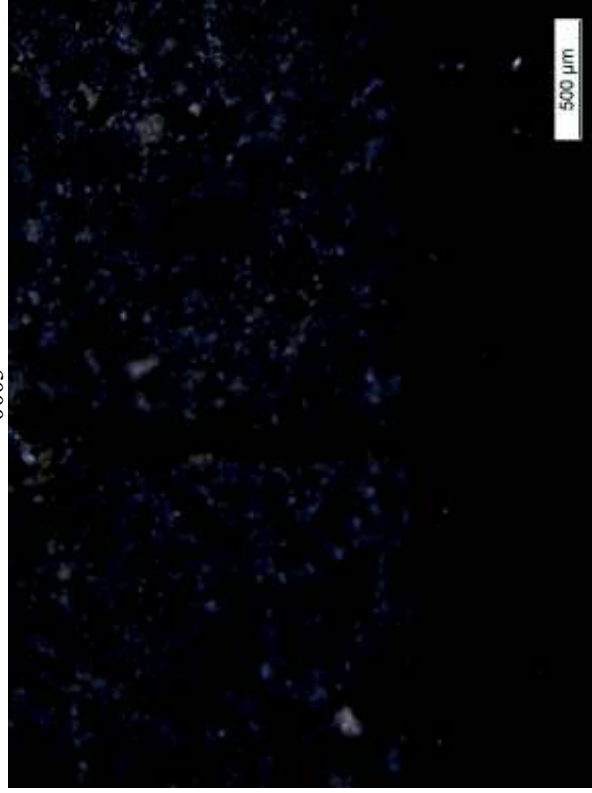
Cl SH -



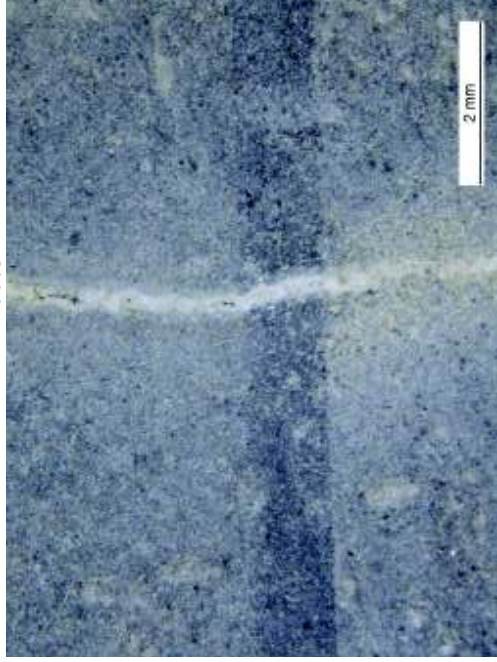
C2 - 0002



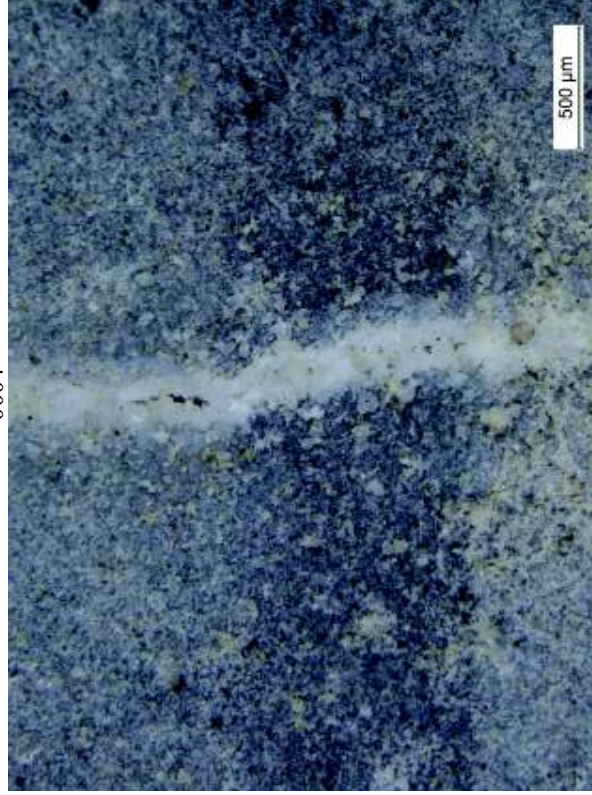
0003



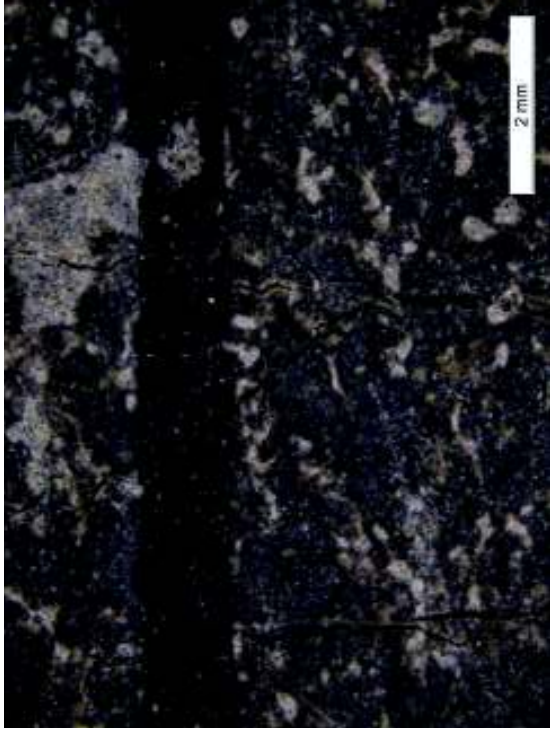
C2 SH - 0003



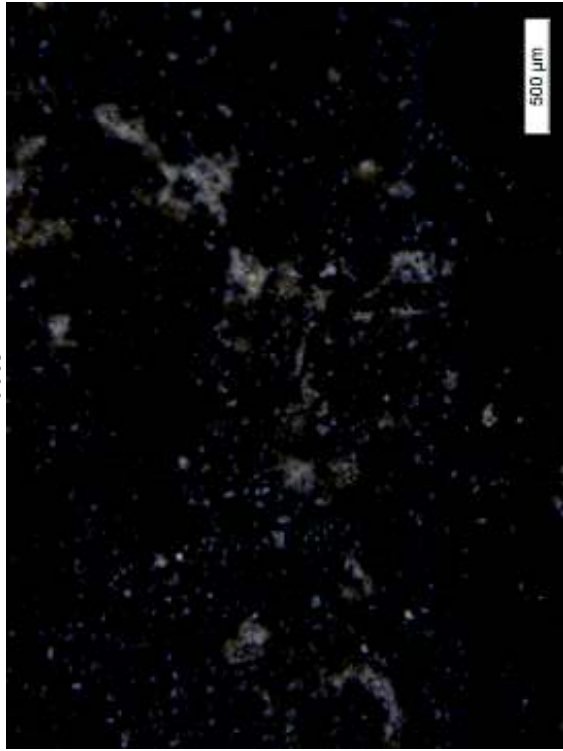
0004



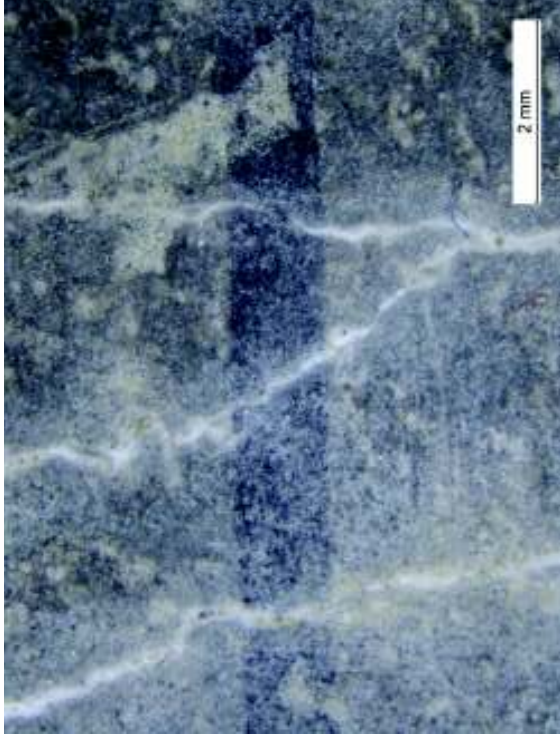
C3 + C4+ ramificatie 0004



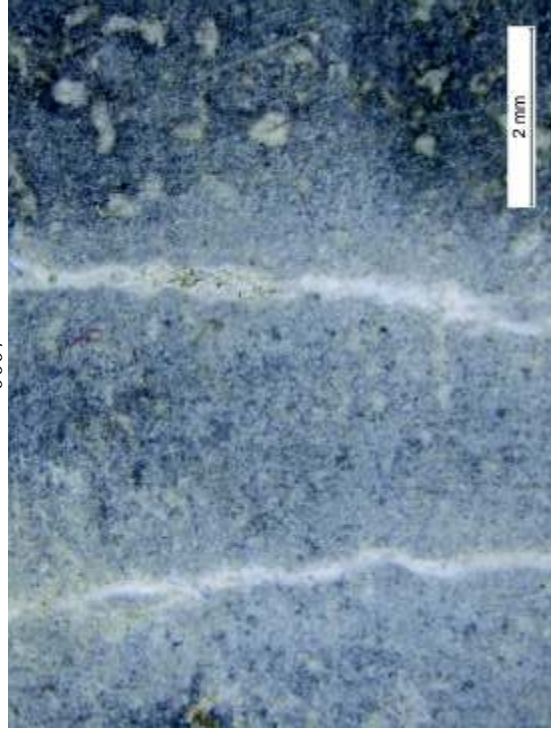
0005



C + C4 + ramificatie SH - 0006



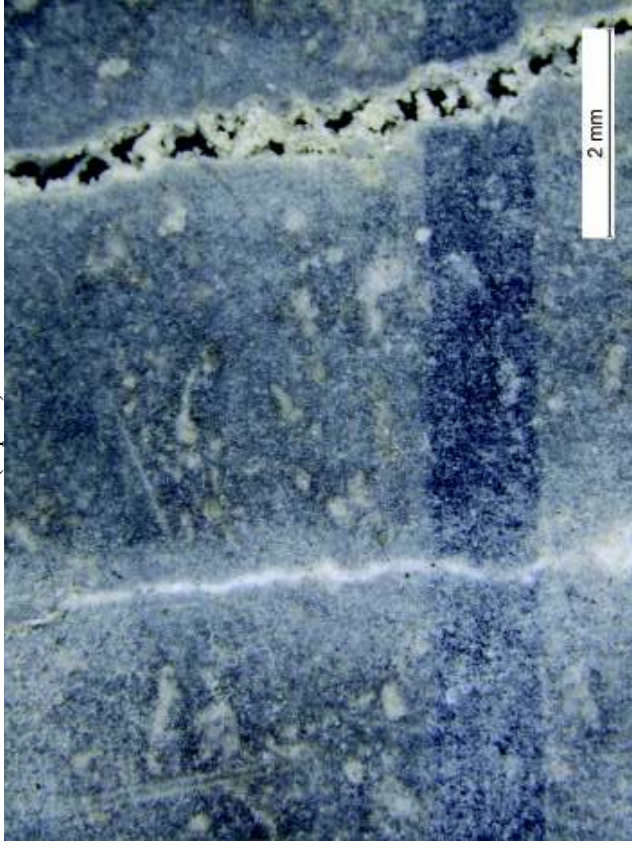
0007



C5 +C 6 (rupere) - 0008

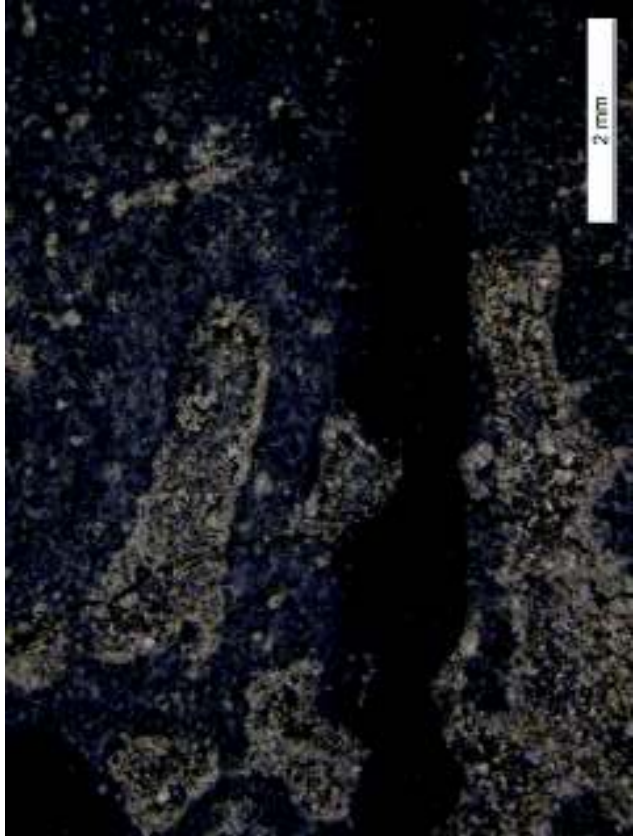


C5+ C6 (rupere) SH - 0010



M 1.4 III R

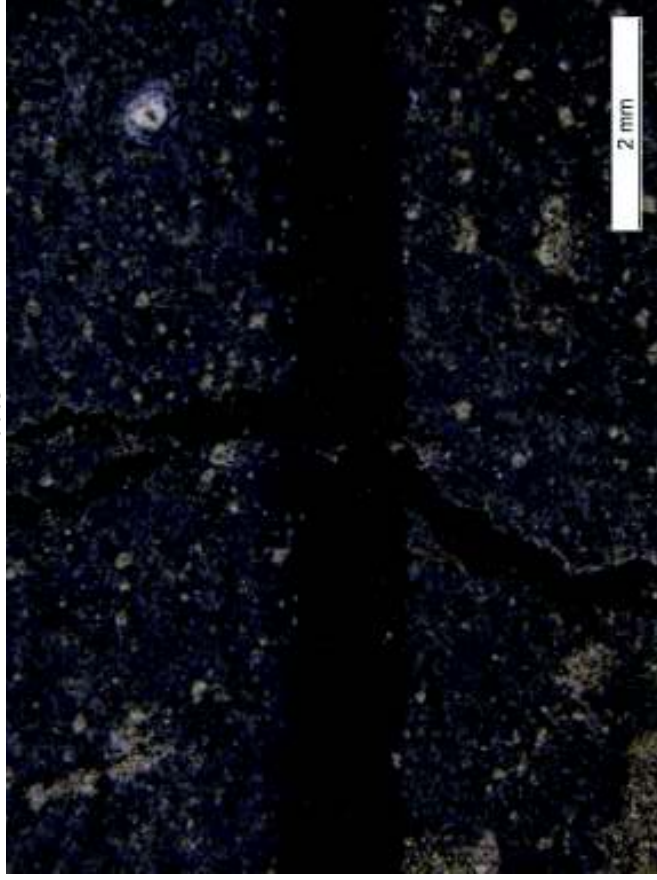
Initial
C1 - -



0001

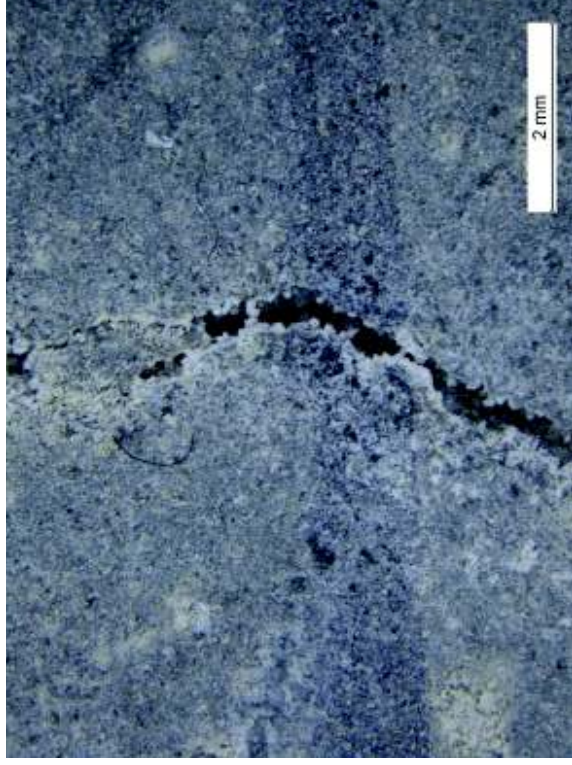
SH
C1 SH -
-

C2mare-0003 mare

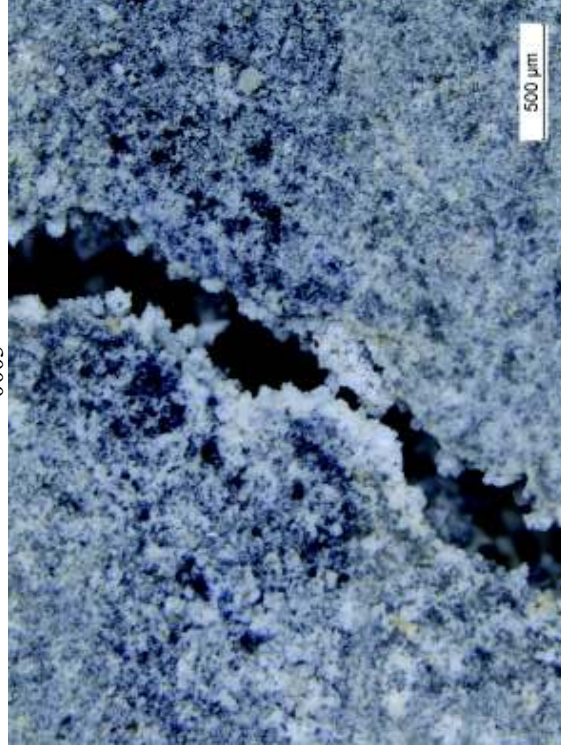


0003

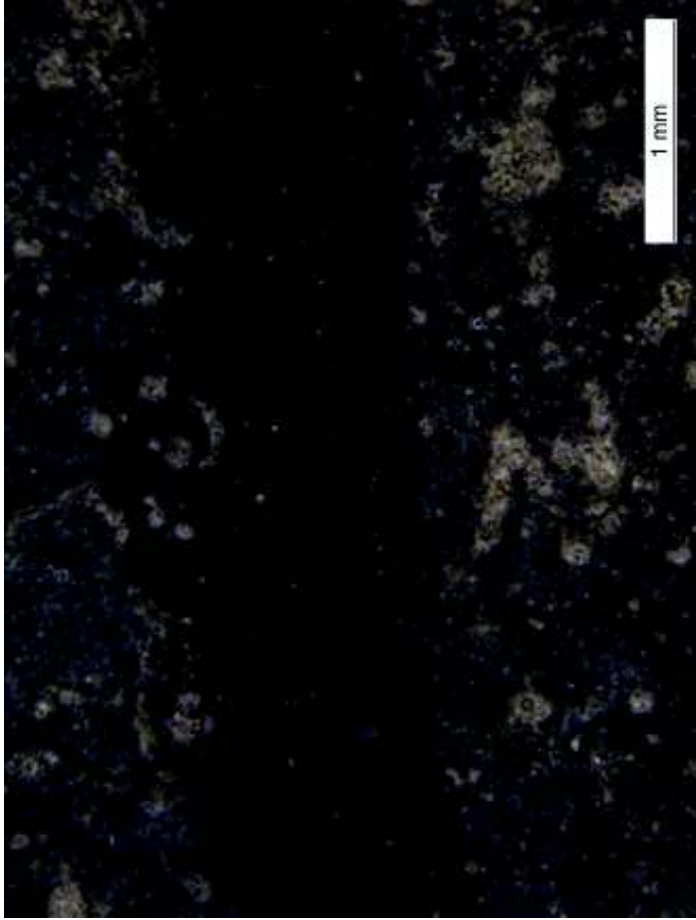
C2 SH - -



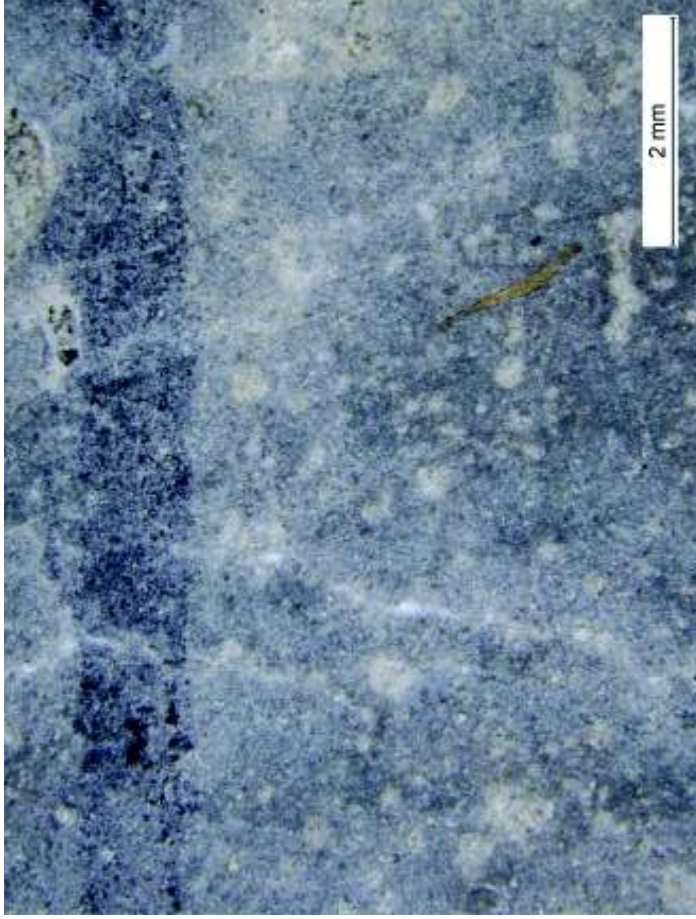
0003



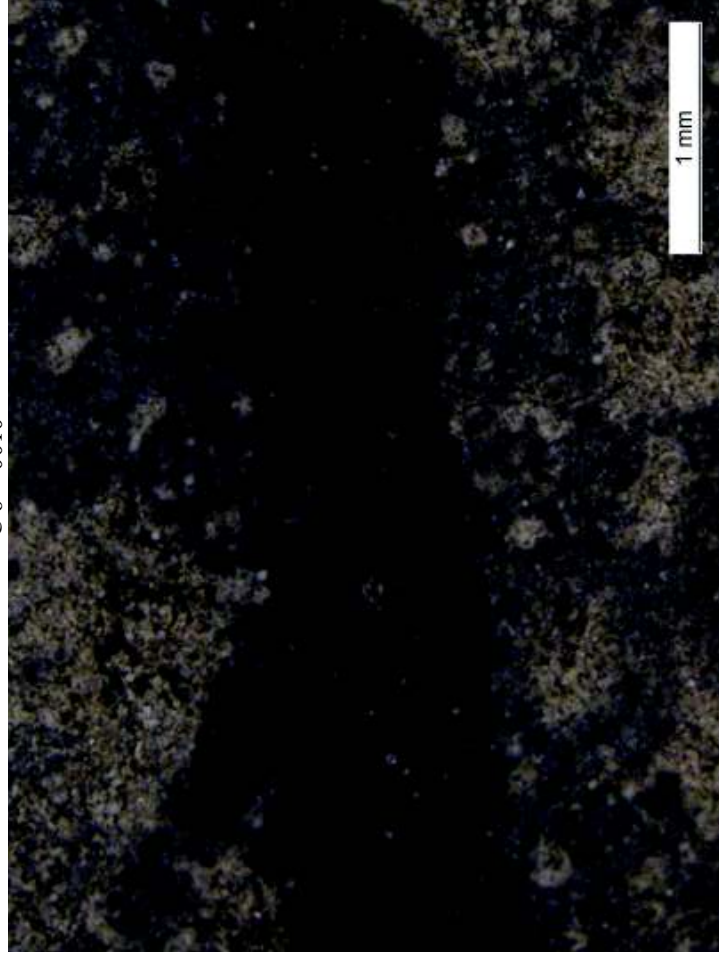
C3 + C4+ C5 ramificatie 0009



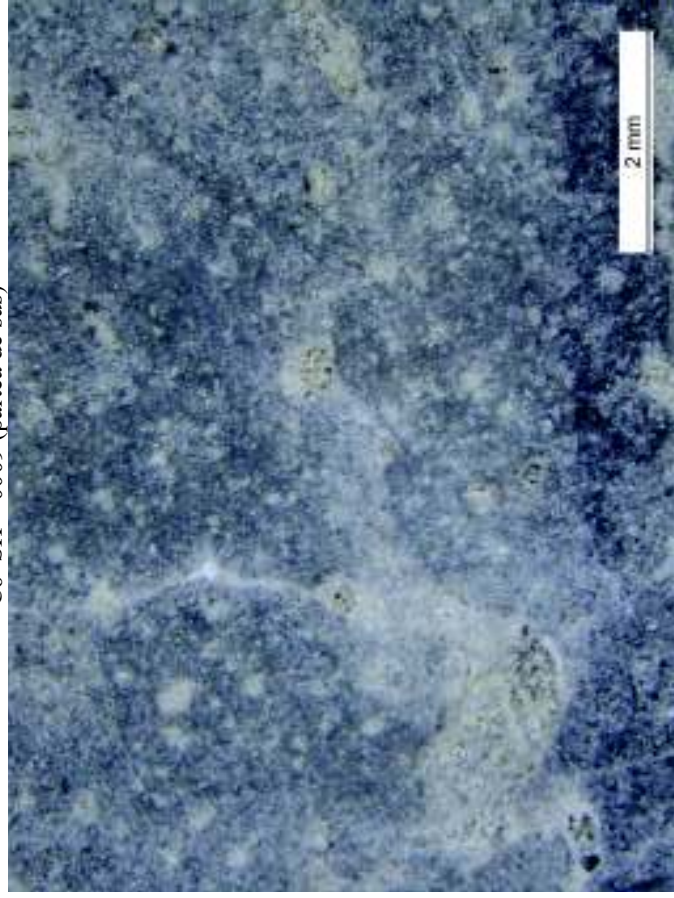
C + C4 + C5ramificatie SH - 0004



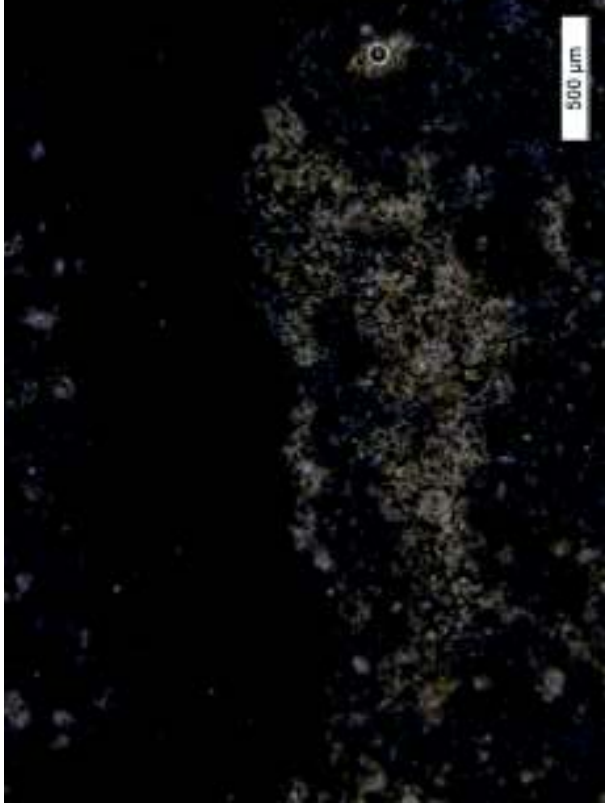
C 6 - 0010



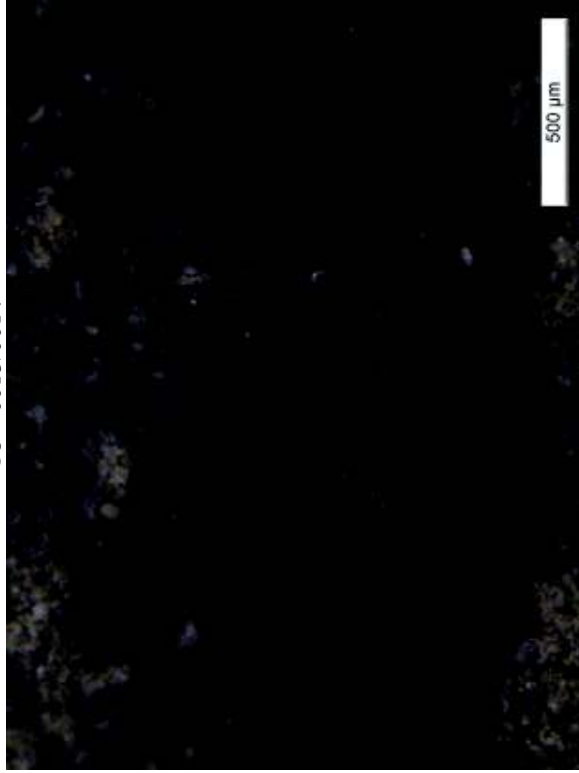
C6 SH - 0009 (partea de sus)



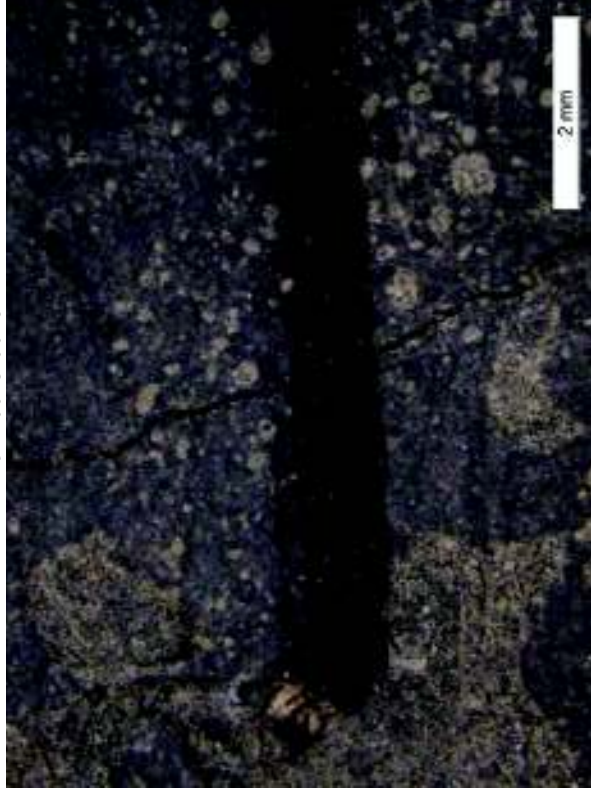
C7-0012



C8-0013/0014



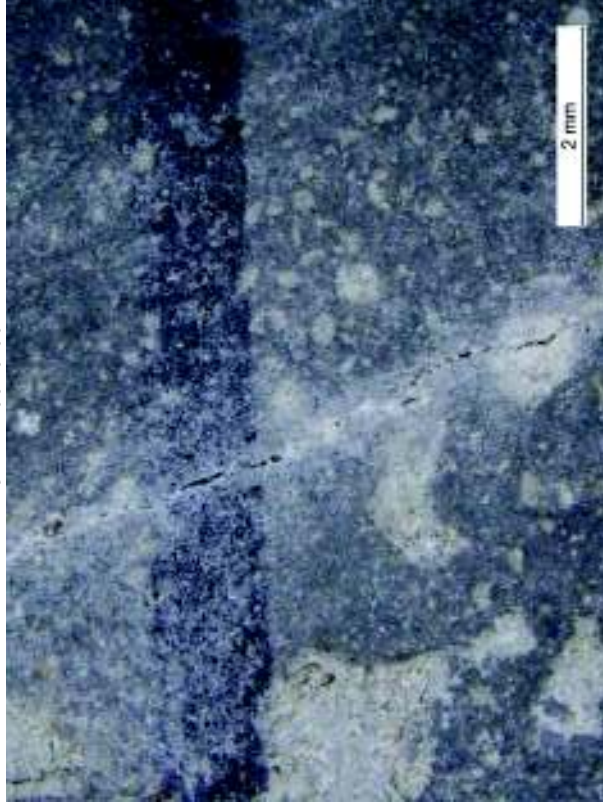
C9 - 0015/0016



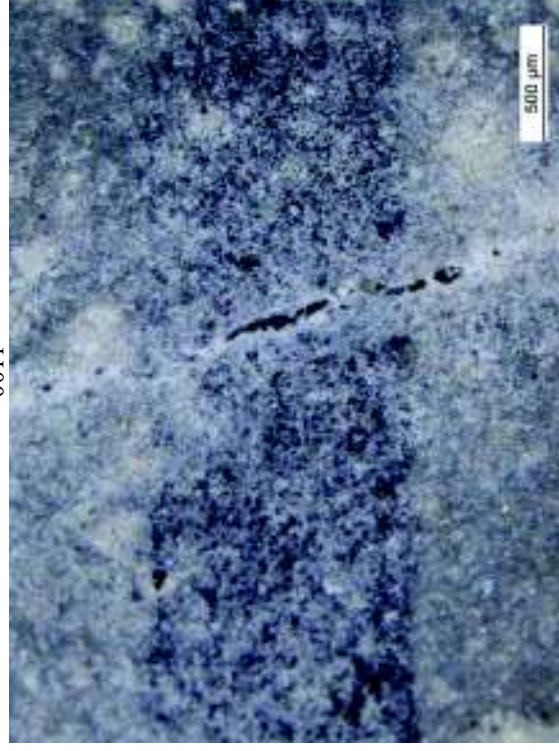
0016



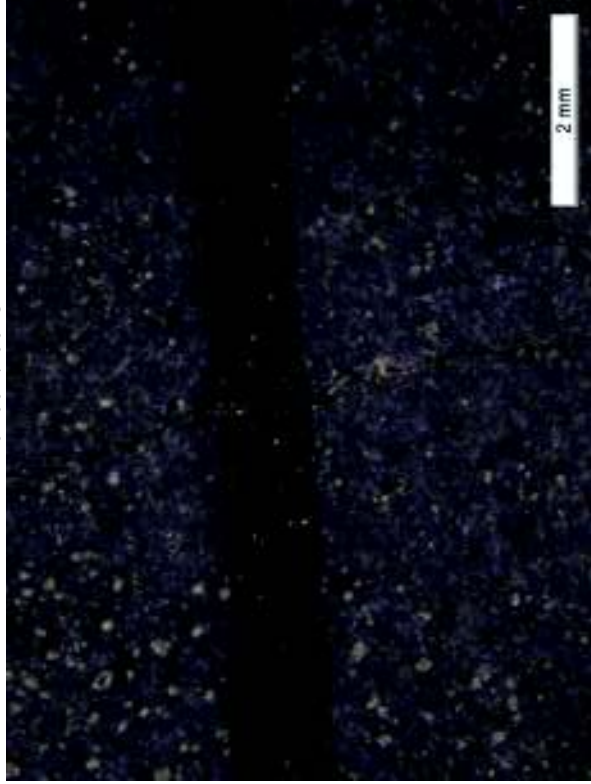
C9SH - 0010/0011



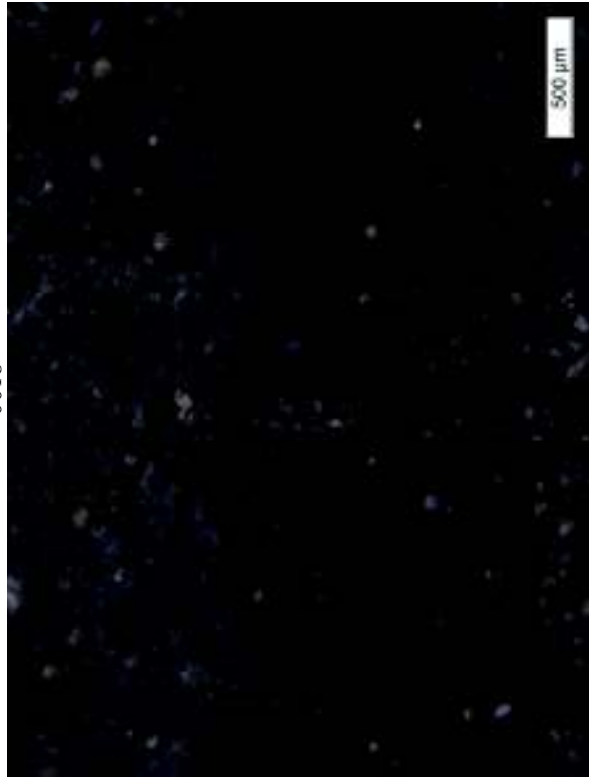
0011



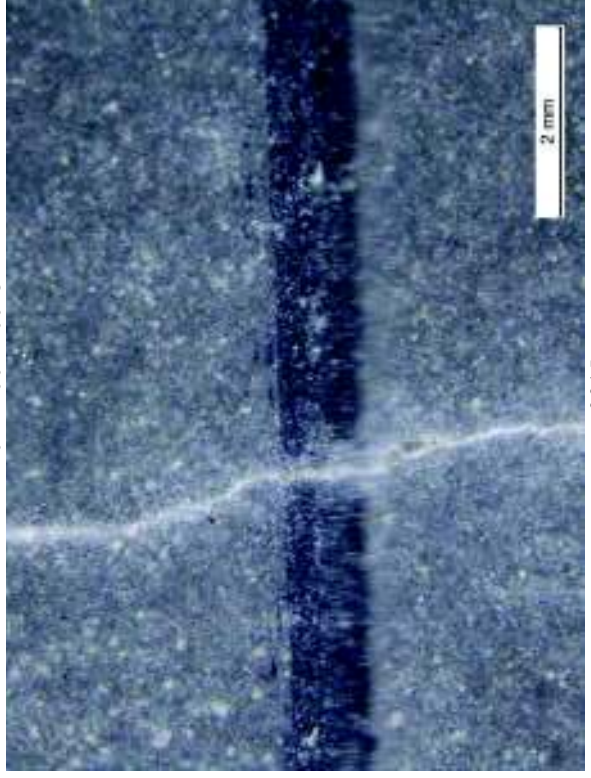
C10 -0017/0018



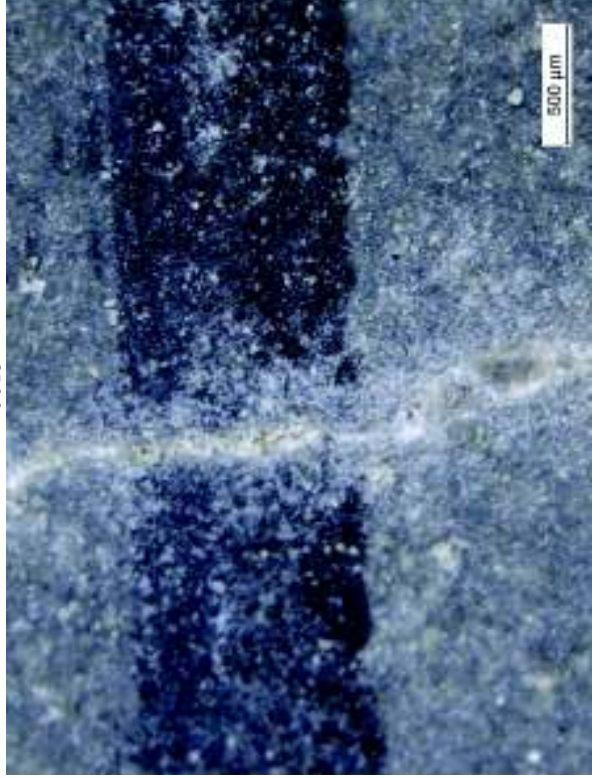
0018



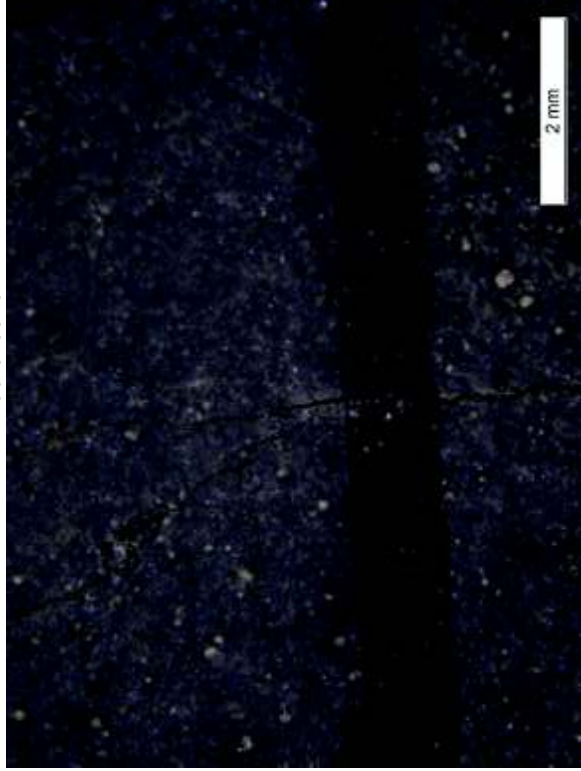
C 10 SH 0014/0015



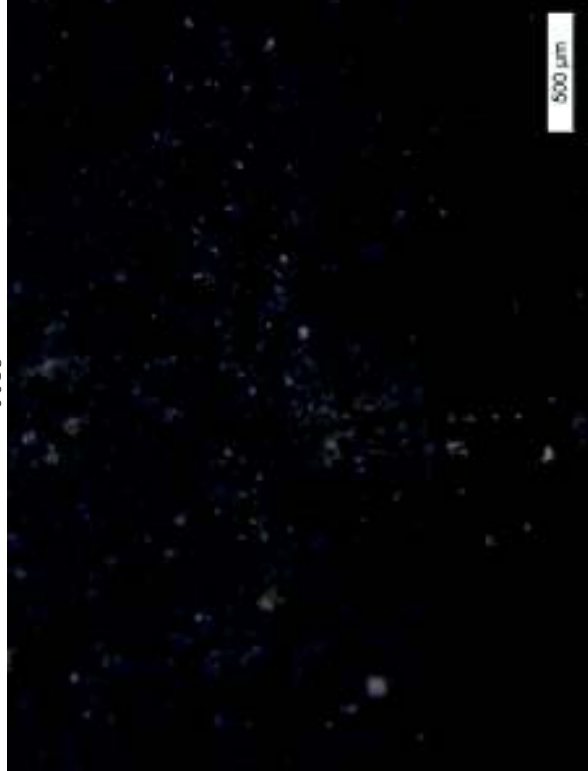
0015



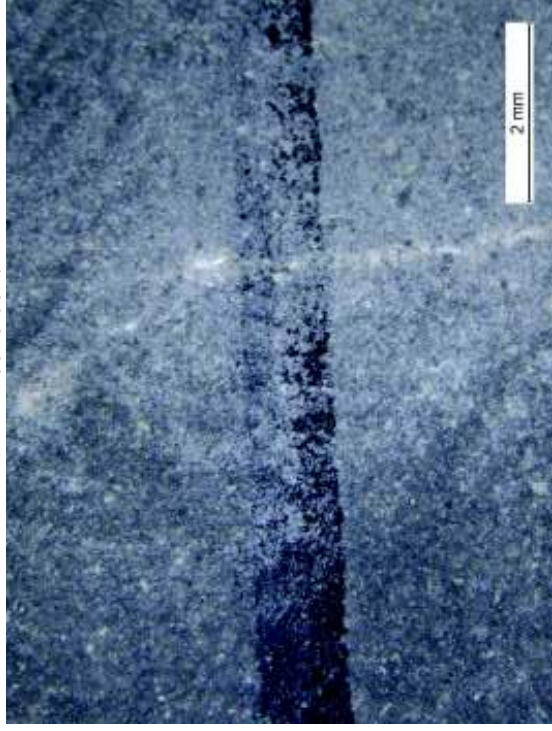
C11 - 0019/0020



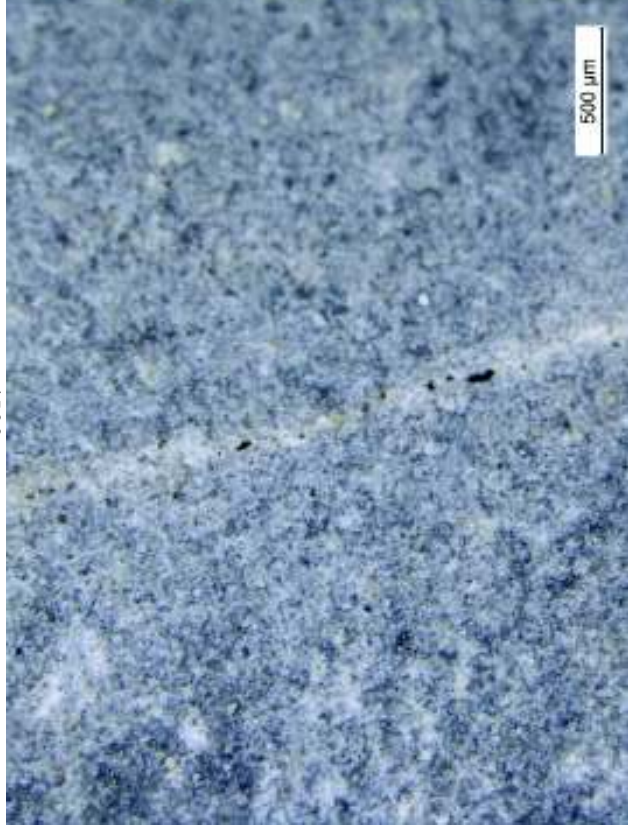
0018



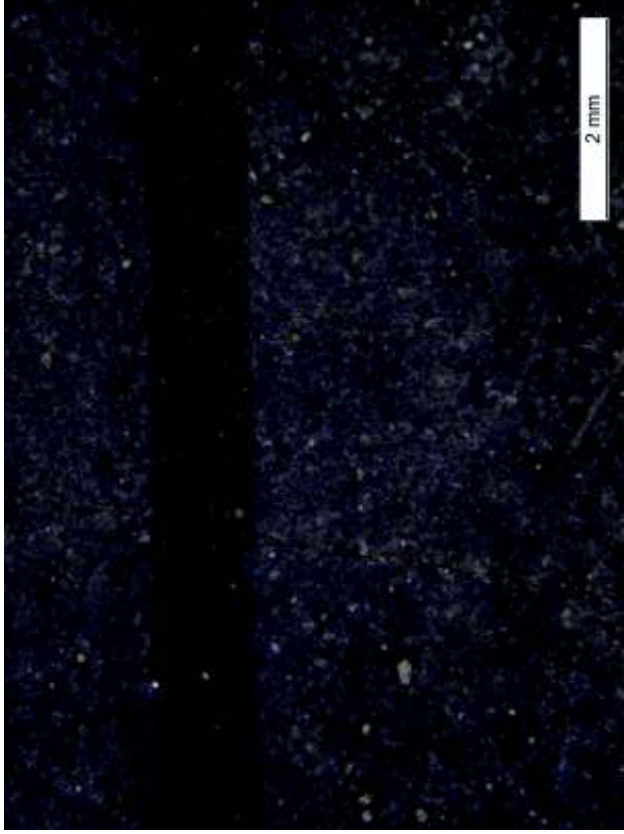
C11 - 0016/0017



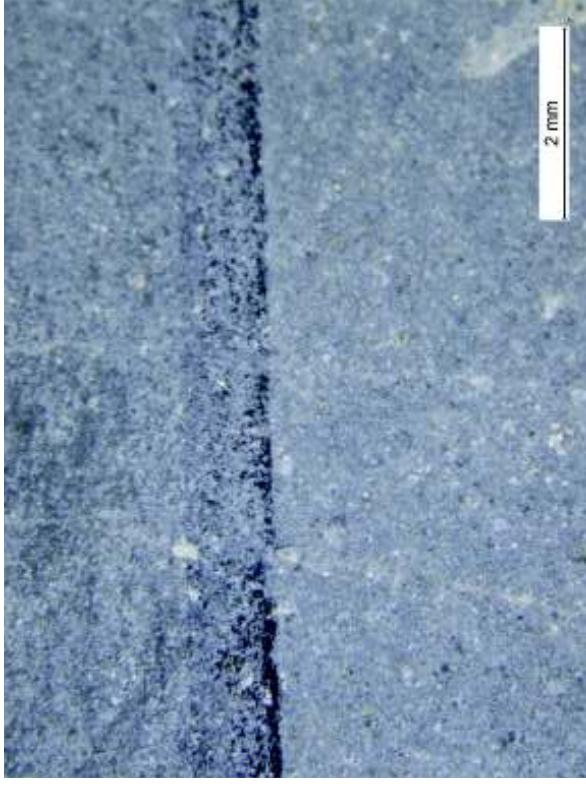
0017



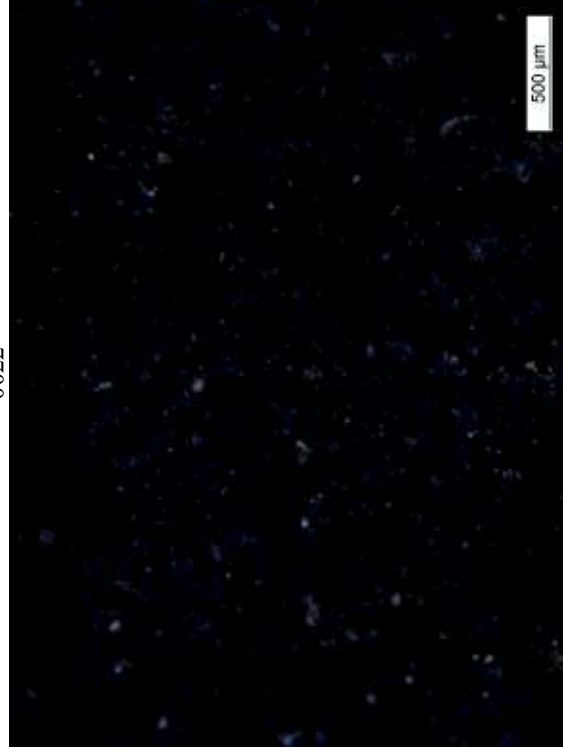
C12+ C13 - 0021/0022



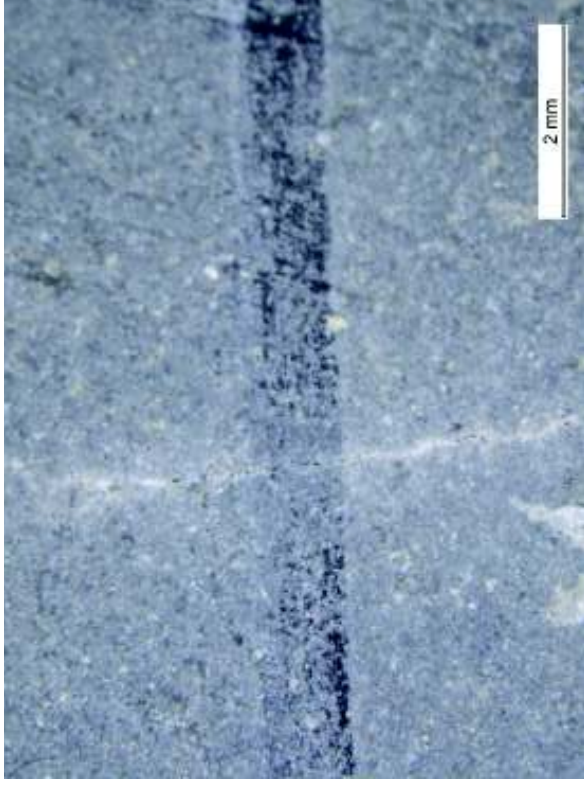
C12+ C13 SH- 0021/0022



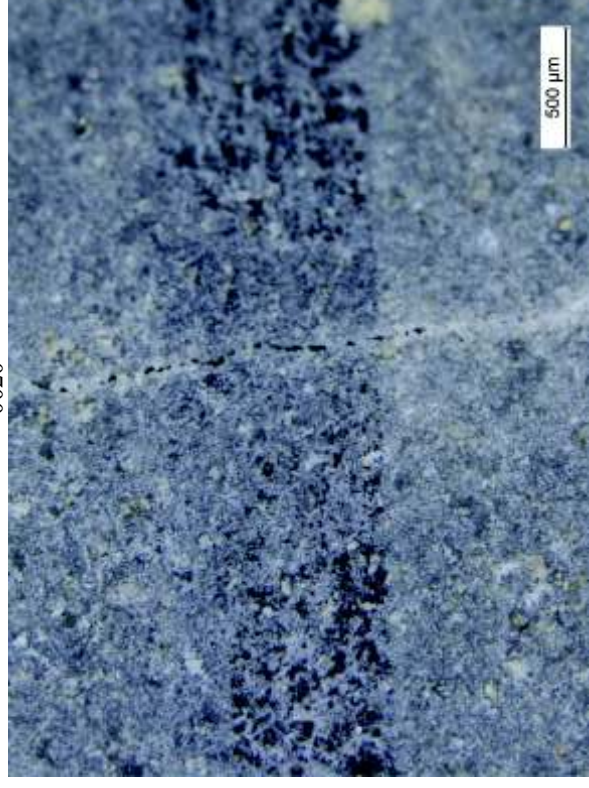
0022



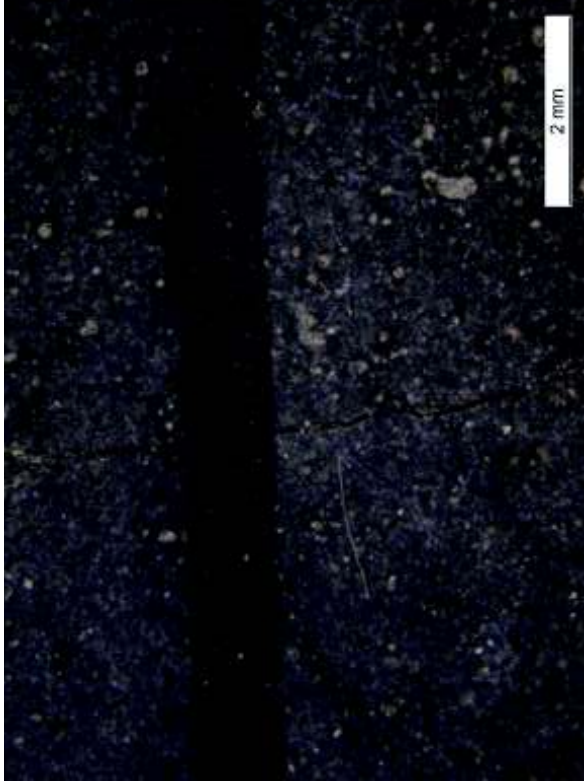
C14 SH - 0019/0020



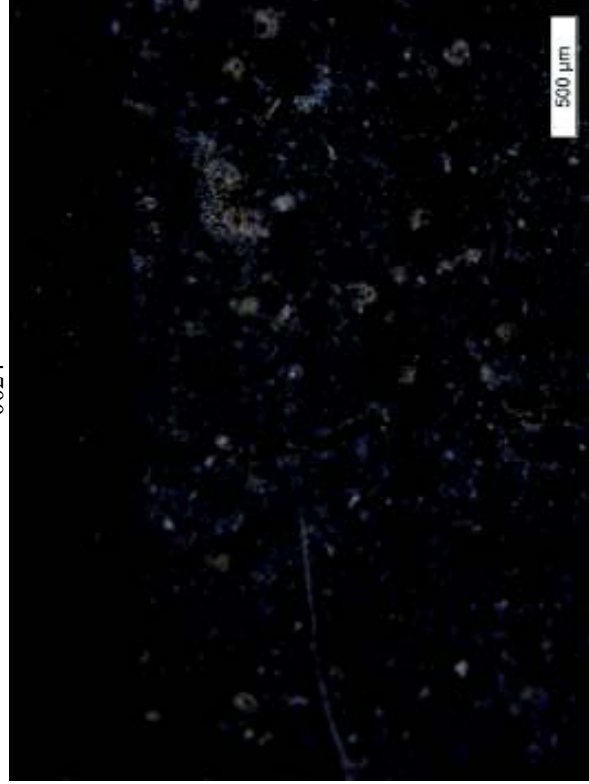
0020



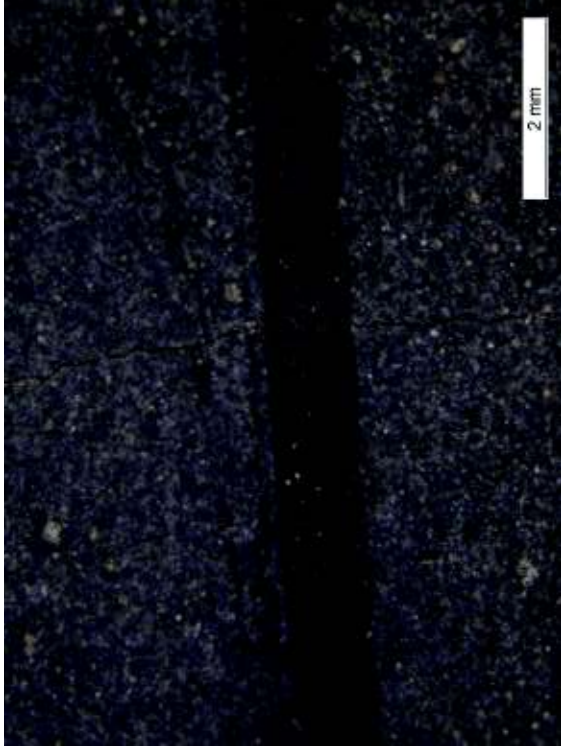
C14 - 0023/0024



0024



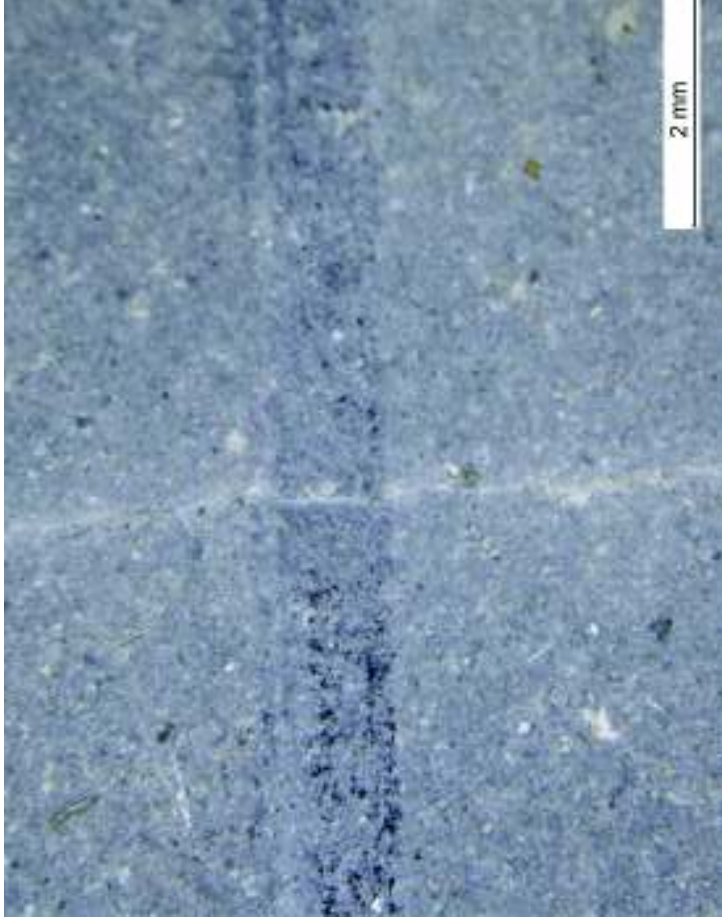
C 15 - 0025/0026



0026



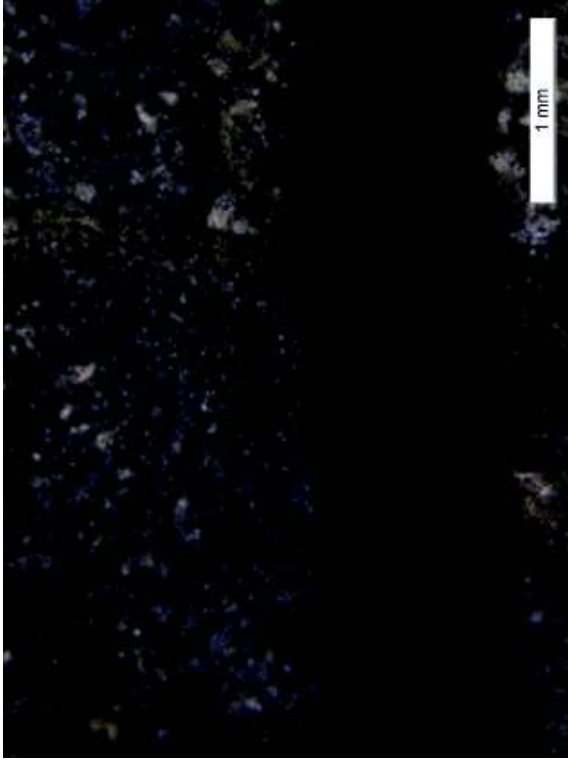
C 15 - 0021



M 1.4 IV R

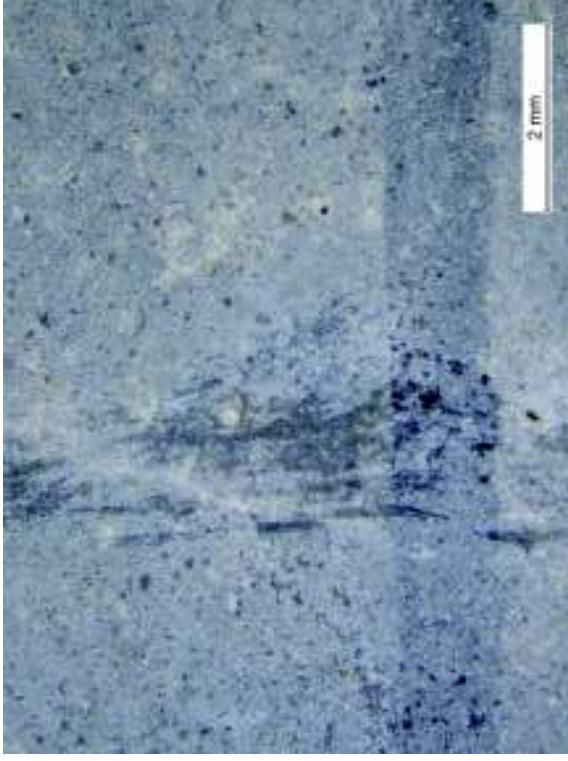
Initial

C1 +C2 --/ 0001/0002

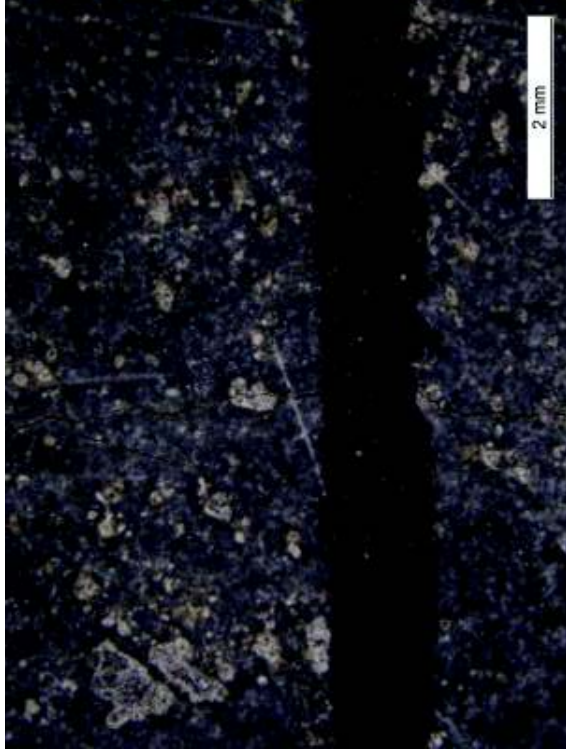


SH

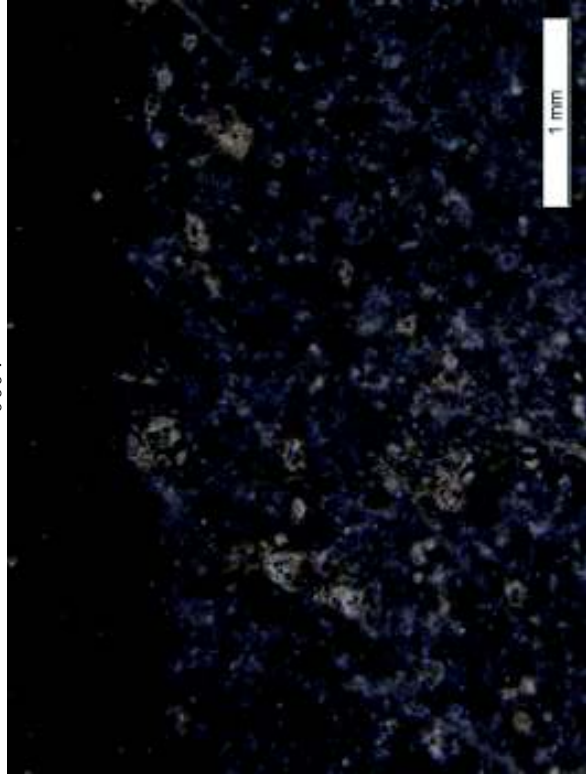
C2 - SH - 0002



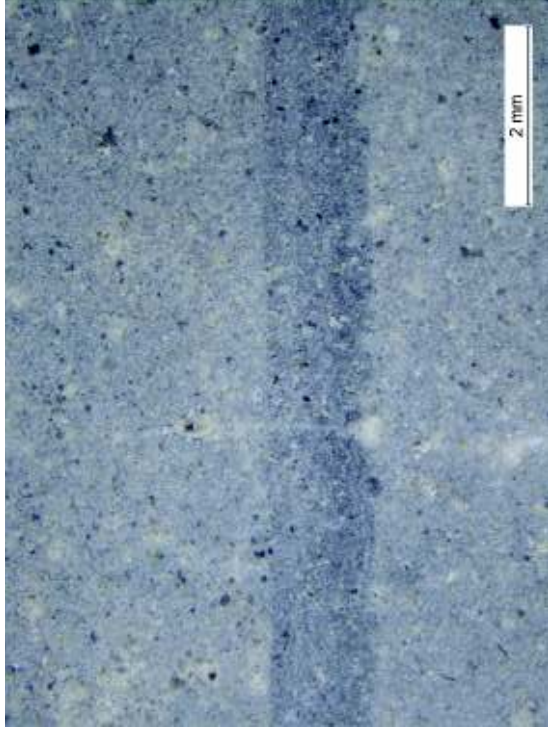
C3- 0003 mare



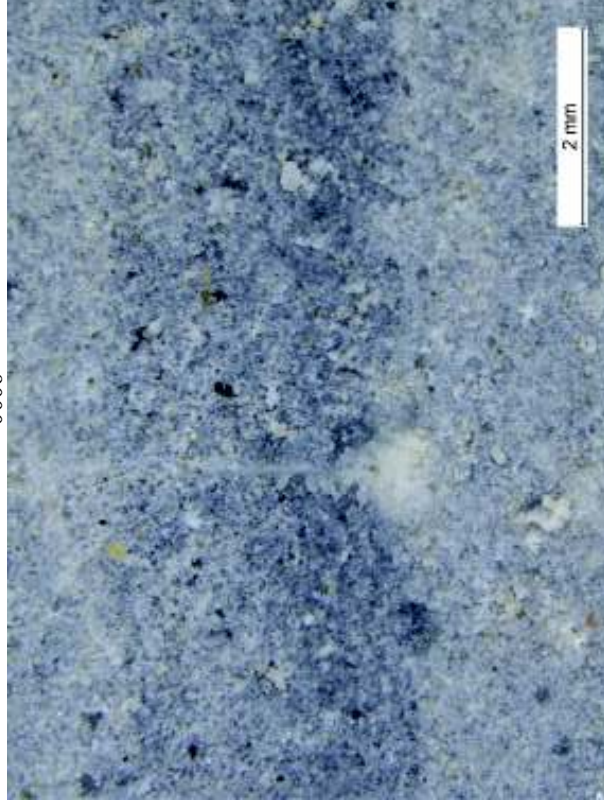
0004



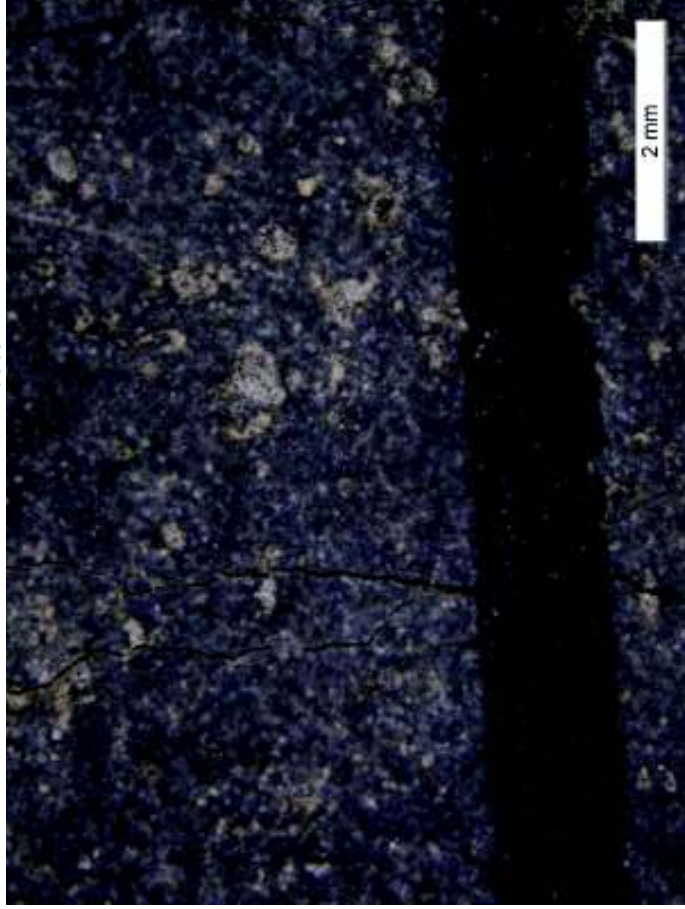
C3 SH -0005



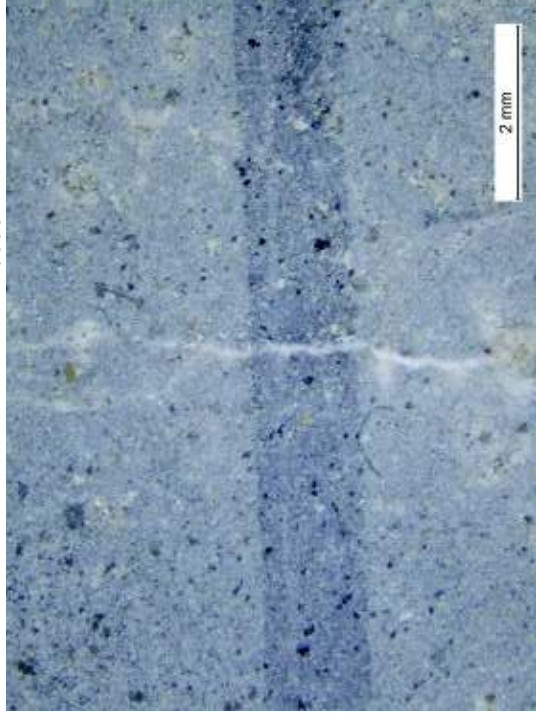
0006



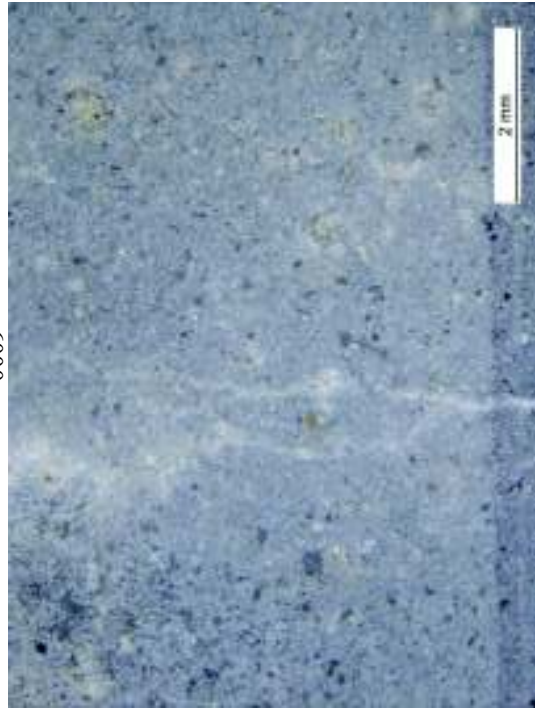
C4 +ramificatie 0005



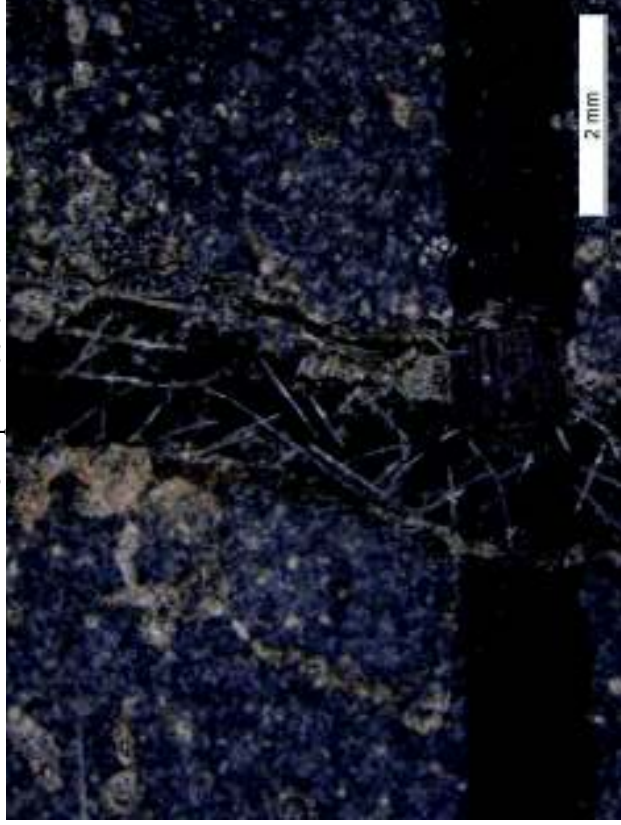
C4+ramificatie SH - 0008



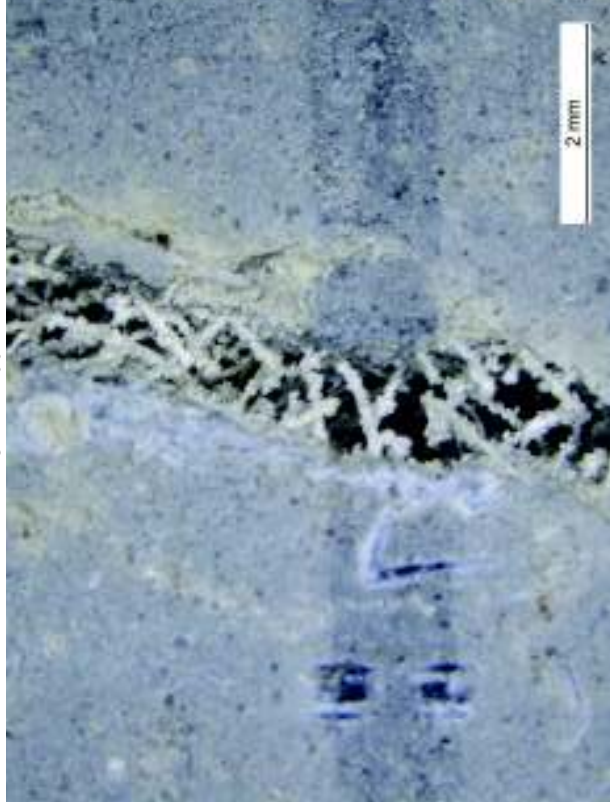
0009



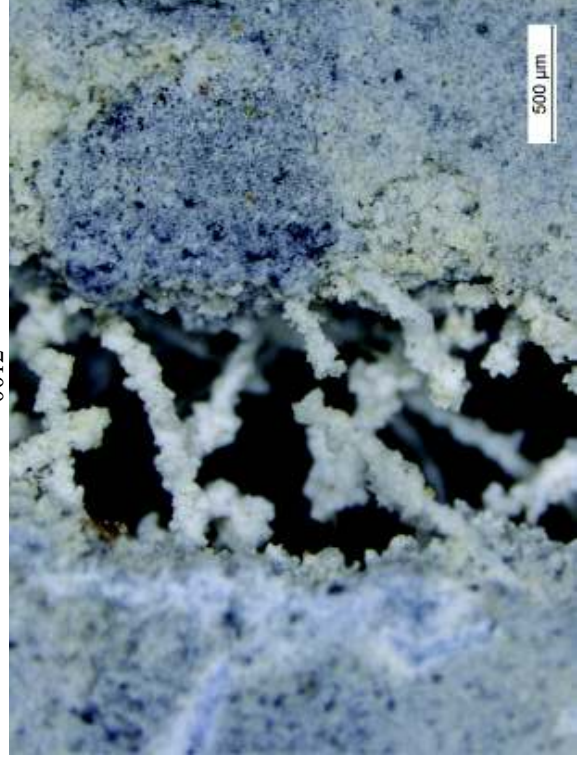
C5 Rupere - 0010



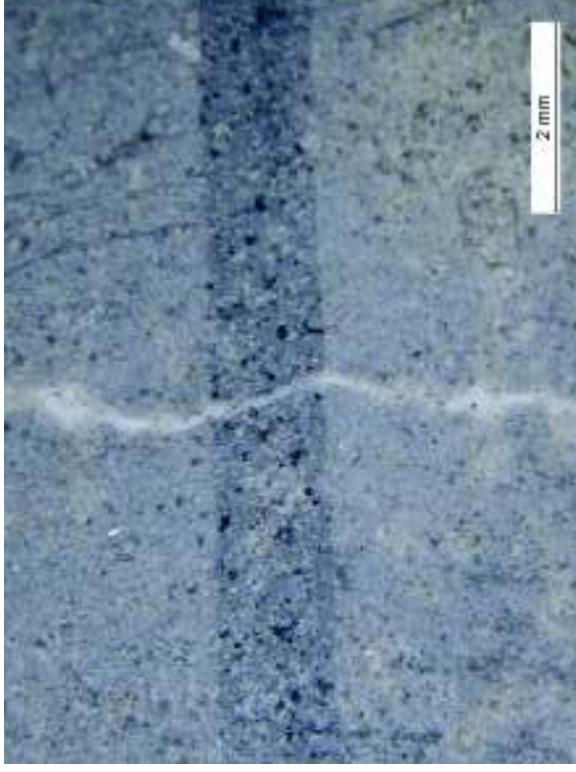
C5 SH - 0011



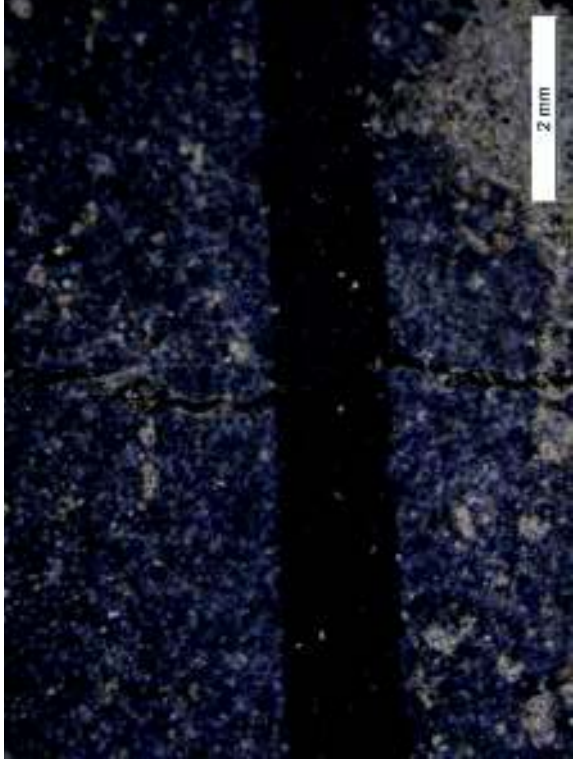
0012



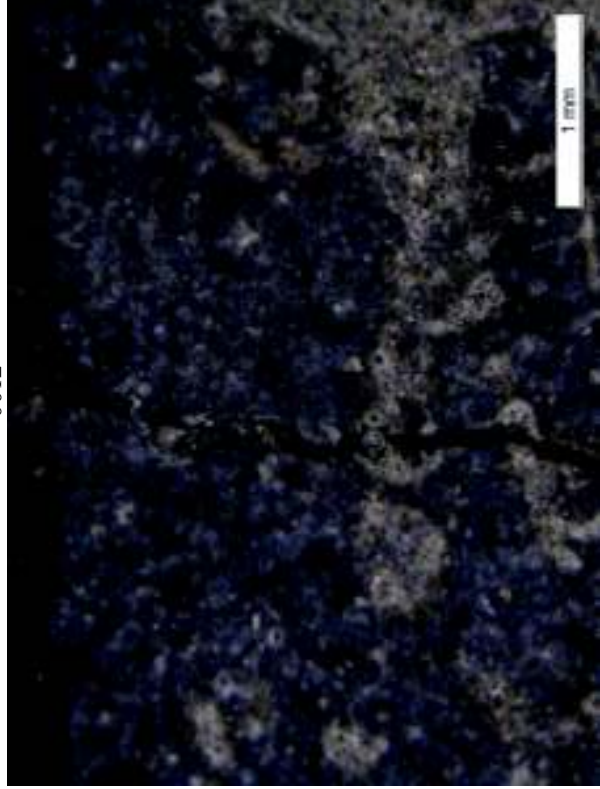
C 6 SH 0014



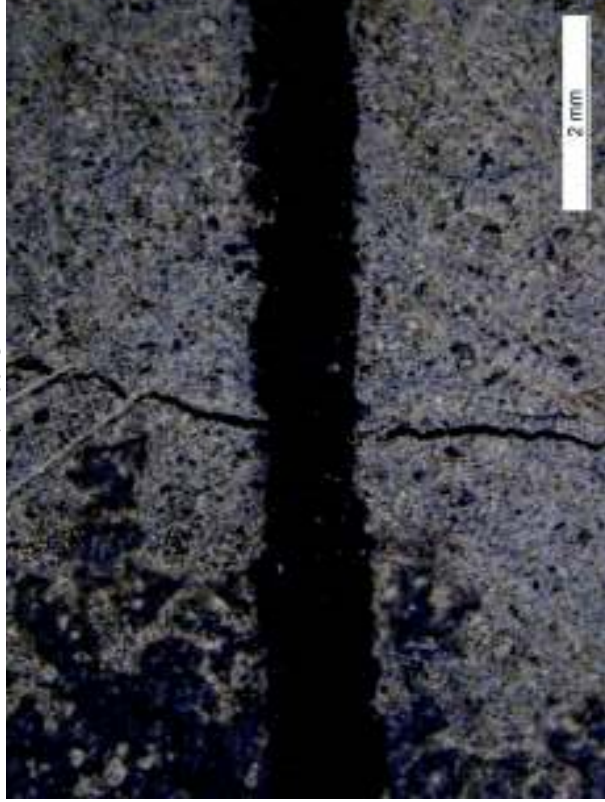
C 6 0011



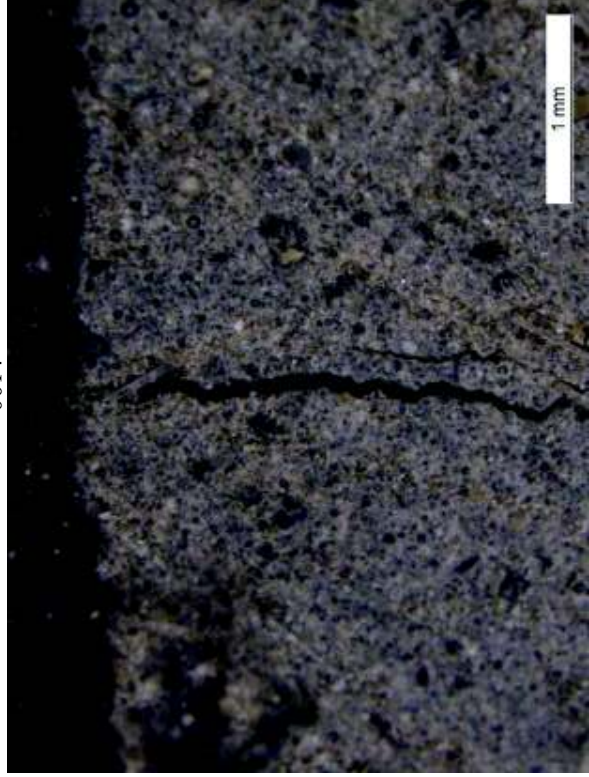
0012



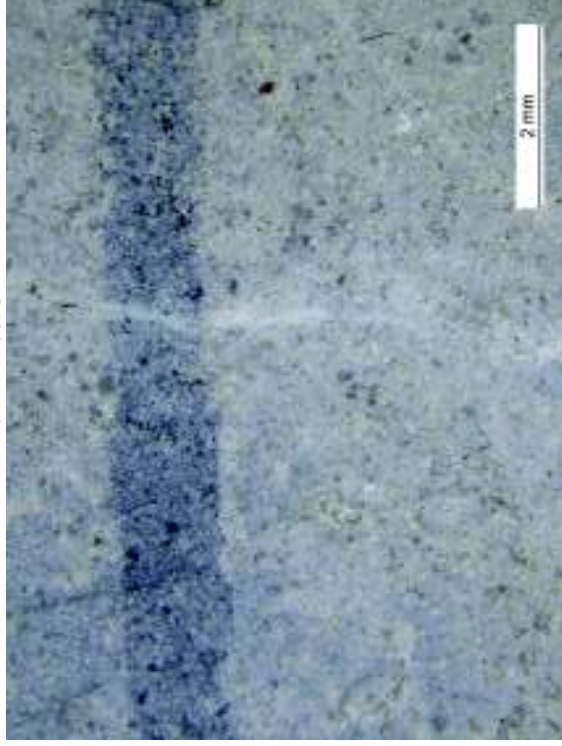
C7 - 0013



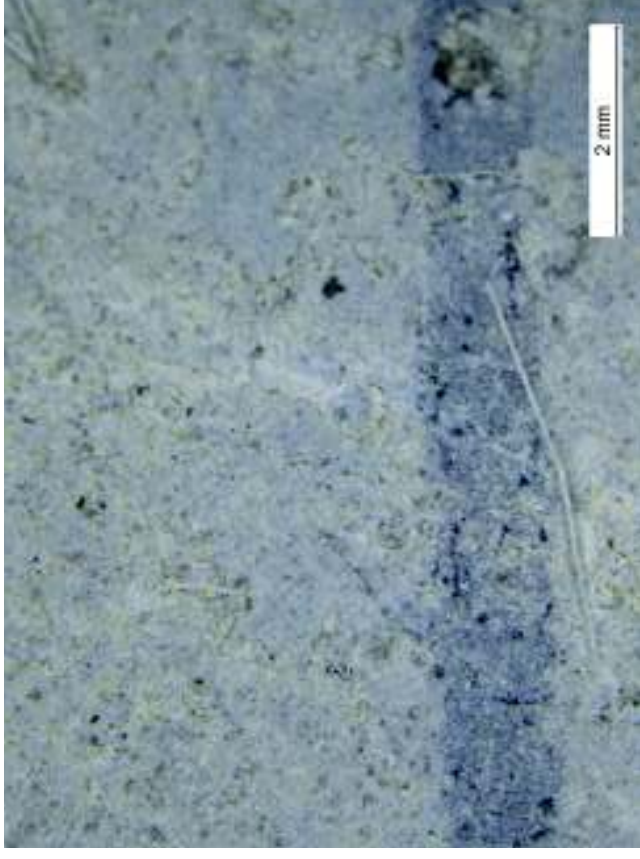
0014



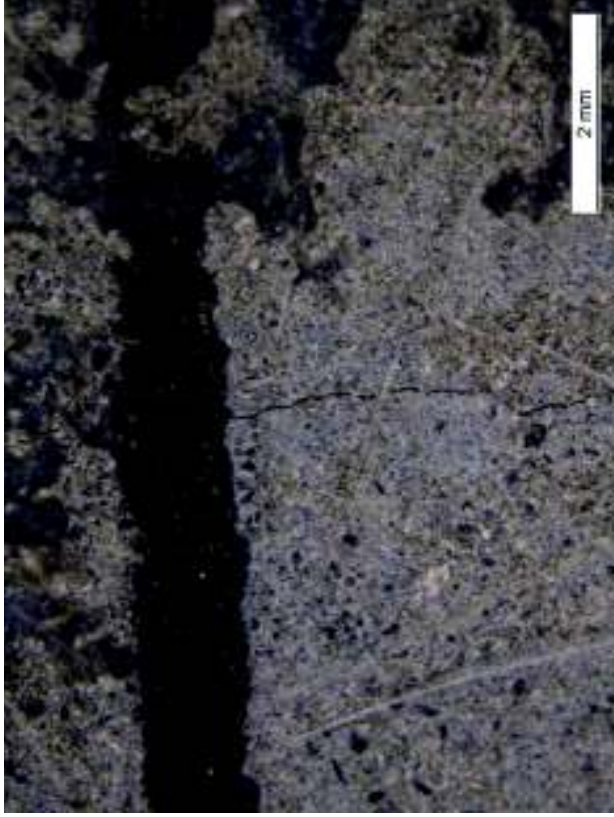
C7 SH - 0013



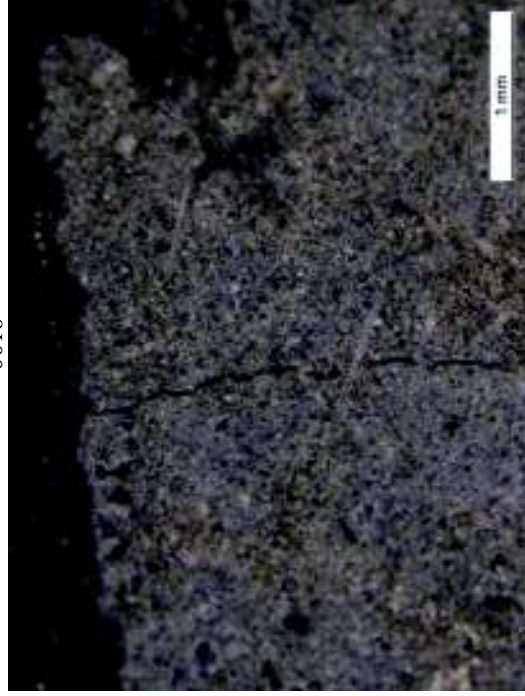
C8 SH -0016



C8 -0015

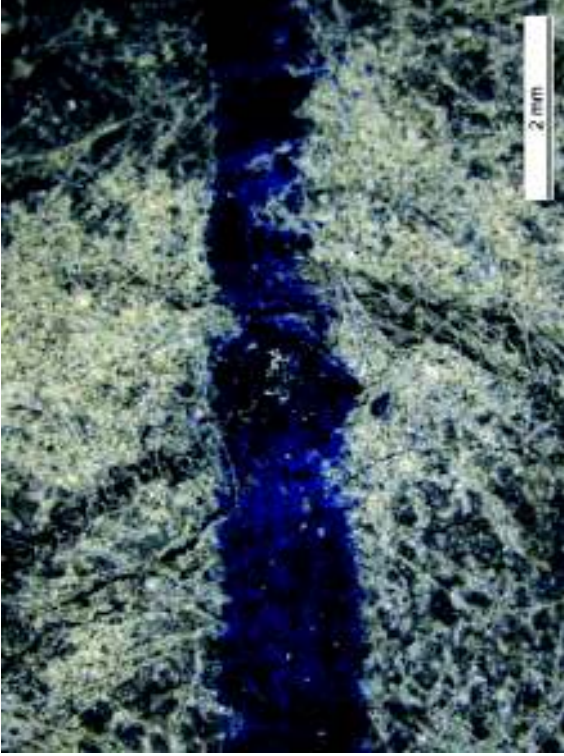


0016



Initial

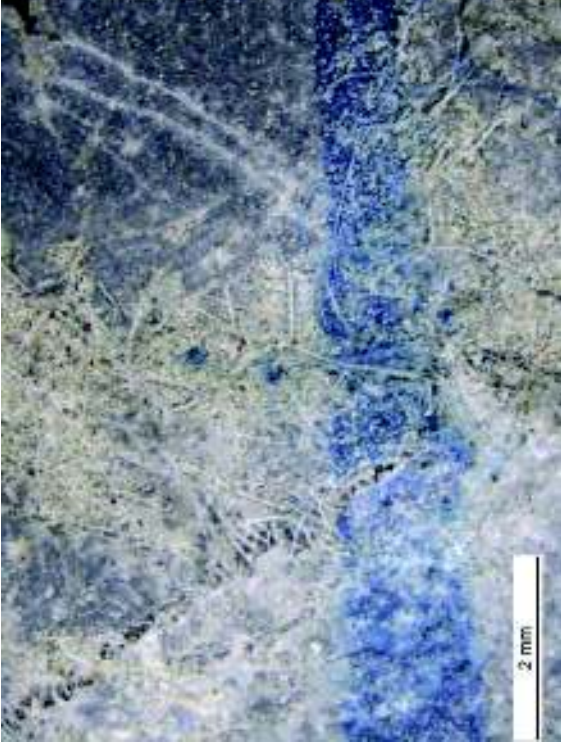
C1 mare cu multe ramificatii mici - -;



0002

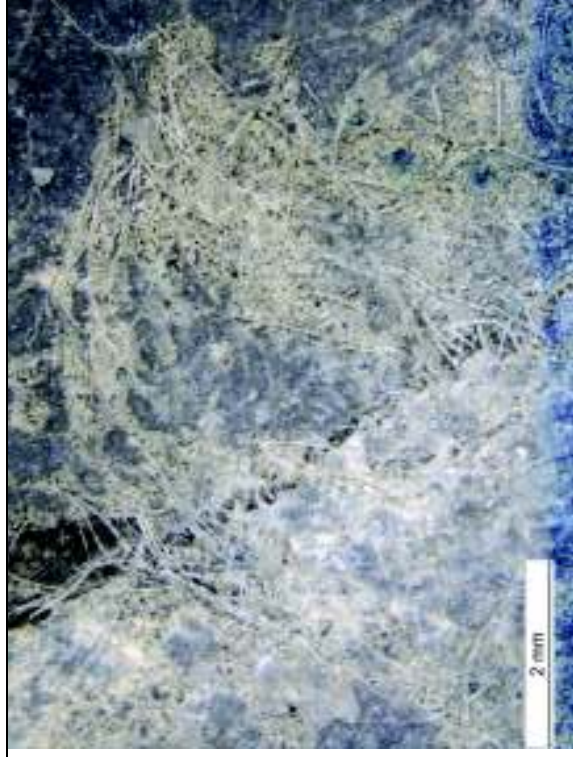
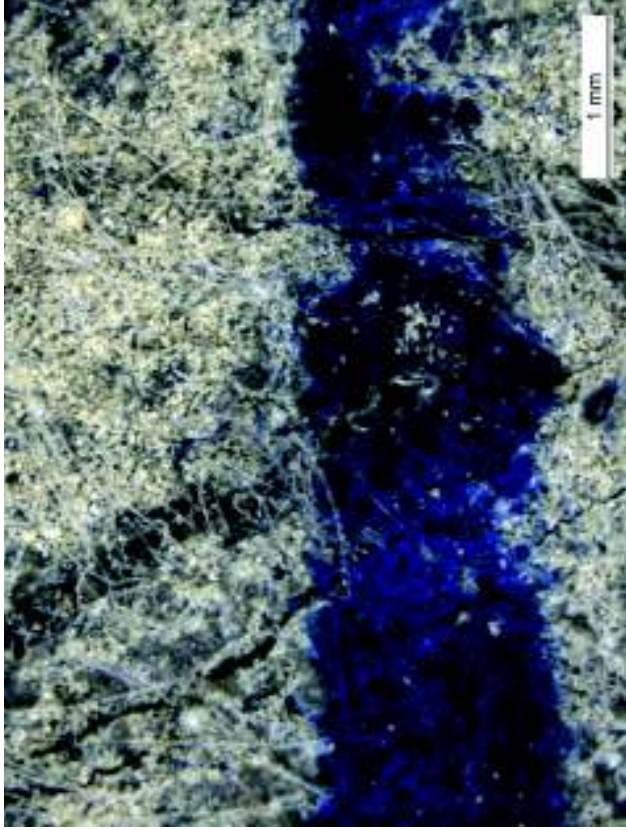
SH

C1 SH cu multe ramificatii - 0007

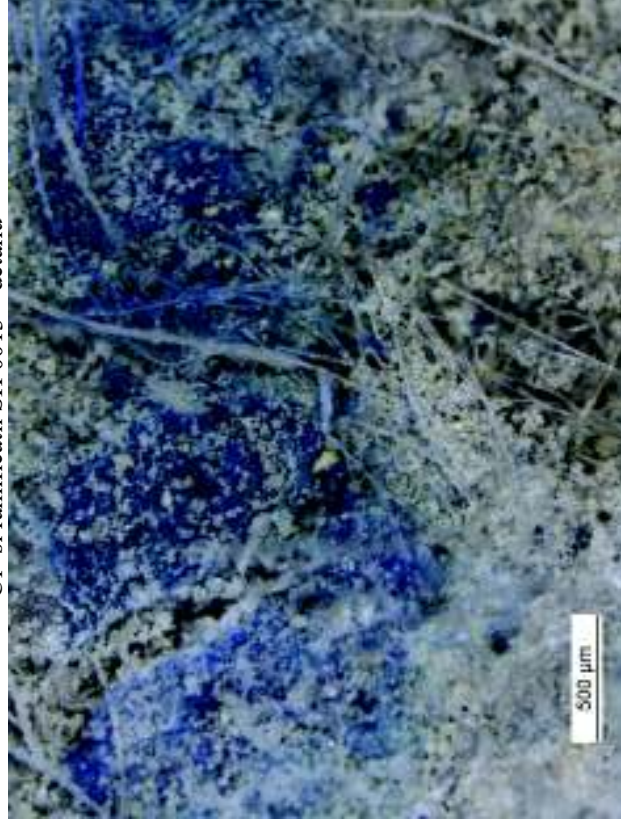


0008

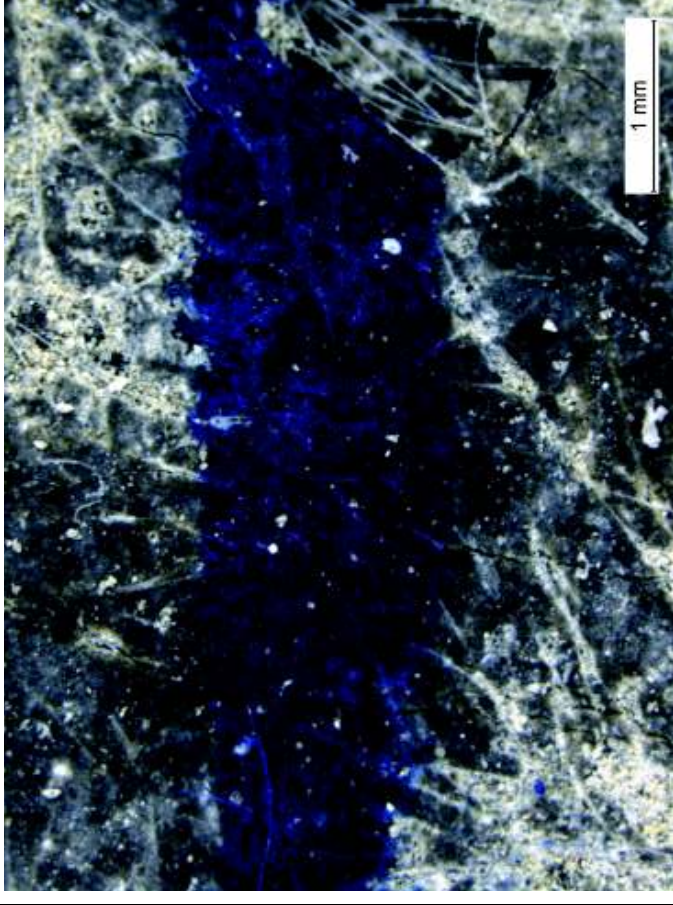
C1 si ramificatii 0004 - detaliu



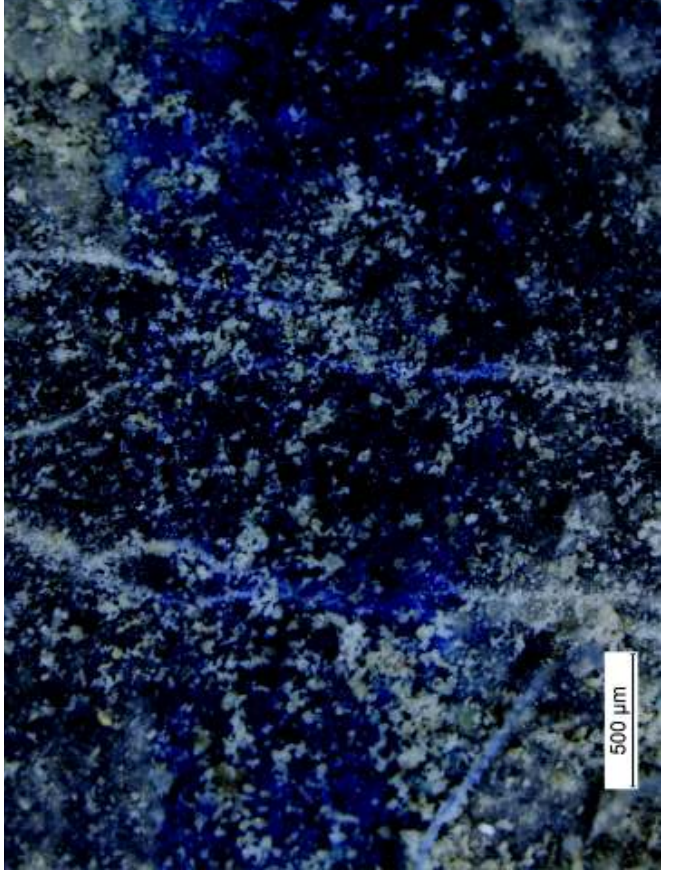
C1 si ramificatii SH 0013 – detaliu



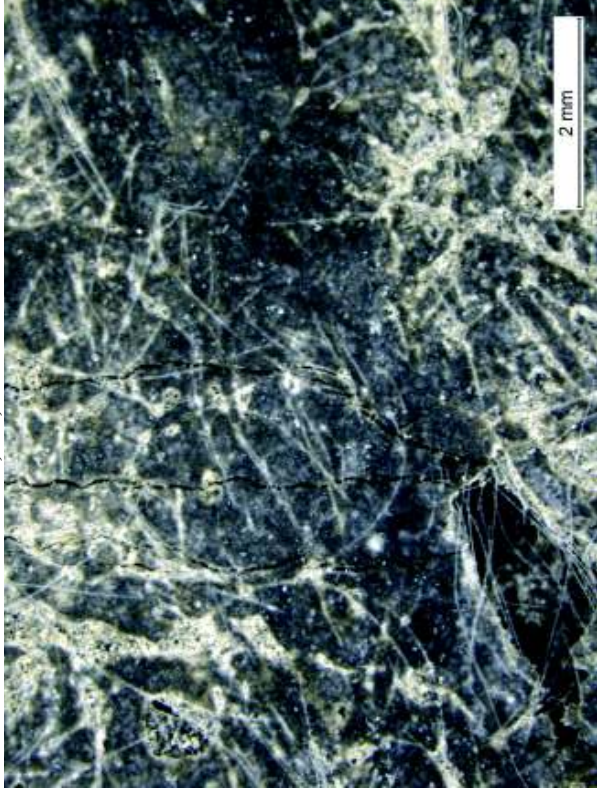
C2 si C3 - 0005



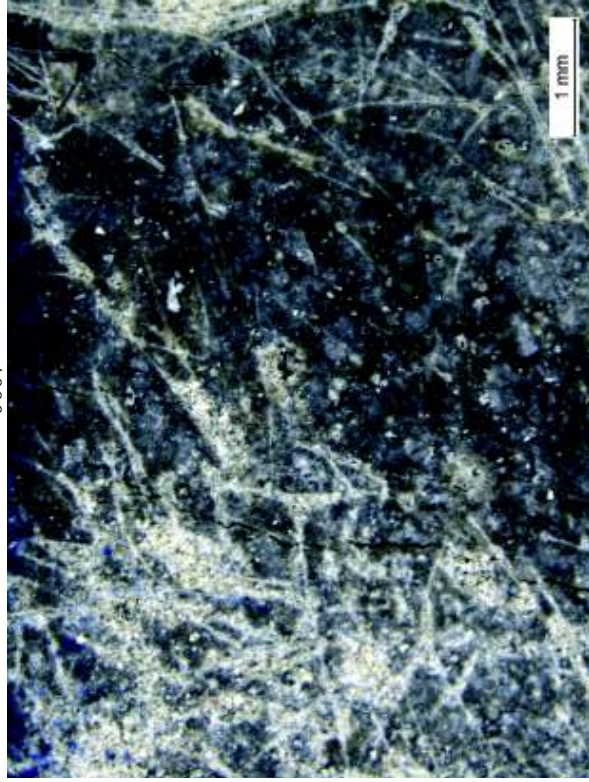
C2 si C3 SH - 0014



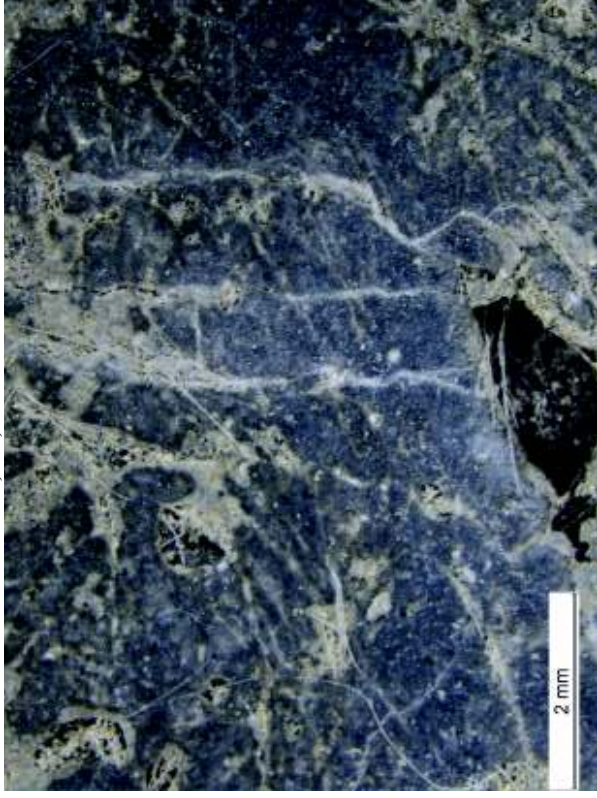
C4, C5, C6 – 0006



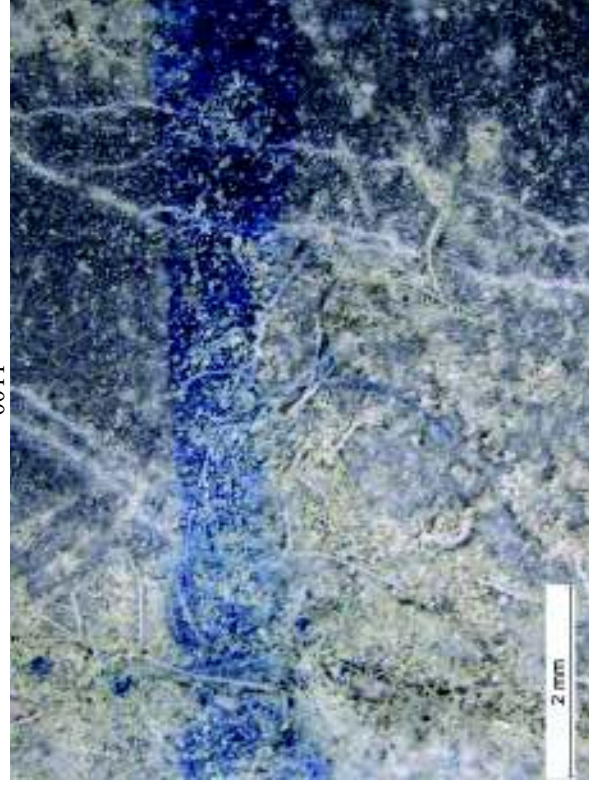
0007



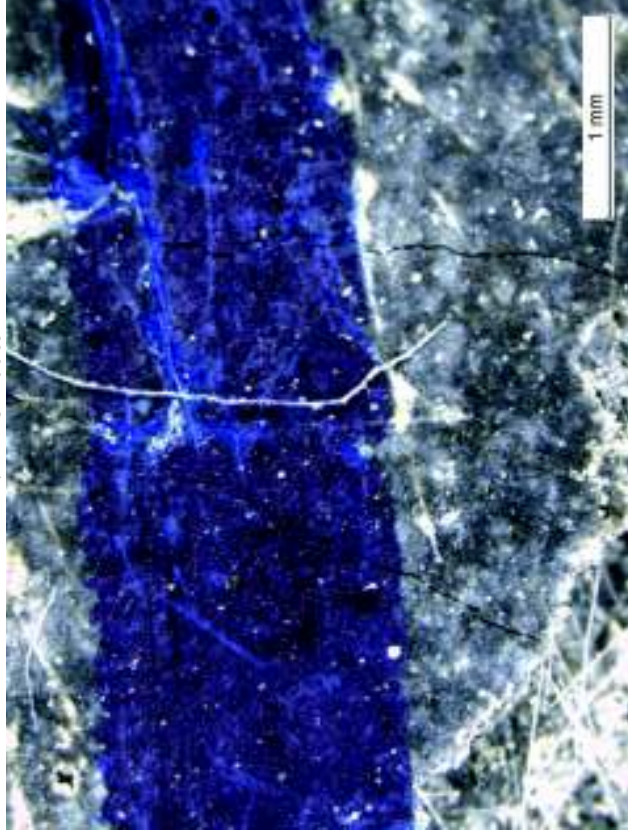
C4, C5, C6 SH – 0010



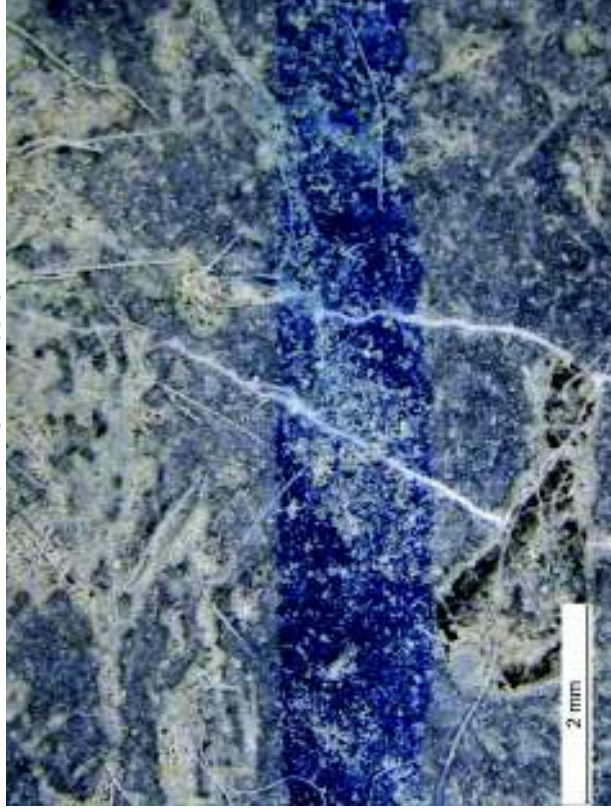
0011



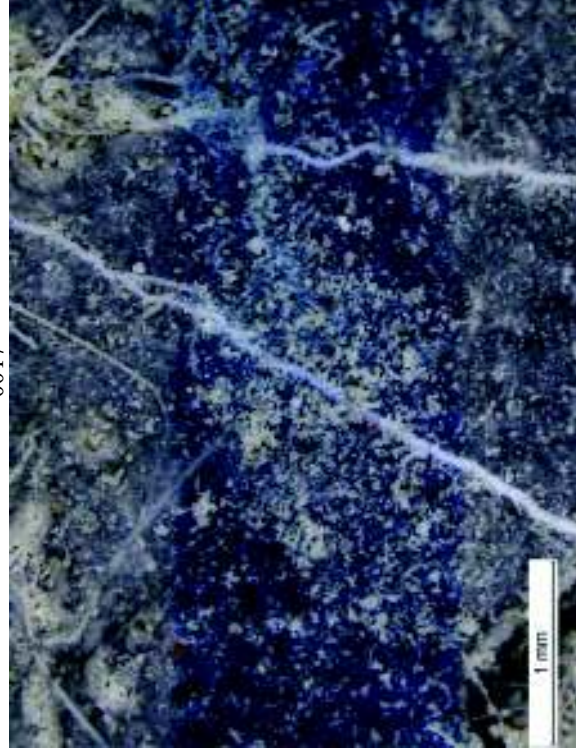
C7 si C8 - 0009



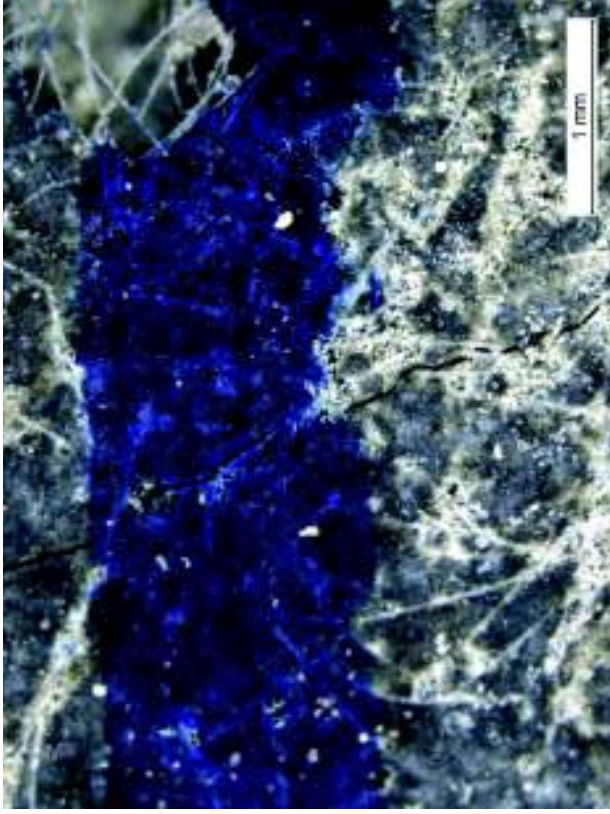
C7 si C8 SH - 0016



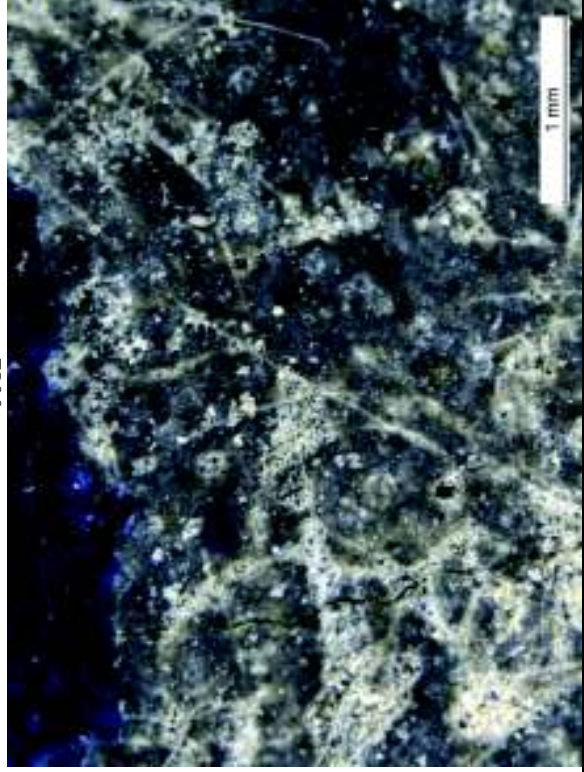
0017



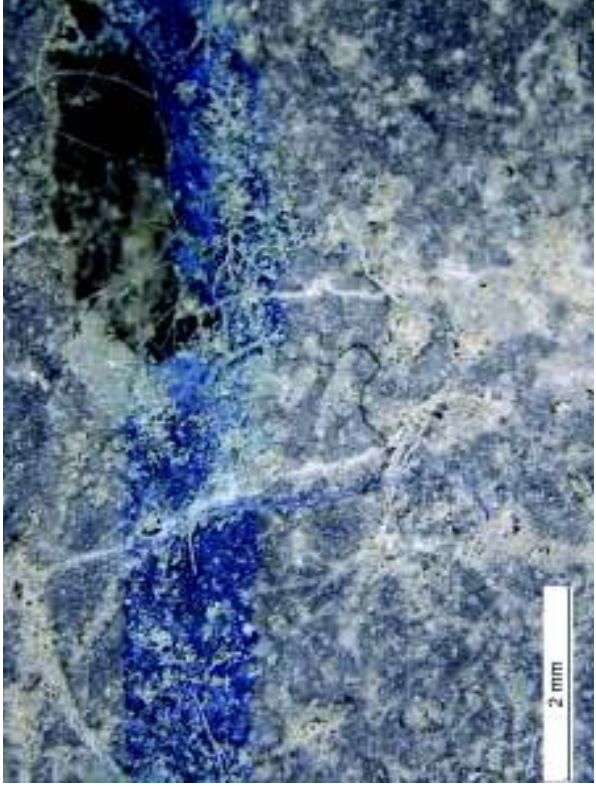
C9 si C10 - 0011



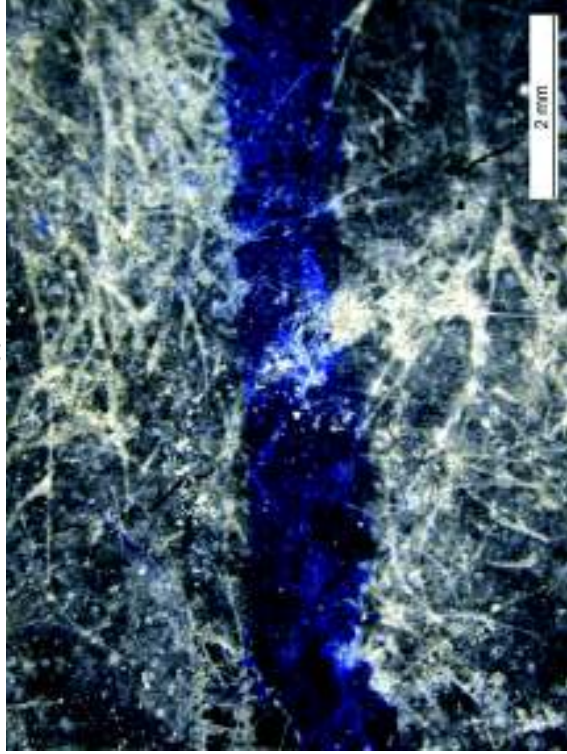
0012



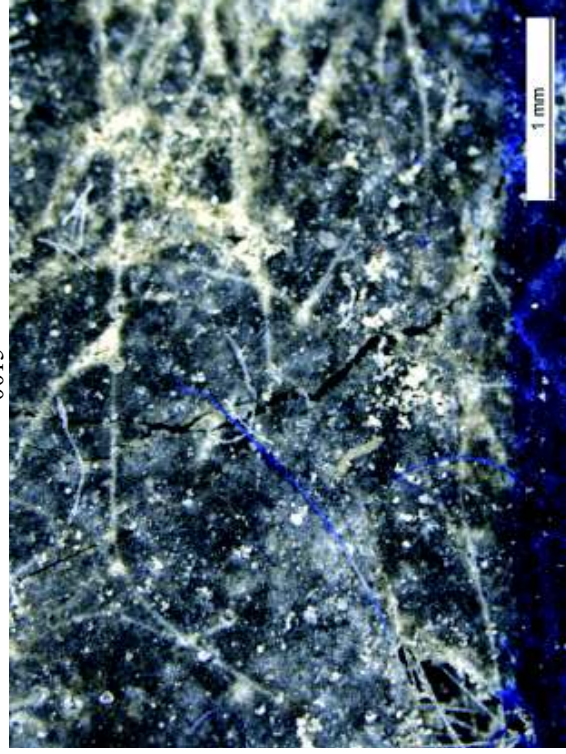
C9 si C10 SH- 0020



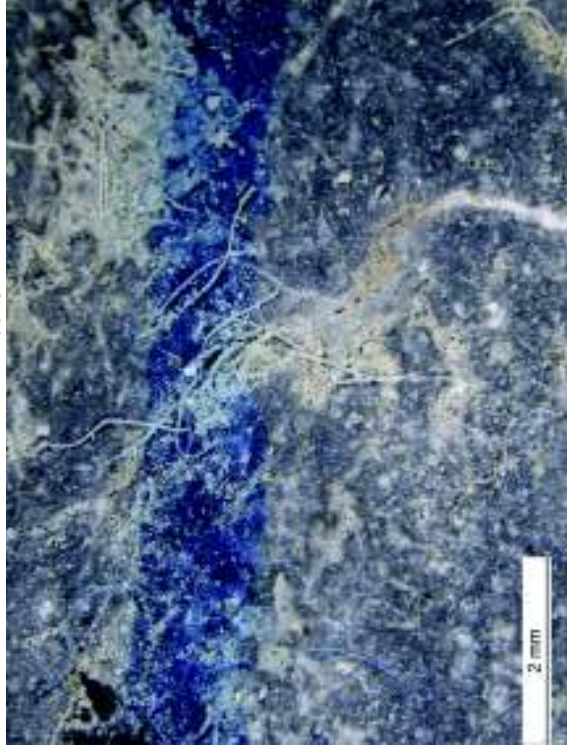
C11 - 0014



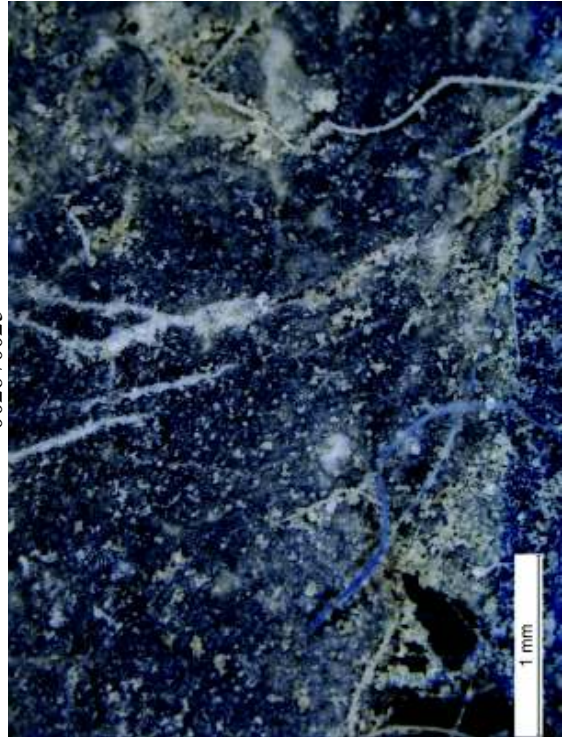
0015

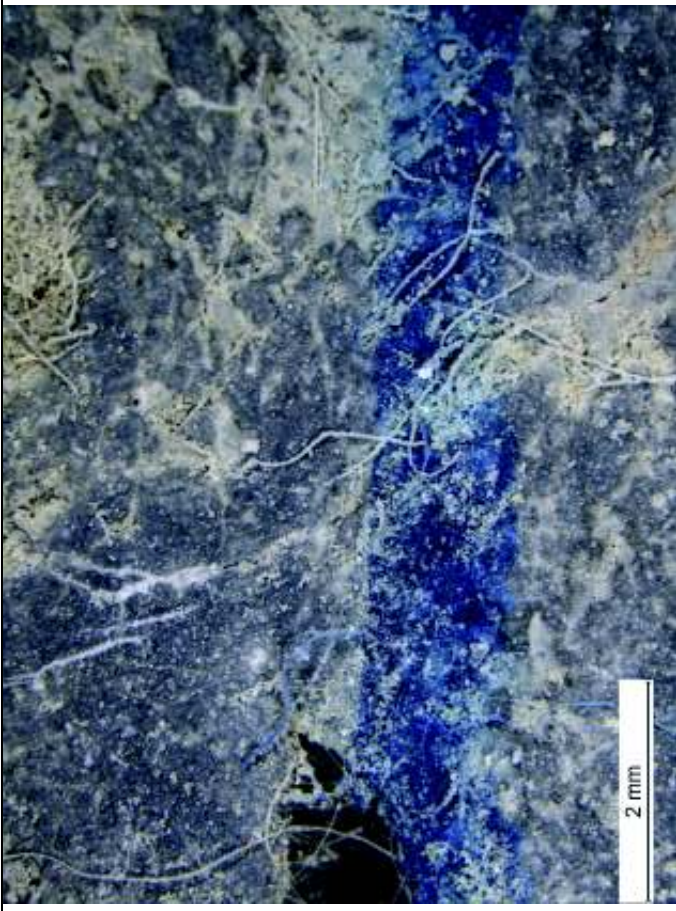


C11 SH - 0023



0026 / 0025



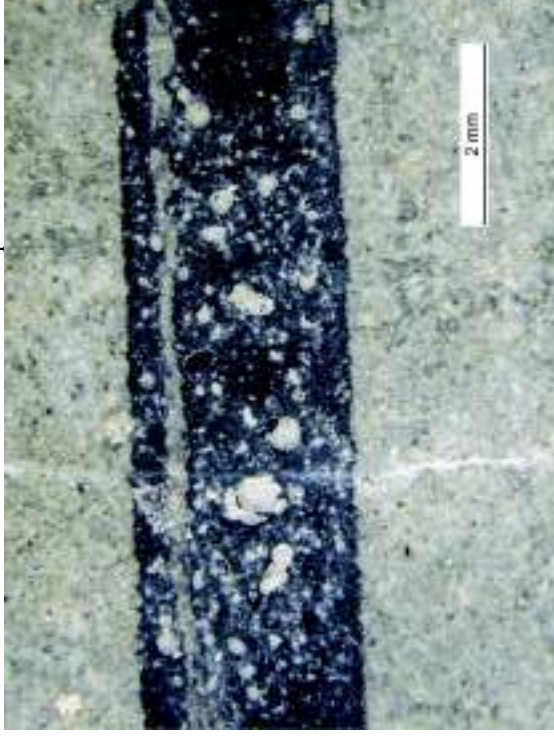


M 4.2 I R

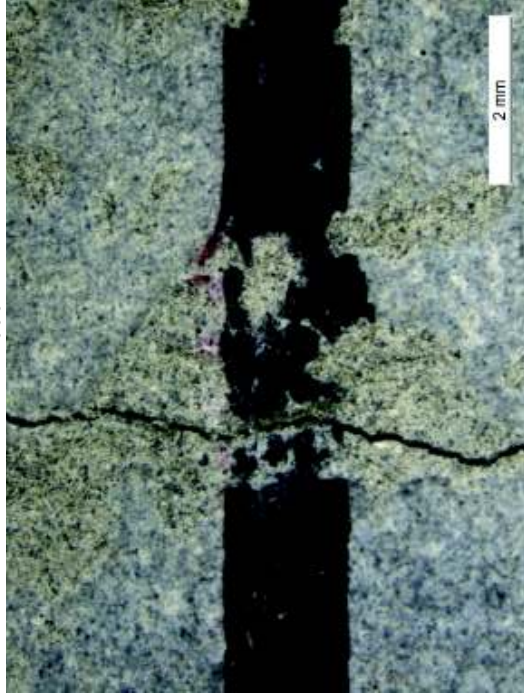
Initial

SH

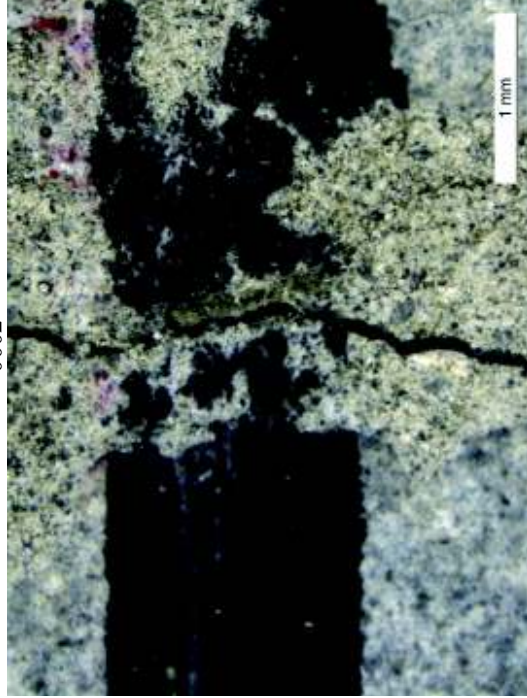
Fisura mica inchisa complet



CI: -/0002



0002



CI SH -



0002 + detalii

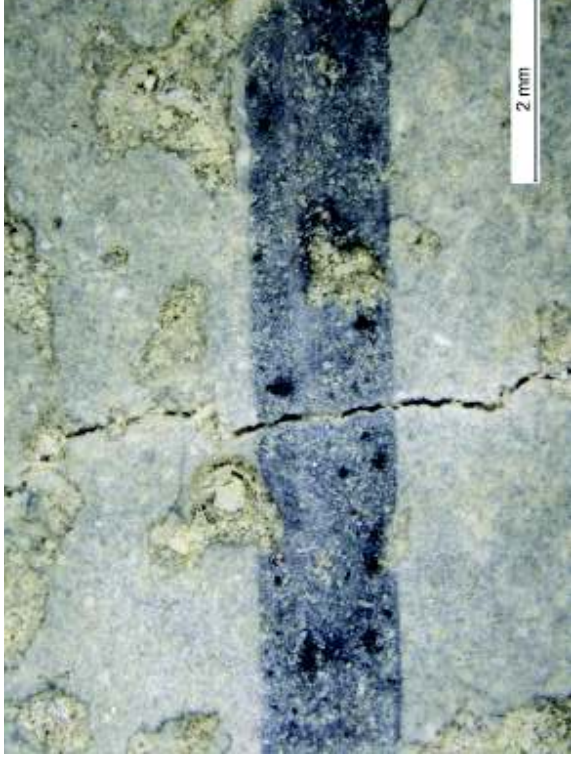




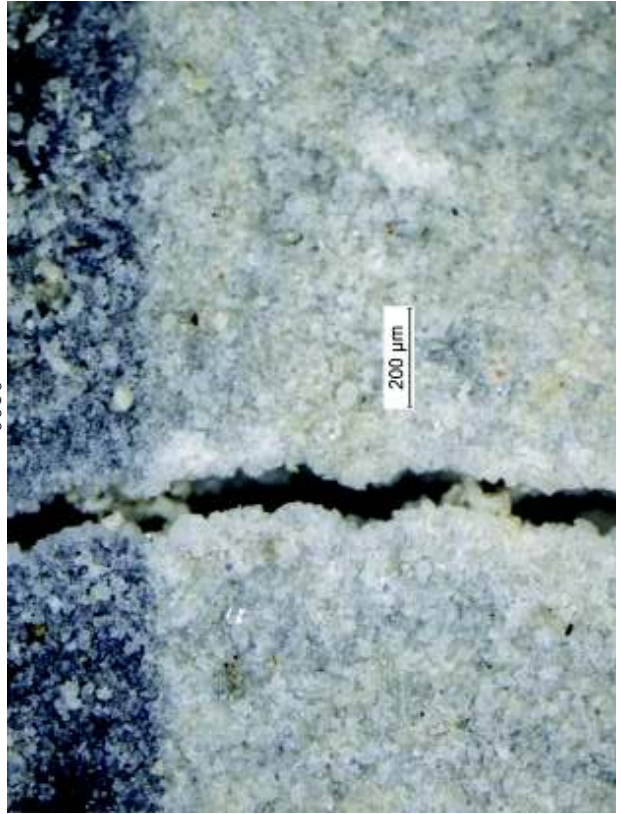
0006



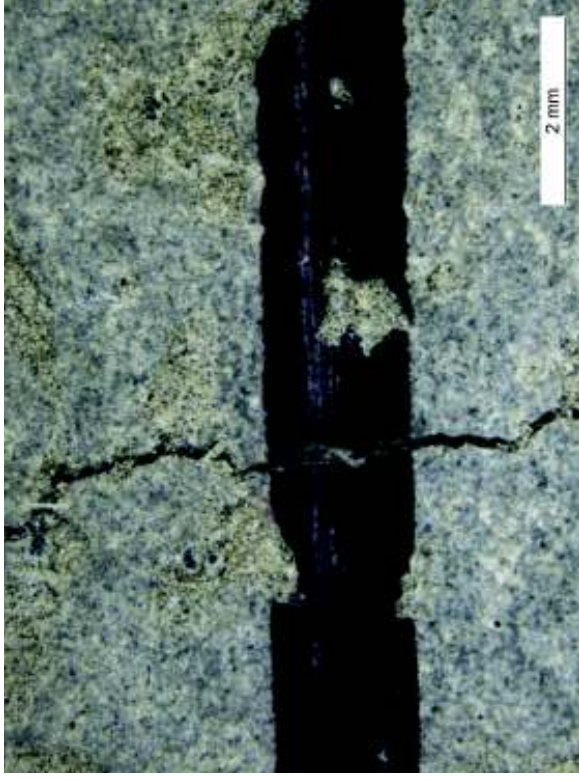
C2SH - 0007



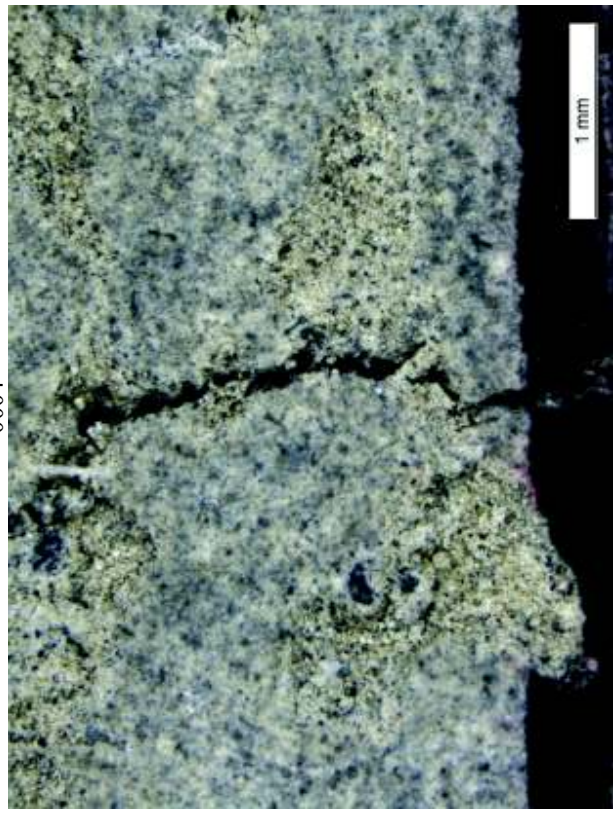
0010



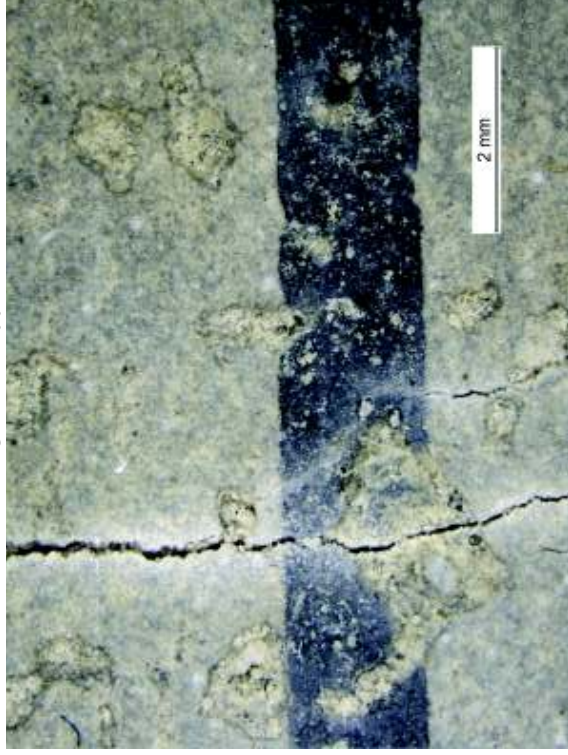
C2 - 0003



0004



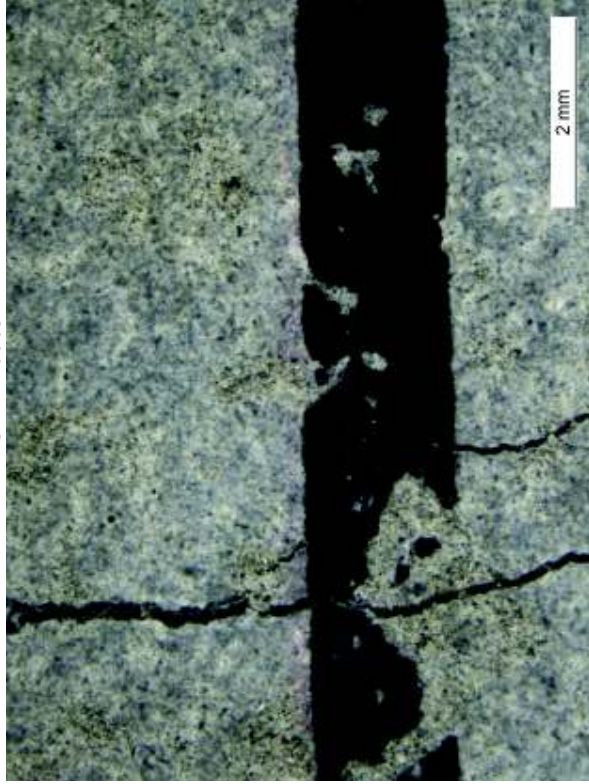
C3+R SH - 0012



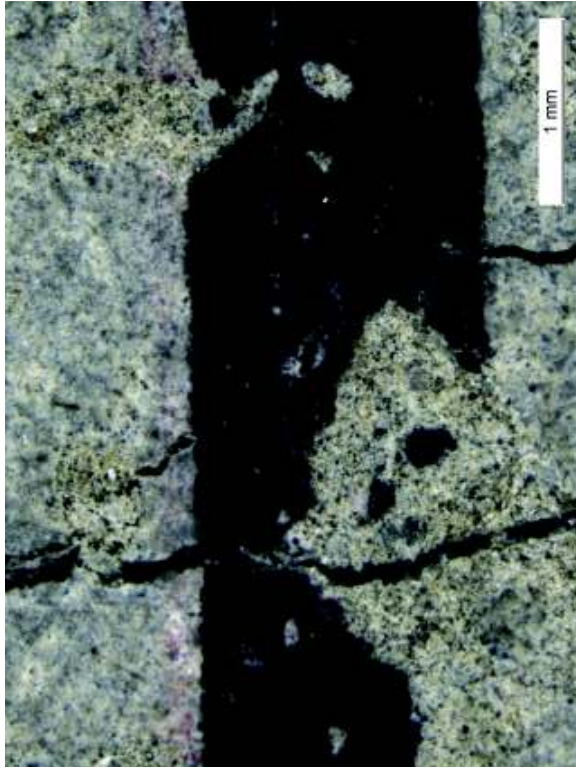
0013



C3+R - 0005

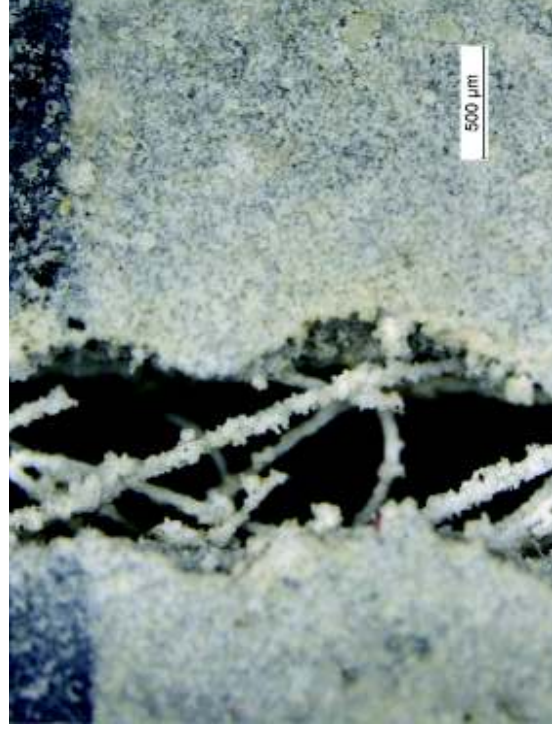
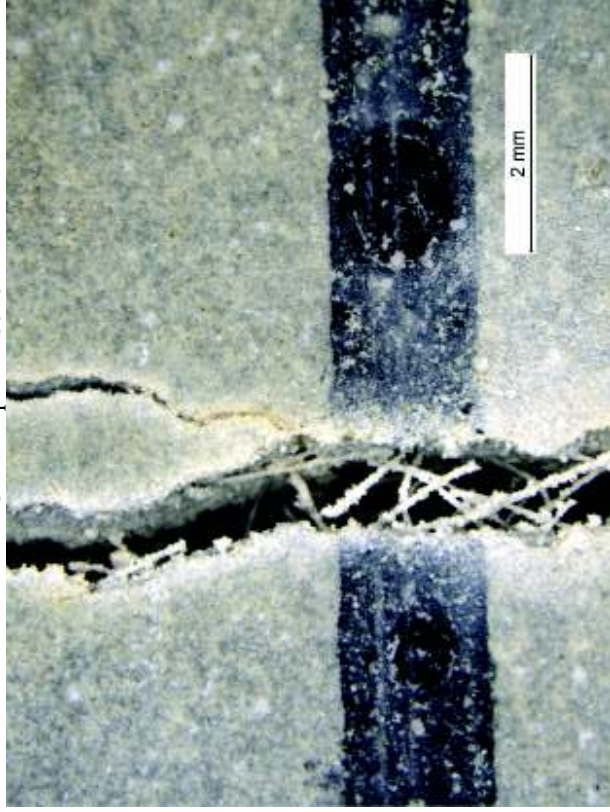


0006

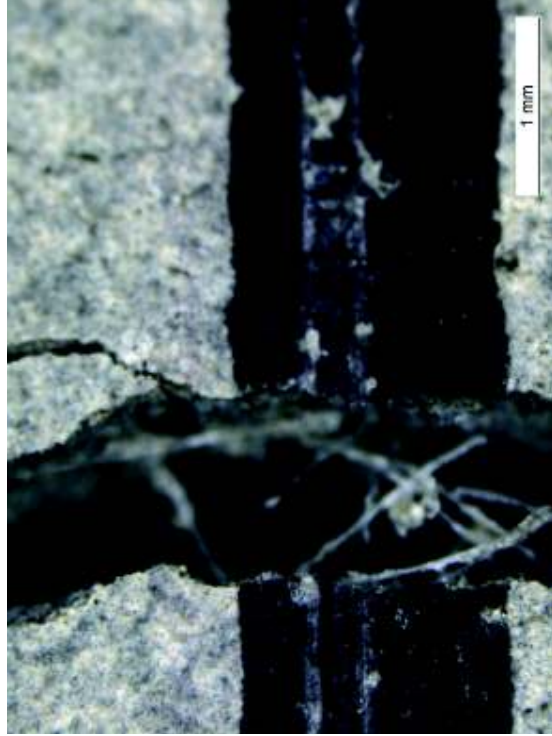




C5 SH Rupere - 0016



C4 Rupere - 0008



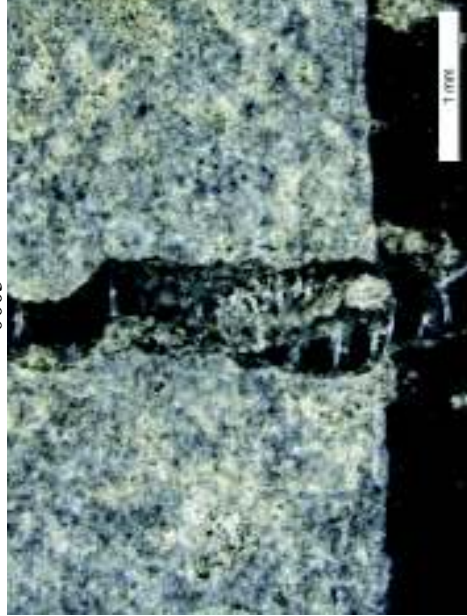
M 4.2 IIR

Initial

C3 Rupere - 0002



0003

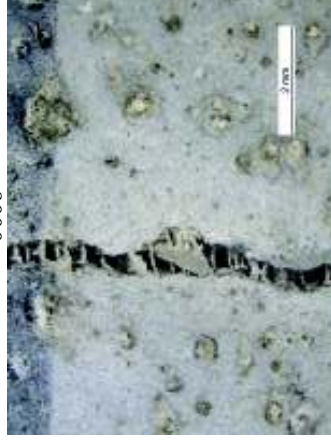


SH

C3 Rupere SH - 0005



0006



C4 SH - 0015



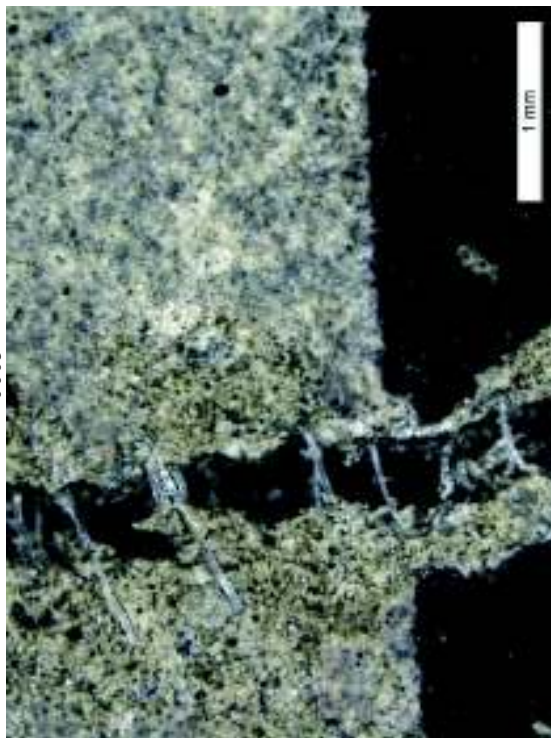
0016



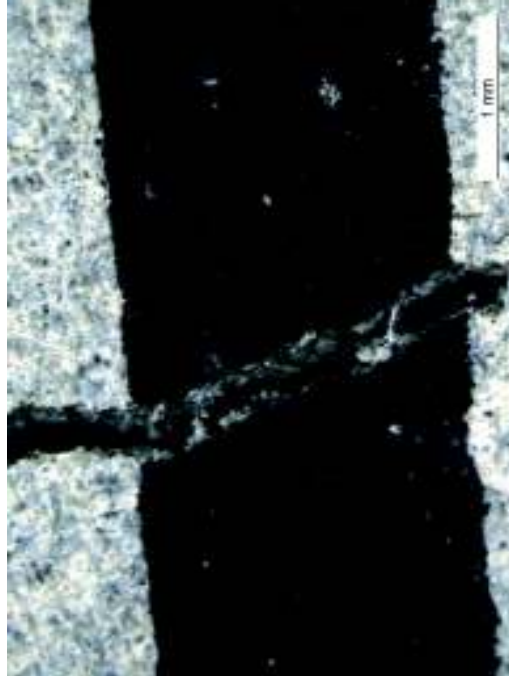
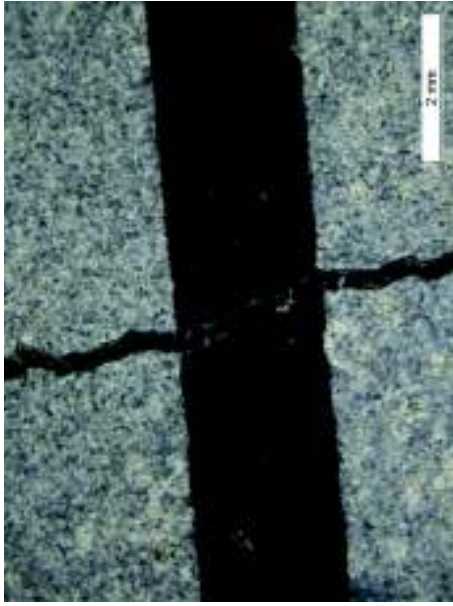
C4- 00045



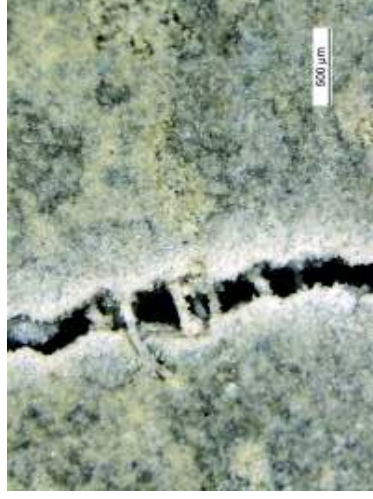
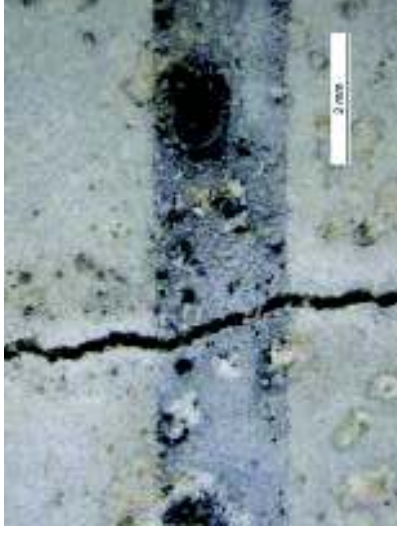
0005



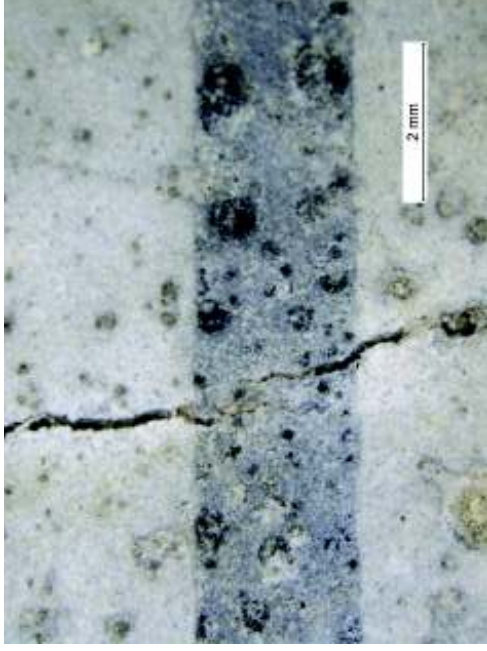
C5 mare – 0007



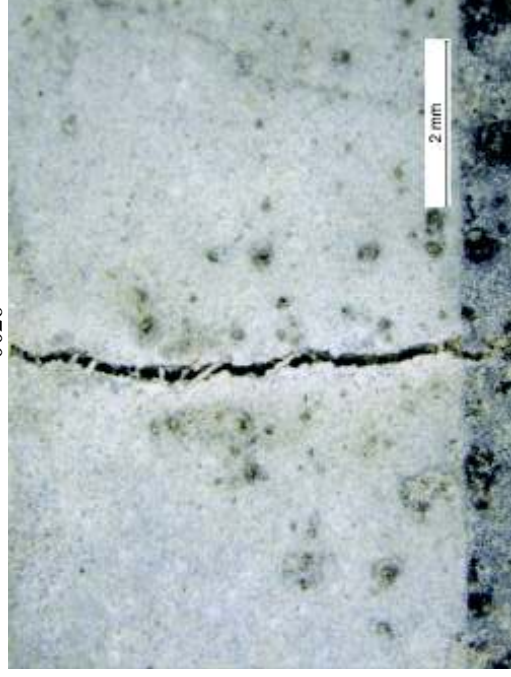
C5 SH mare – 0018



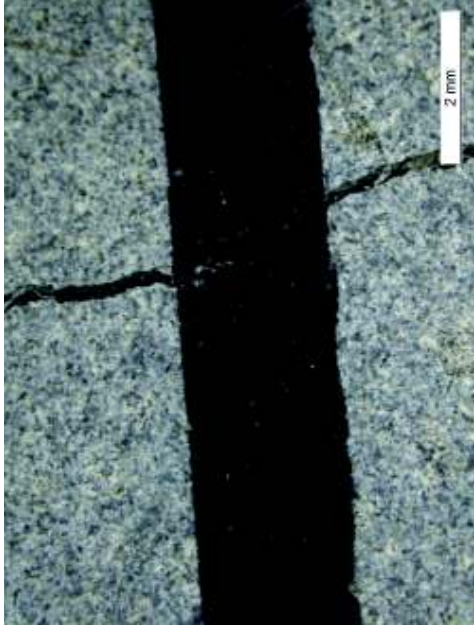
C6 SHI- 0025



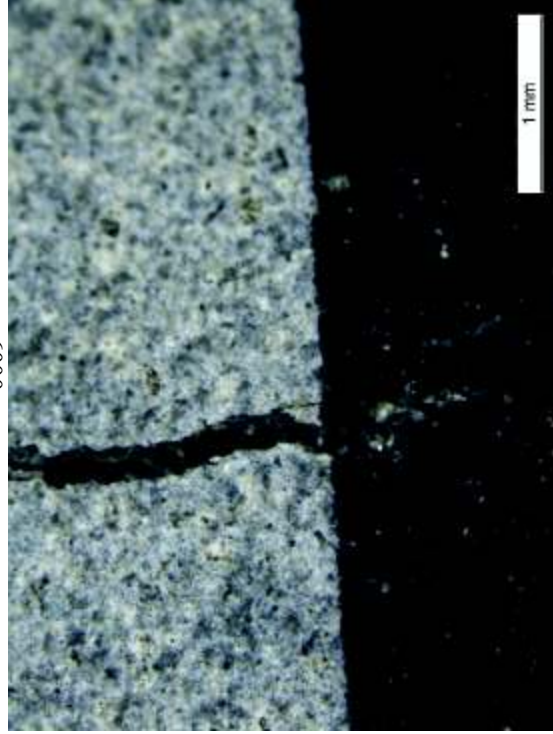
0026



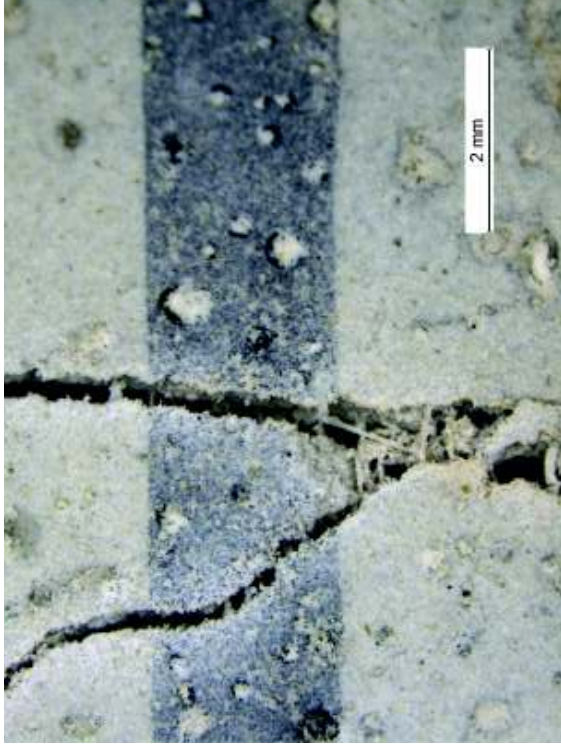
C6 - 0008



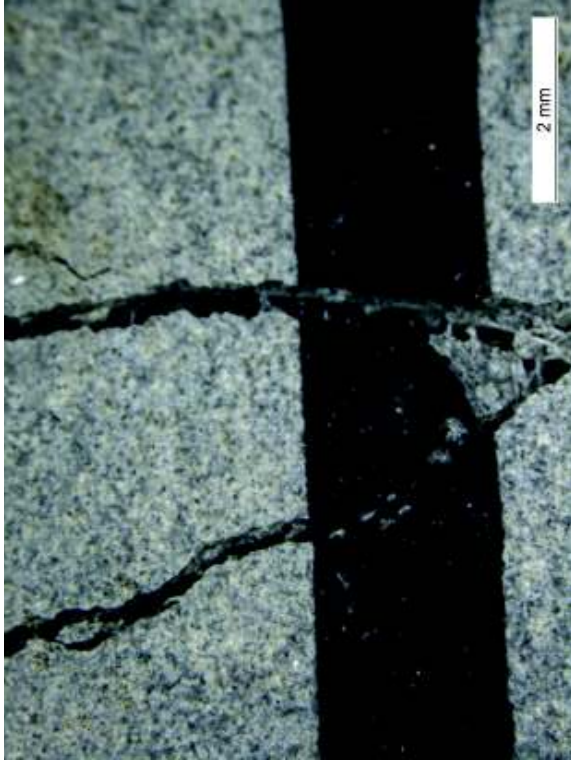
0009



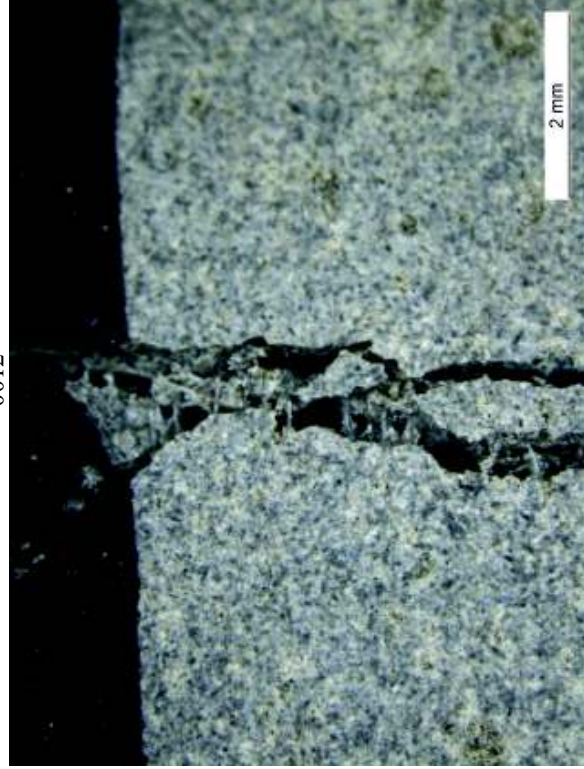
C7 SH - 0029



C7 - 2R 0011



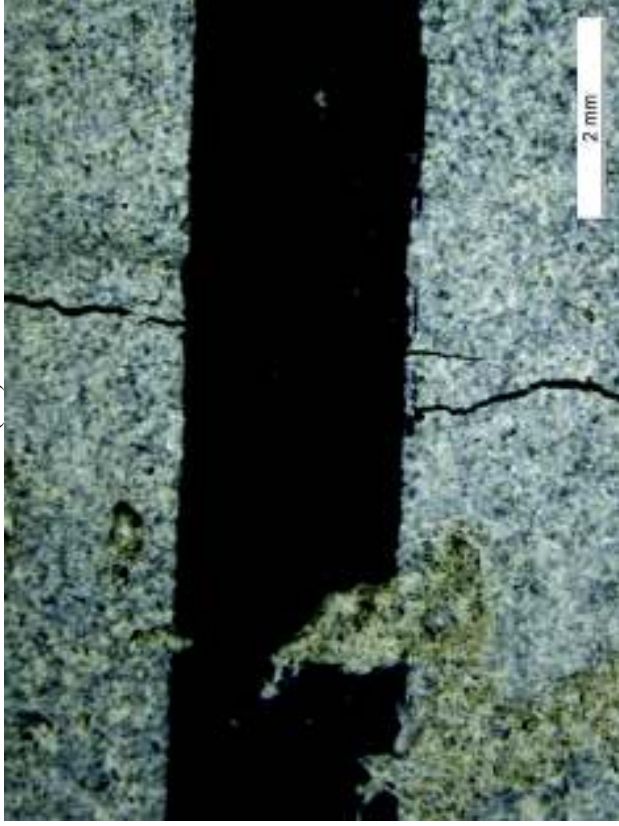
0012



M 4.2 III R

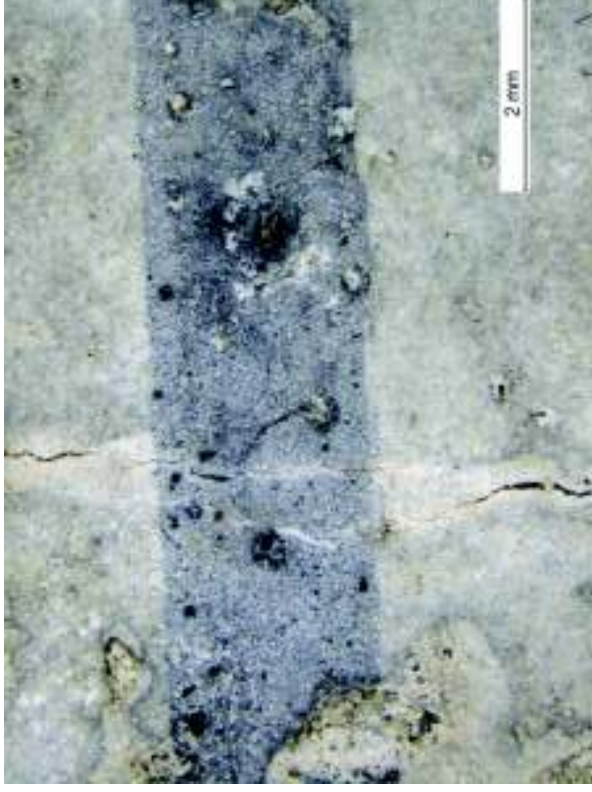
Initial

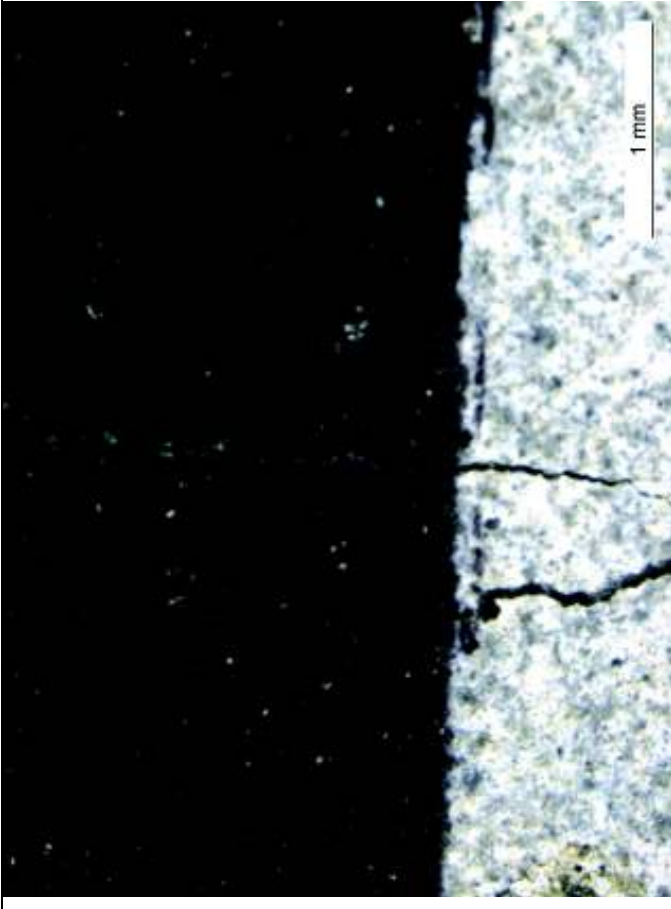
CI (2R):-/



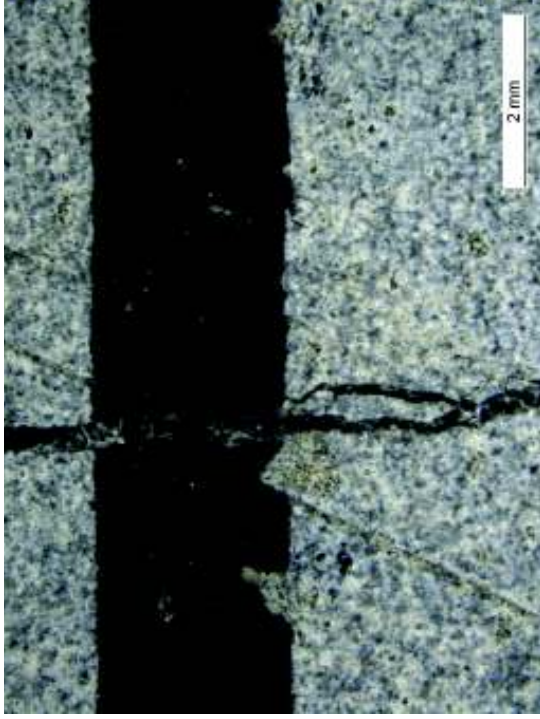
SH

CI+C2 SH-

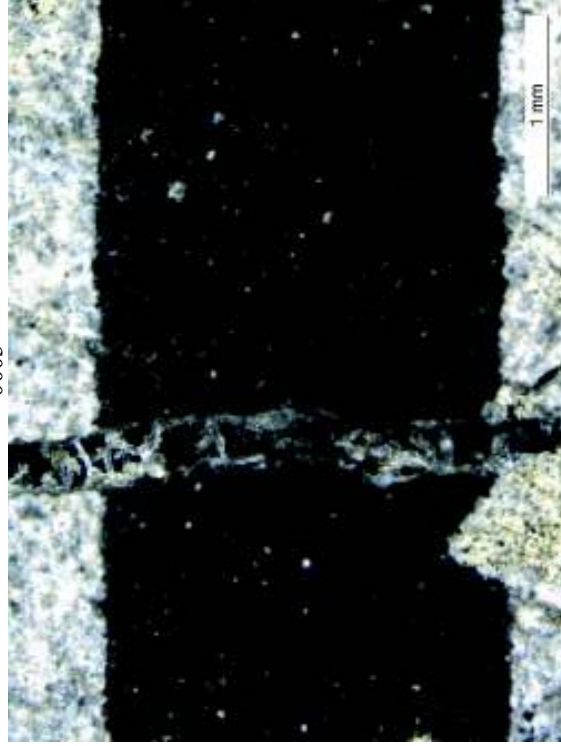




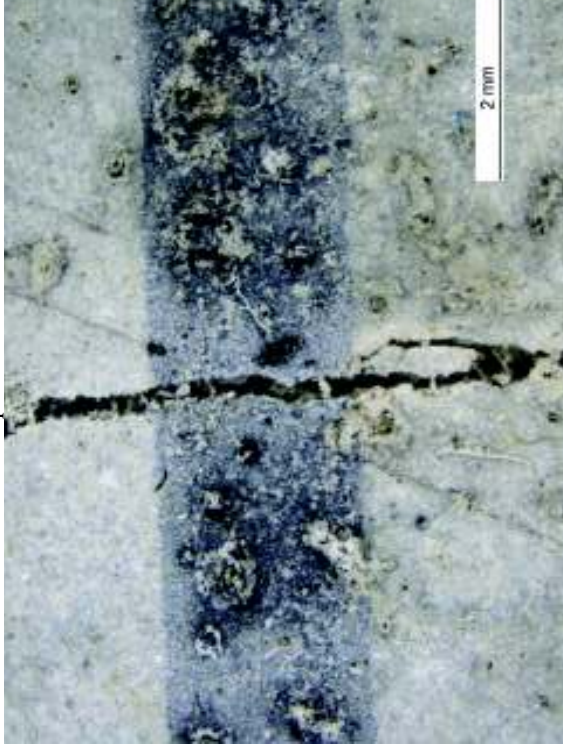
C2 mare- 0002



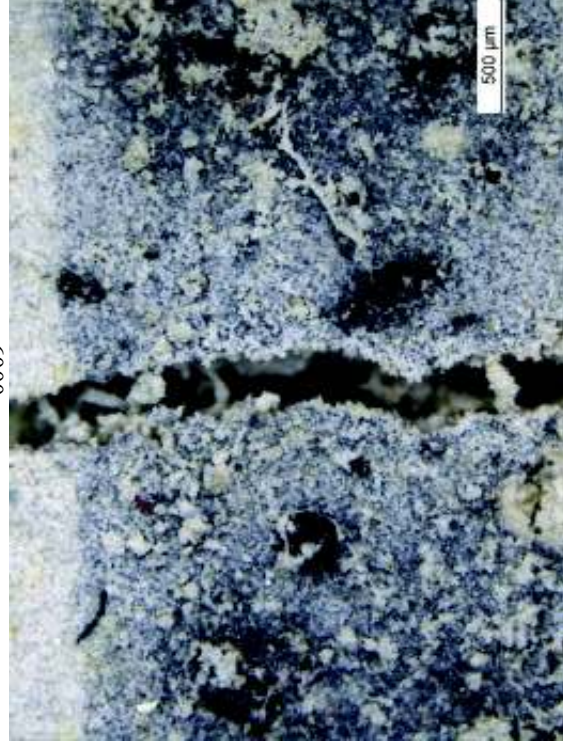
0003



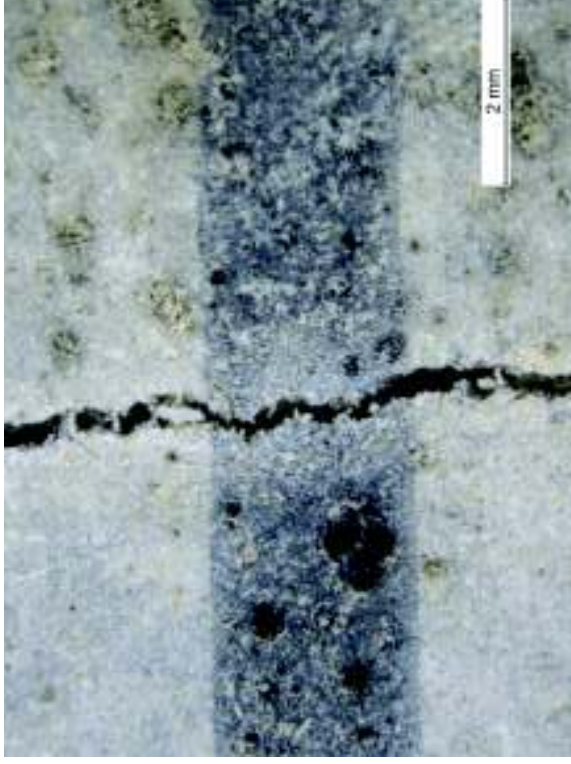
C2Rupere SH - 0008



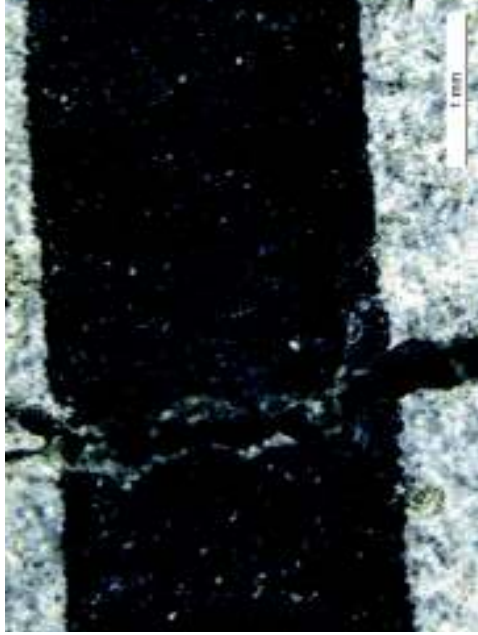
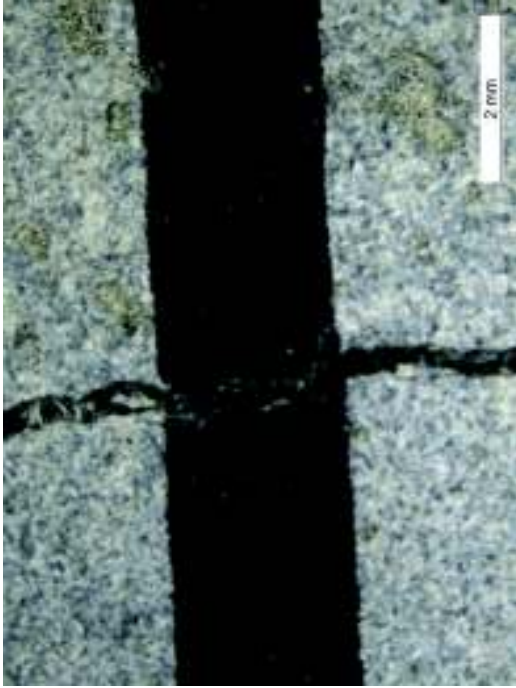
0009



C4 SH mare - 0024



C4 0006 - 0007

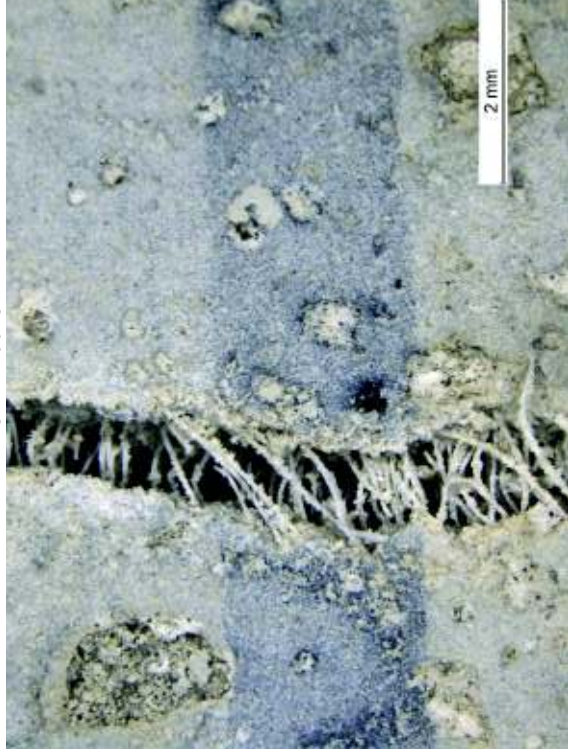


C5 - 0008



0009

C5 SH- 0025

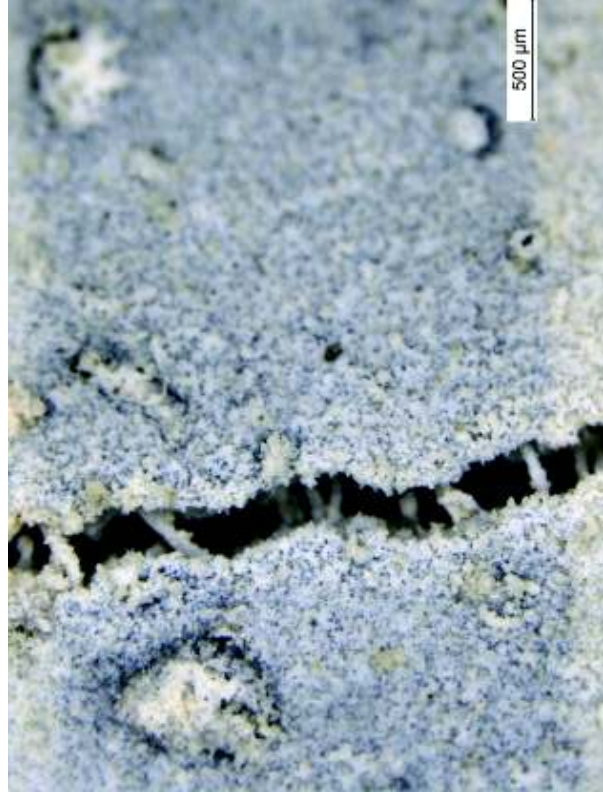


0026

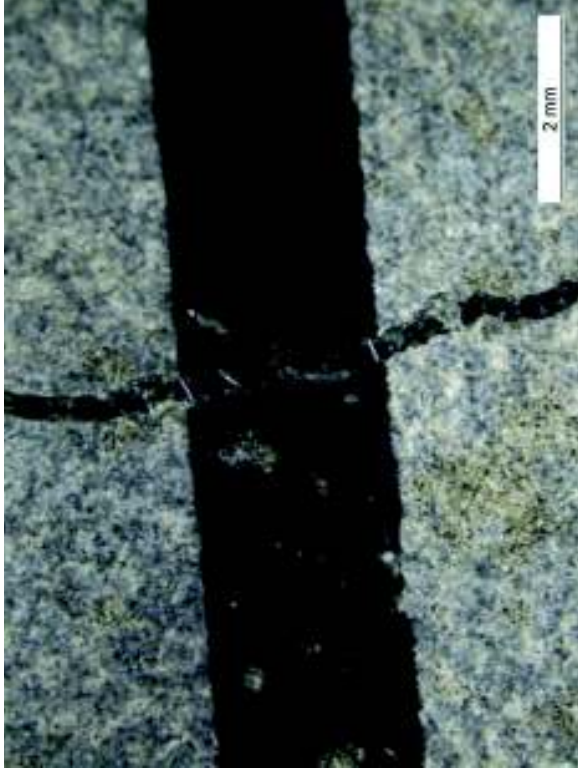




C6 SH - 0030



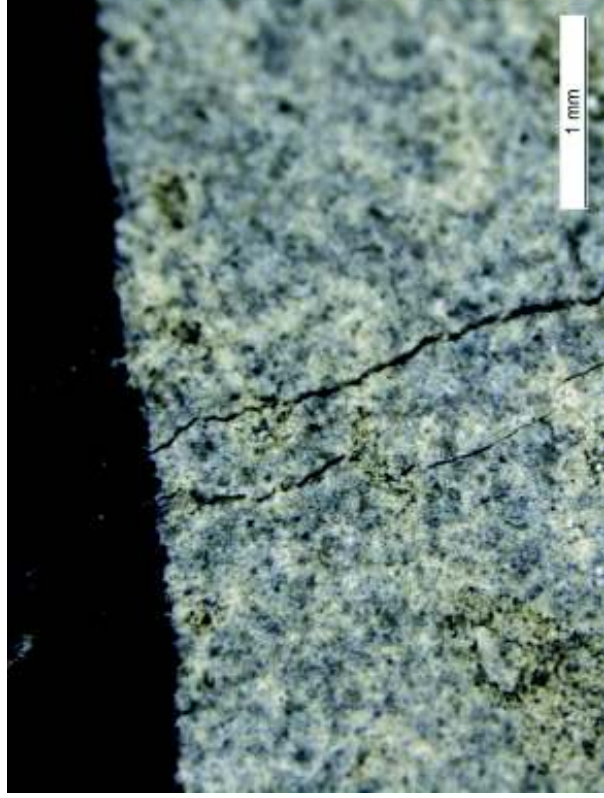
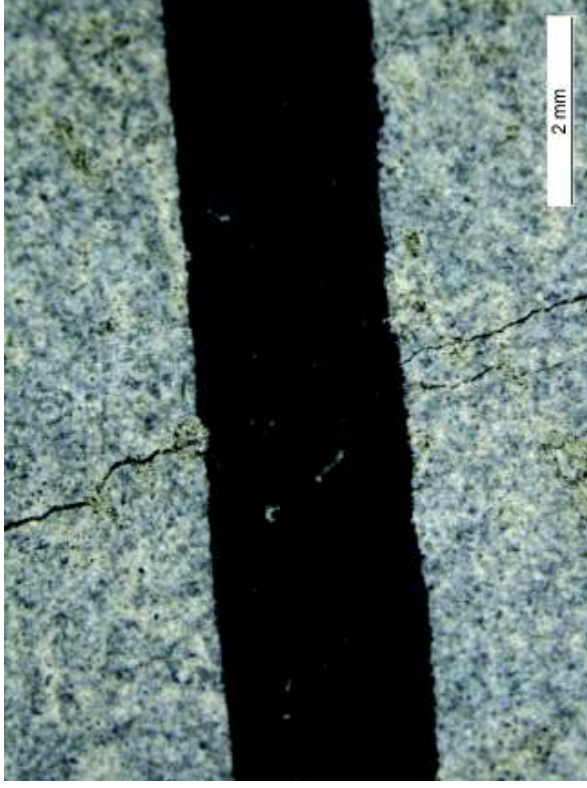
C6 - 0011



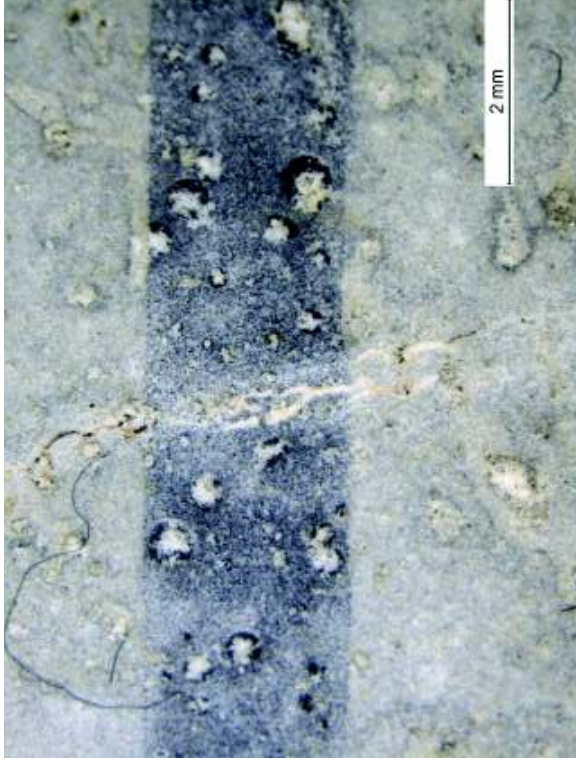
0012



C7+C8 - 0014



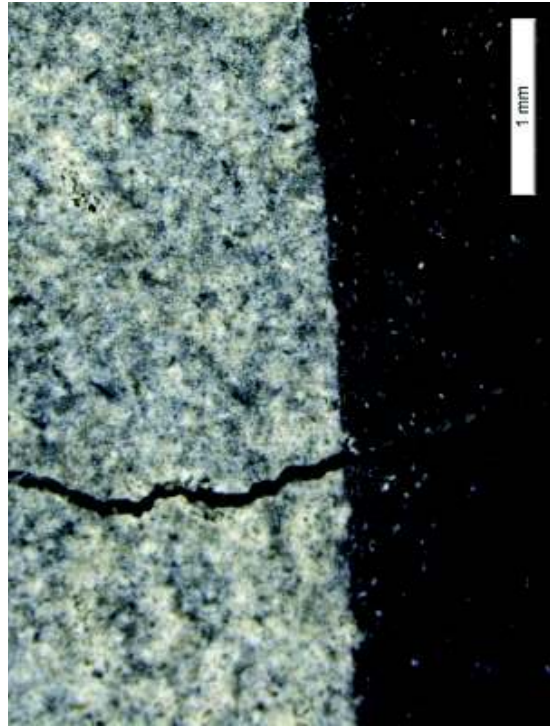
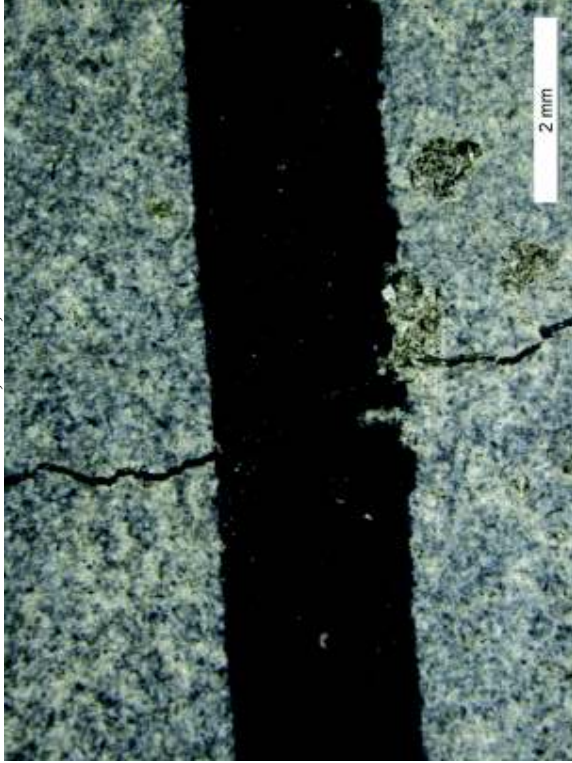
C7+C8SH - 0032



M 4.2 IV R

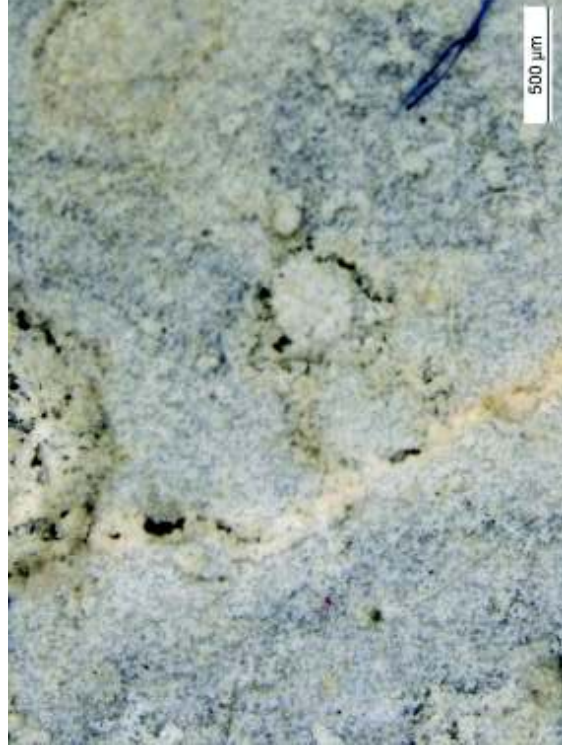
Initial

C1: -; 0001;

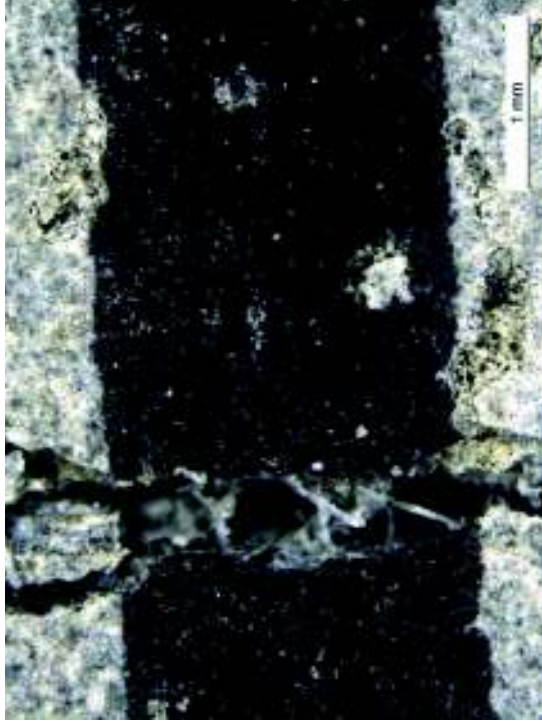


SH

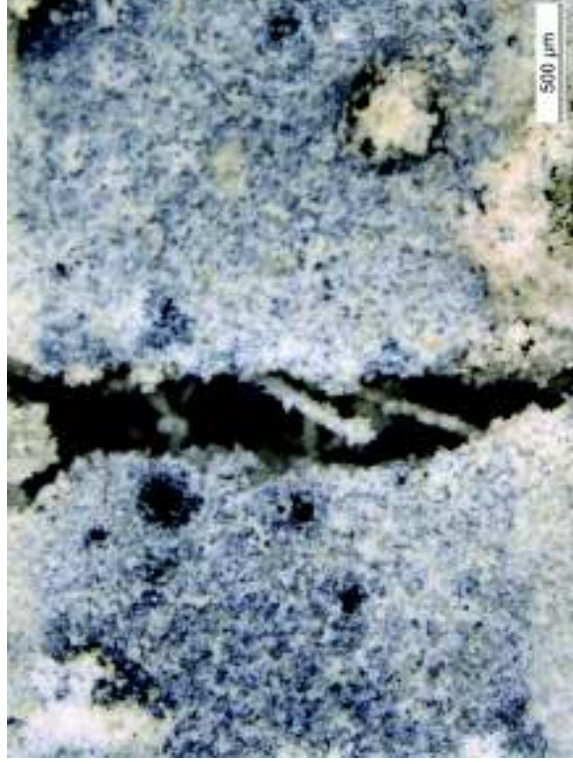
C1 SH, C2 SH



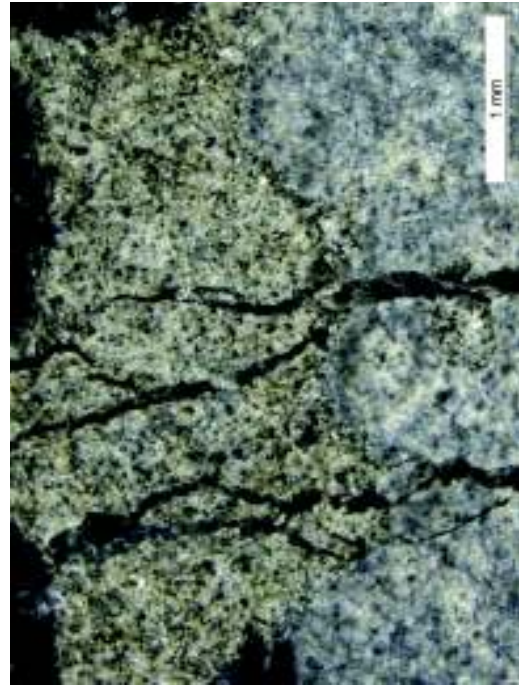
C2 - 0002



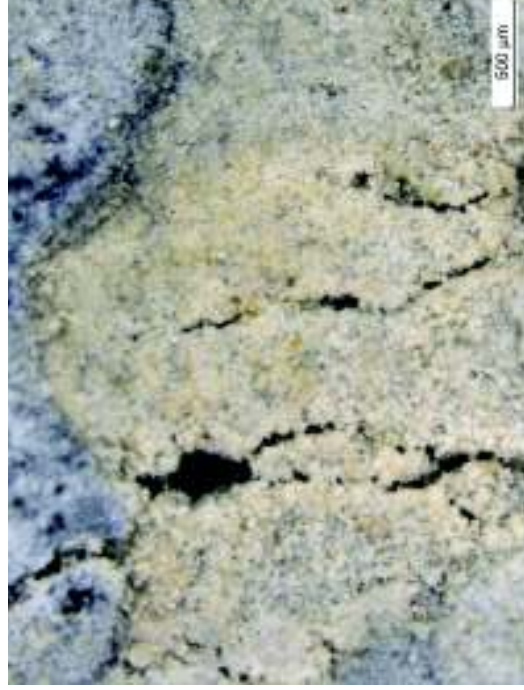
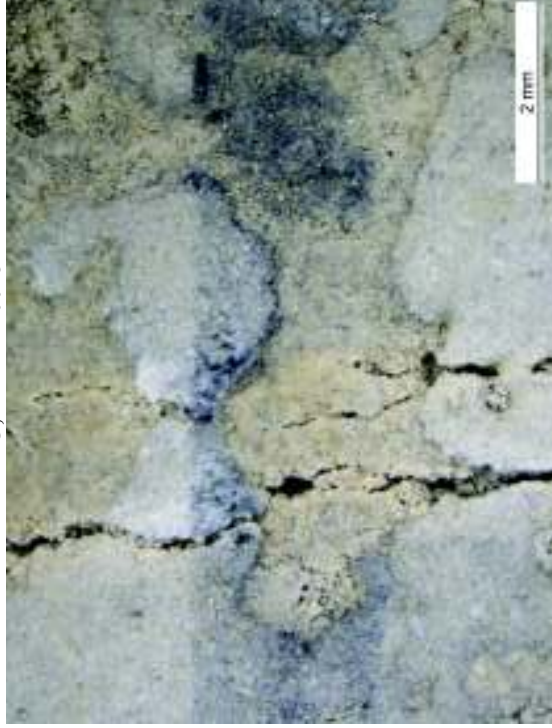
C2SH - 0009



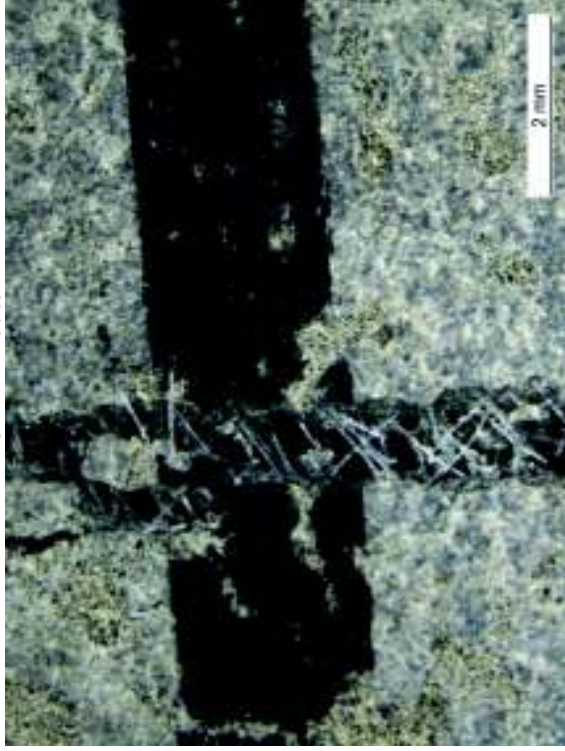
C3; C4 - 0005



C3; C4 SH - 0015



C5 mare – 0009



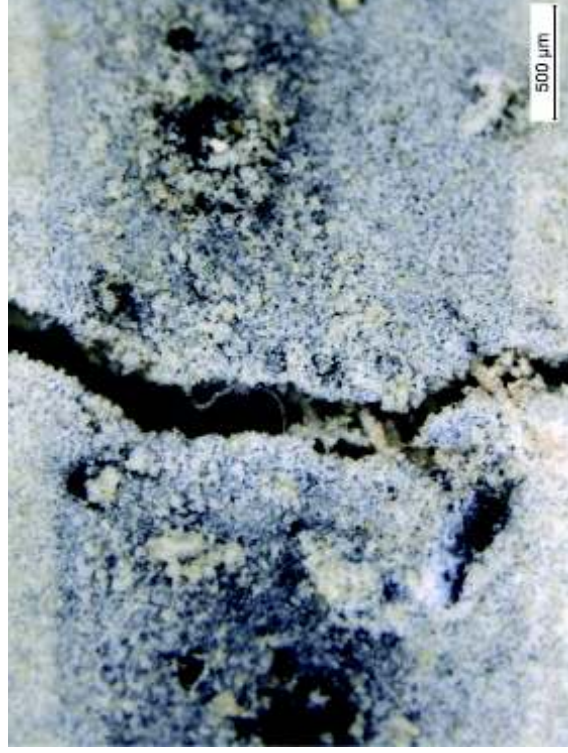
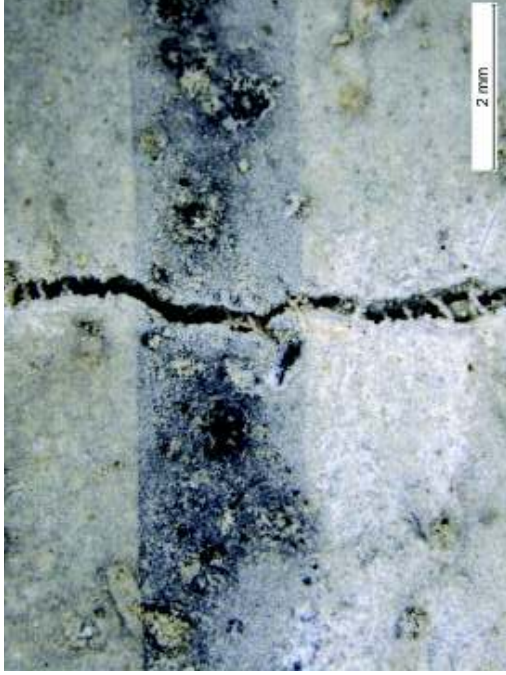
C5 SH mare – 0020



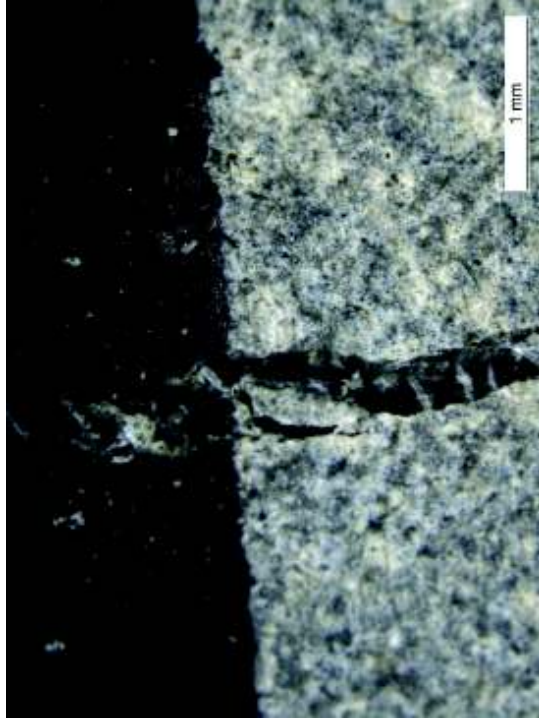
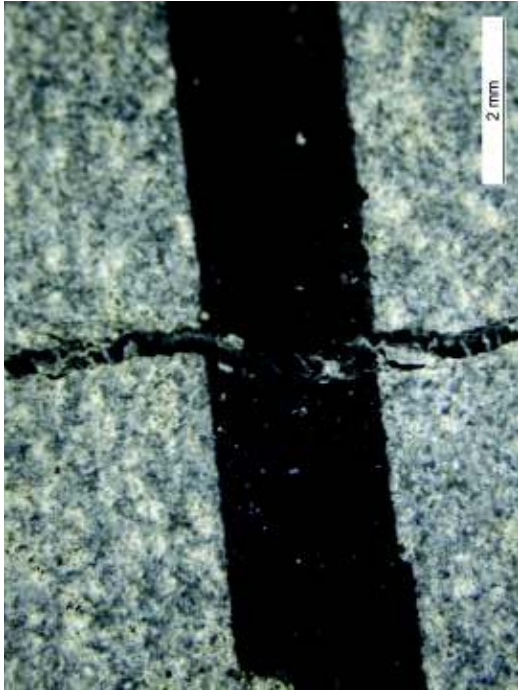
0024



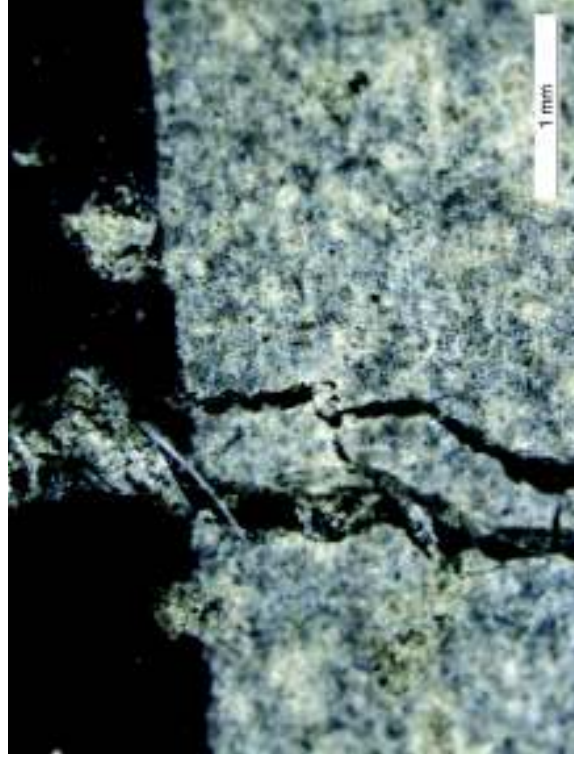
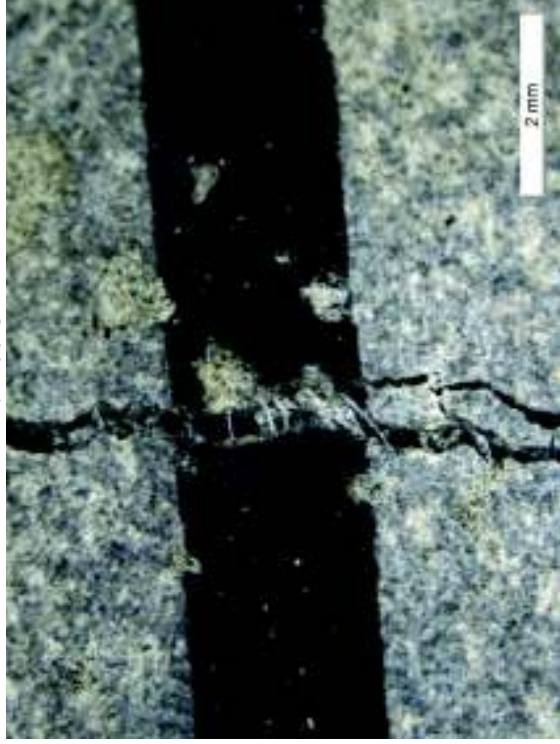
C6 SH-0025



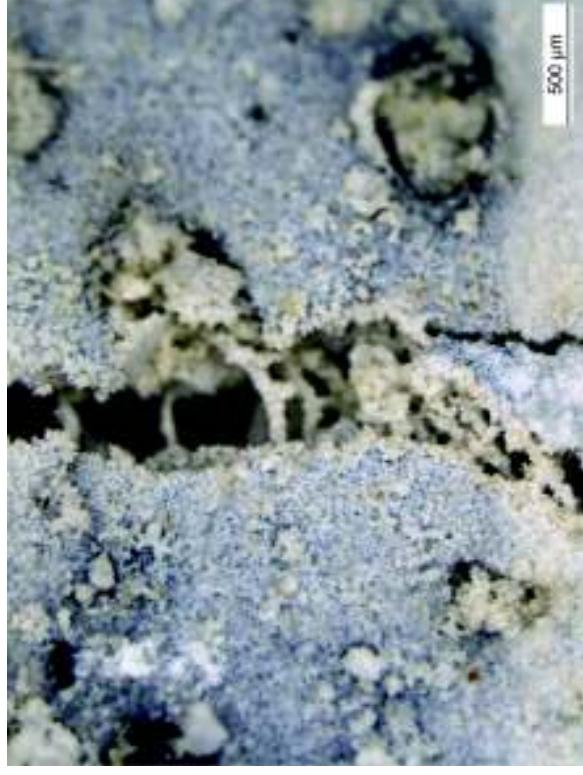
C6 - 0011



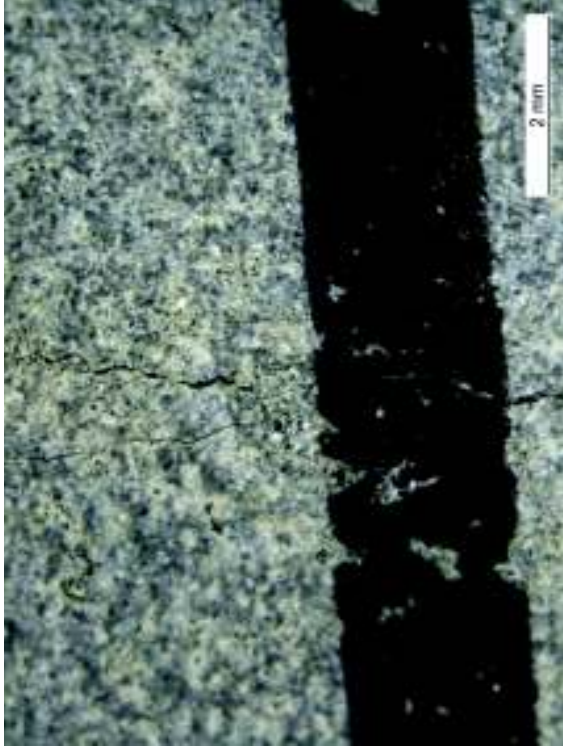
C7 - 0013



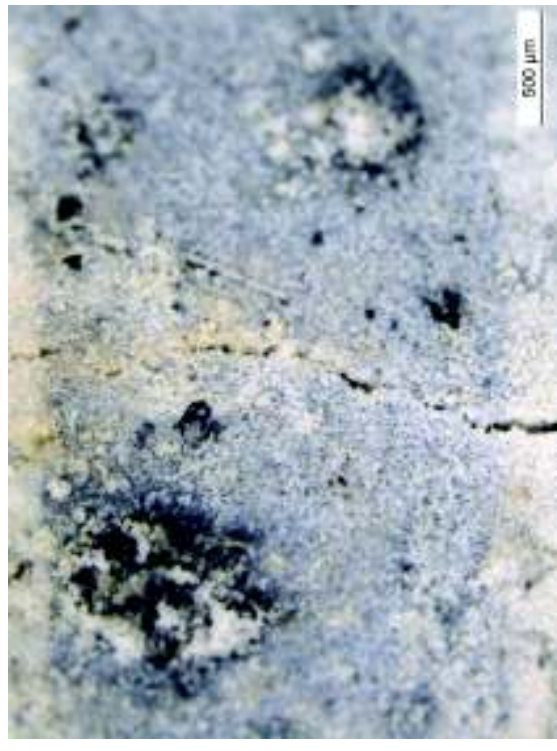
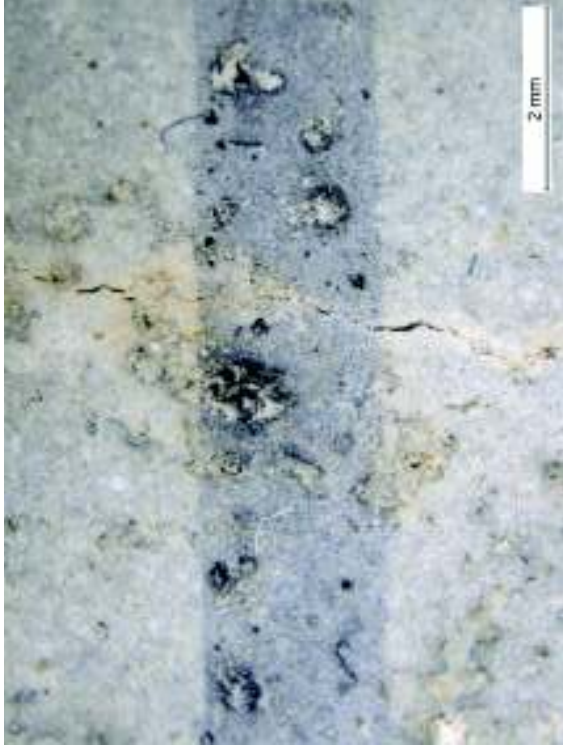
C7 SH - 0029



C8 - 0016



C8 SH - 0033



II. Compoziții supuse ciclului de preîncărcare, vindecare și retestare până la rupere, rata de încărcare IV

III. M 1.4 IV SH 10

v = 1.5

SH

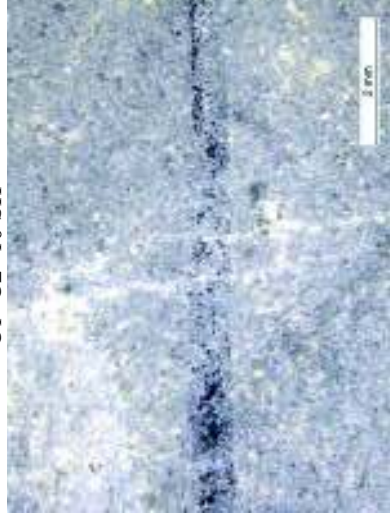
Initial

C1+C2 -10-

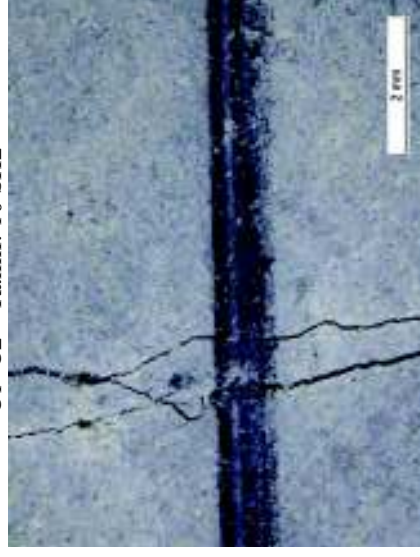
C1+C2 + Ramif: 10 SH2 -



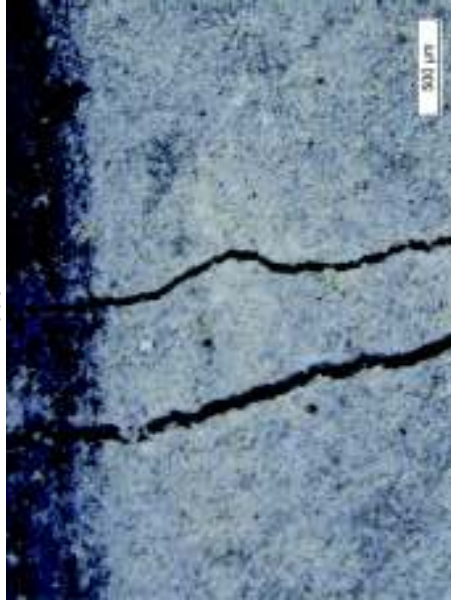
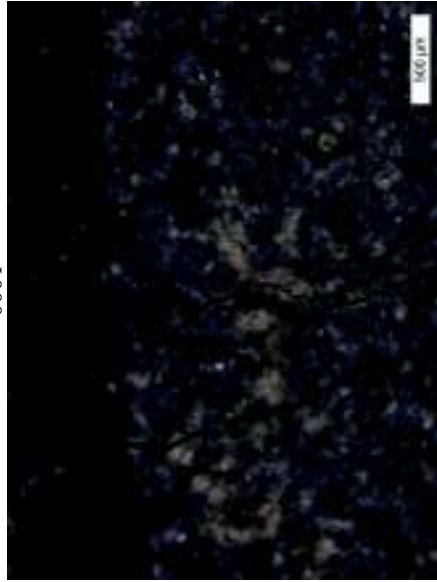
0001



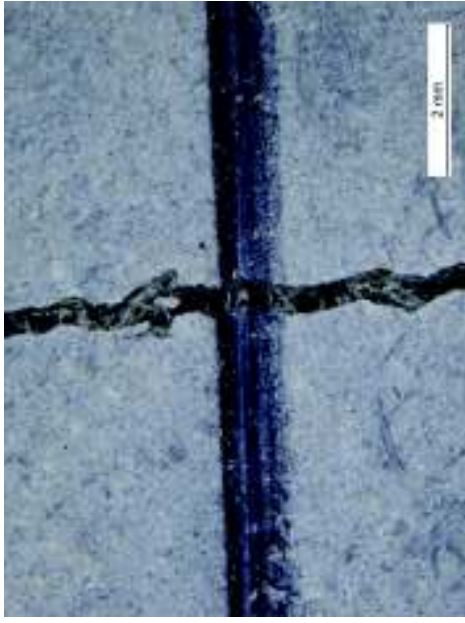
0005



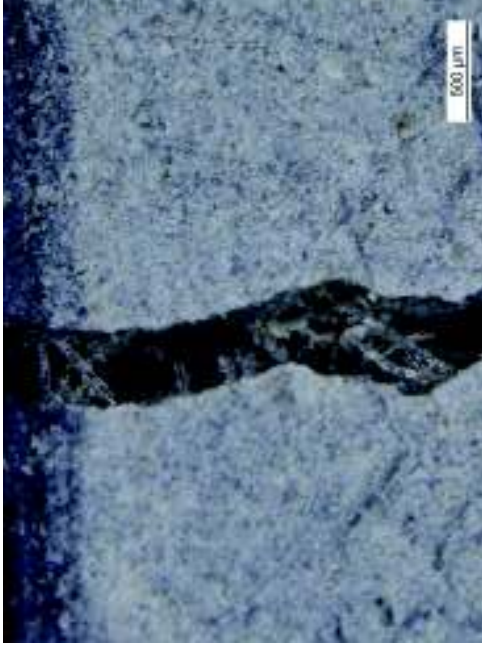
0002



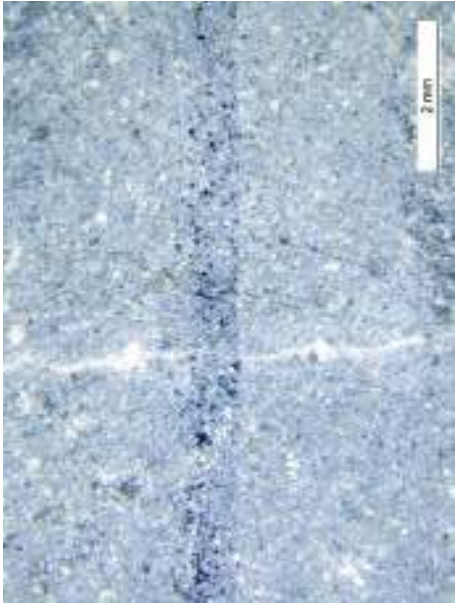
C1+C2 + Ramif: 10 SH2 0004



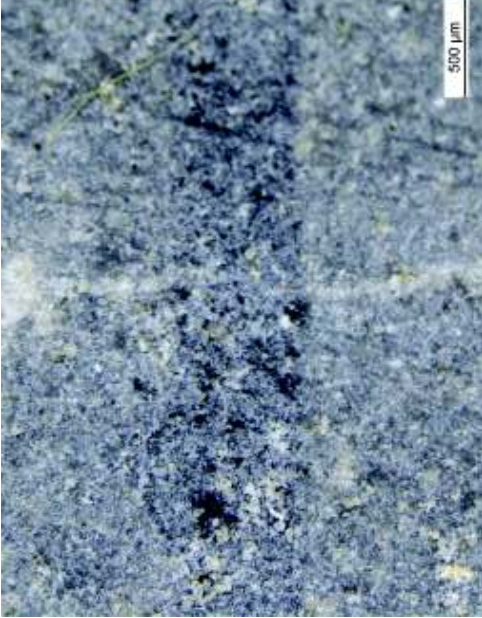
0007



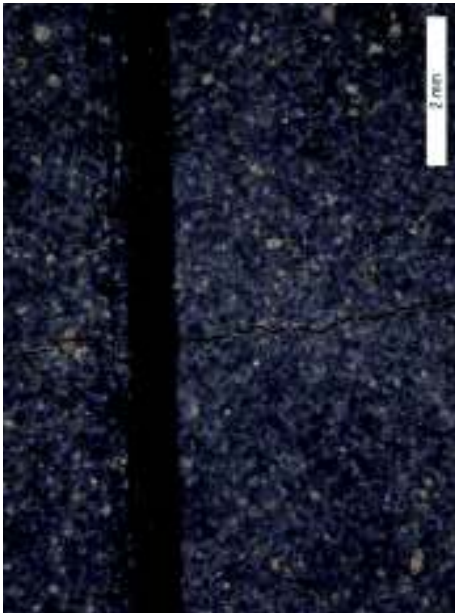
C3 -10 SH- 0010



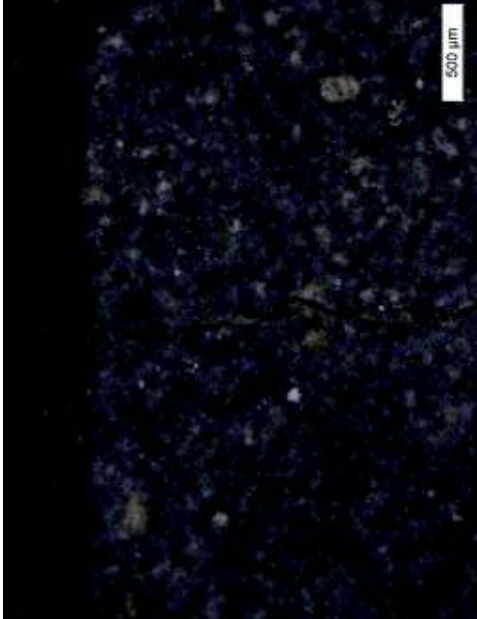
0011



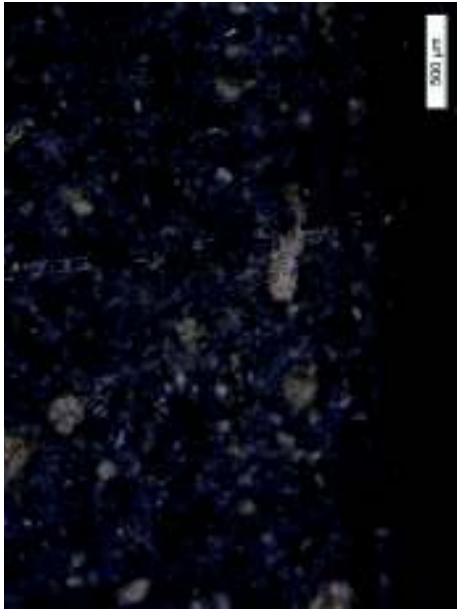
C3 -10- 0002



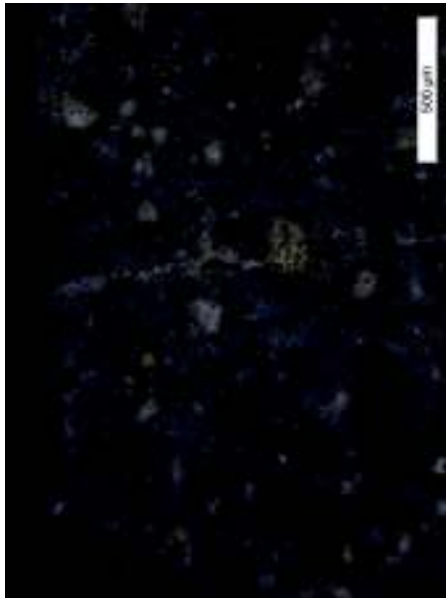
0003



C4 -10-0004



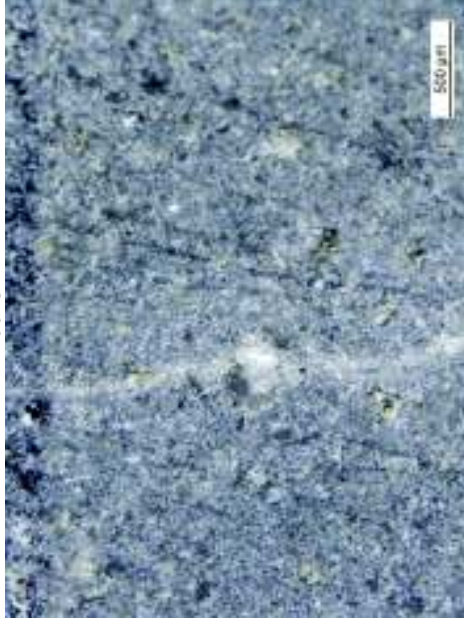
0005



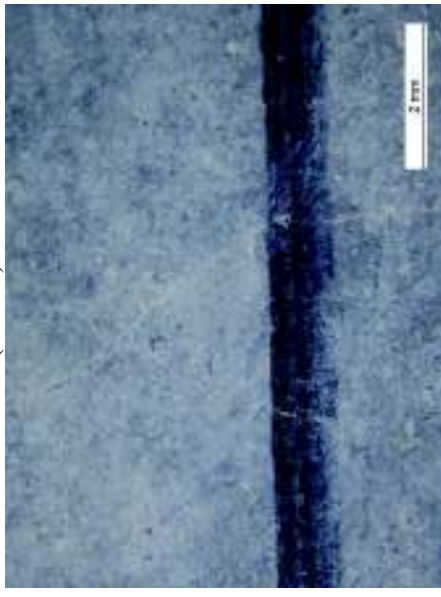
C4 -10 SH -0014



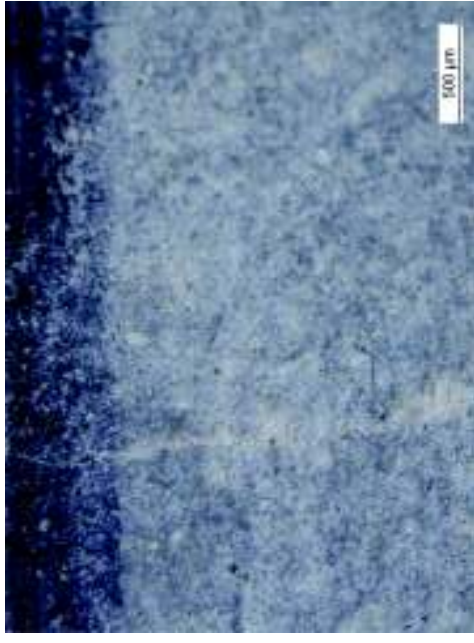
0013



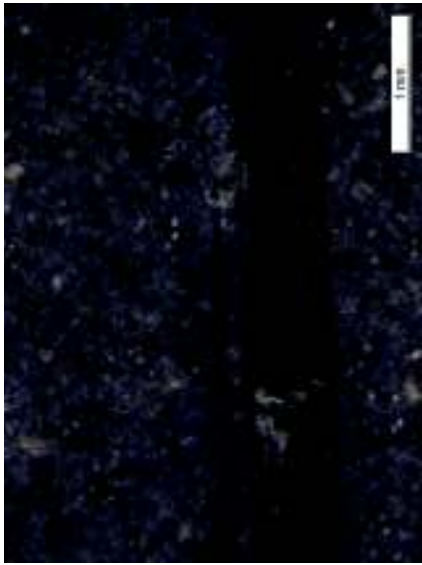
C4 + Ramif (inchise): 10 SH2 -0008



0011



C5 - 10 - 0006



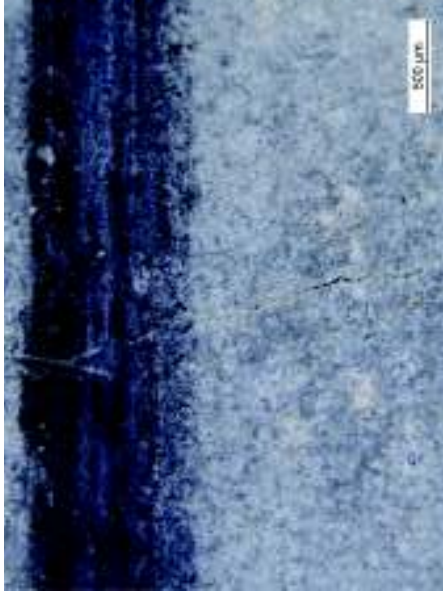
0007



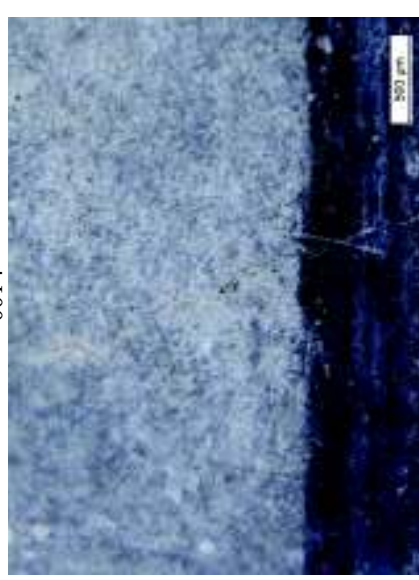
C5 SH1 - 10 - 0020



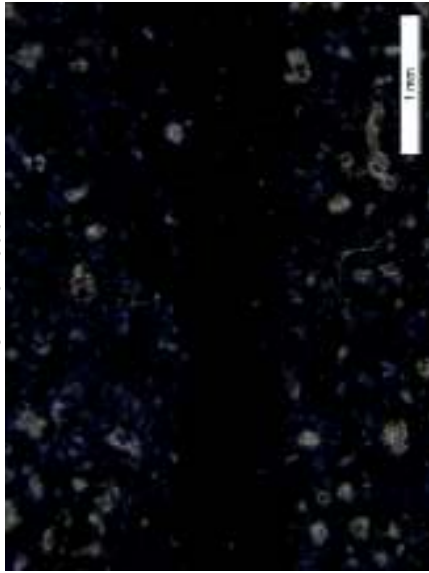
C5 SH2 - 10 - 0013



0014



C6 - 10 - 0008



0009



C6 SH1 - 10-0023



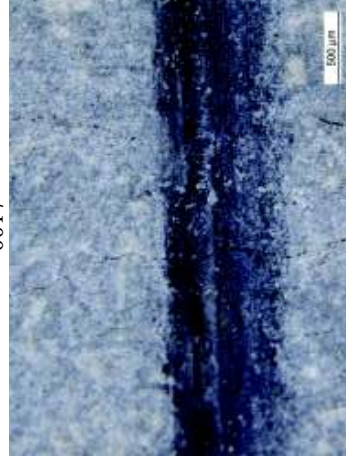
C6 SH2+ 2 ramificatii - 10-0015



0016

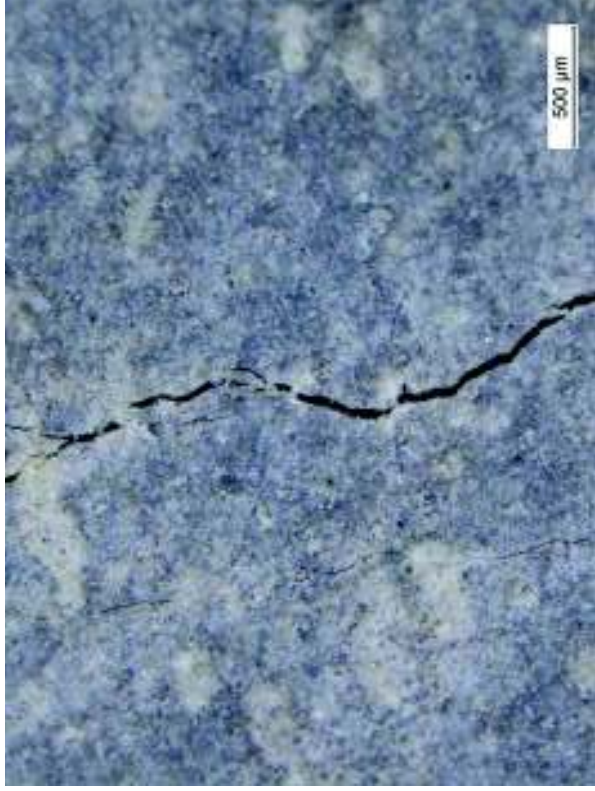


0017

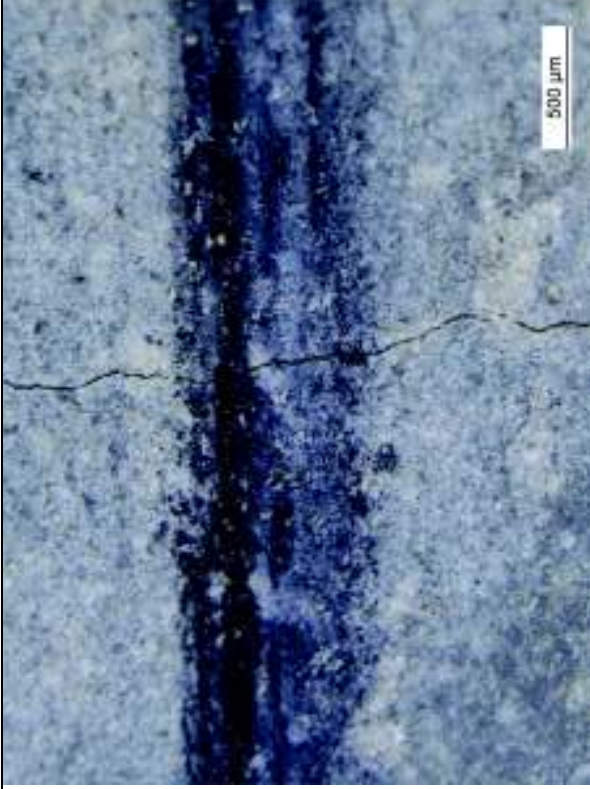


SH – Test 2

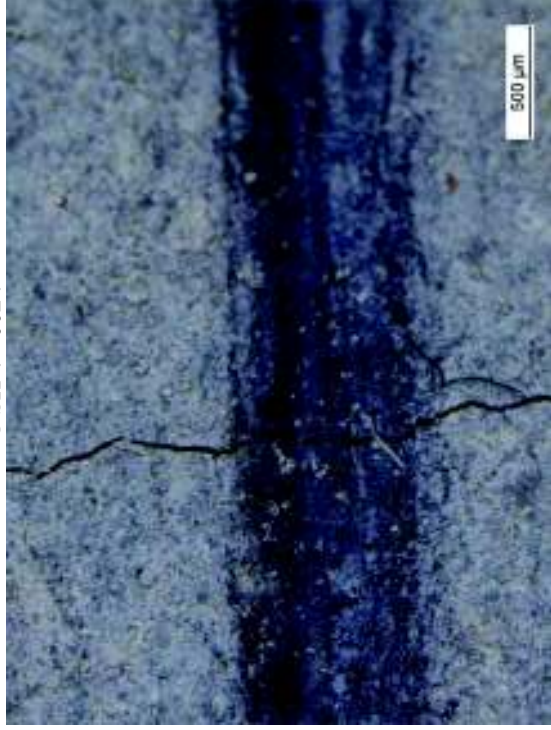
C SH 1+ C SH 2



C SH 3 – 0020



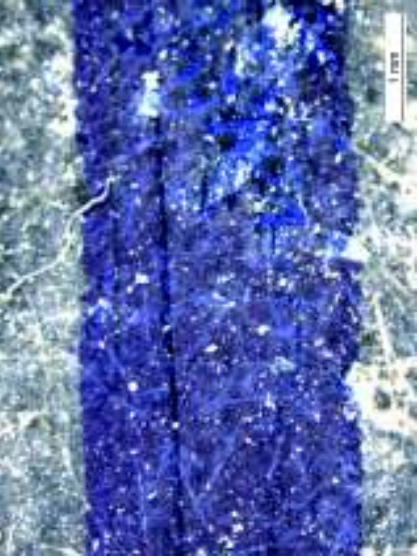
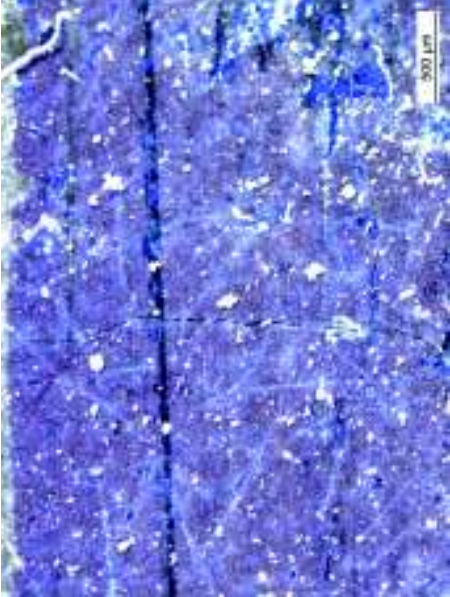
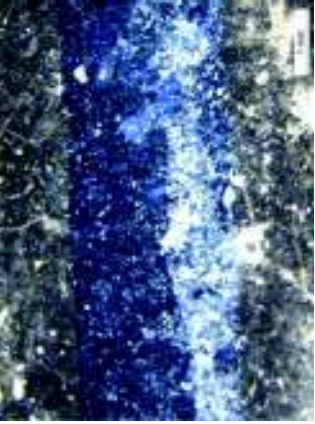
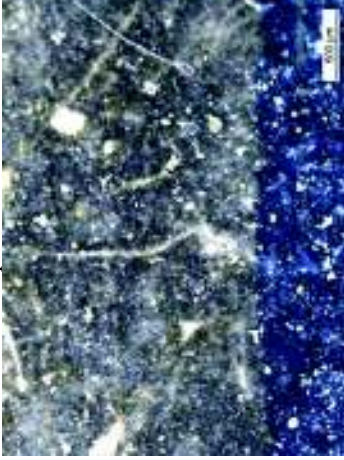
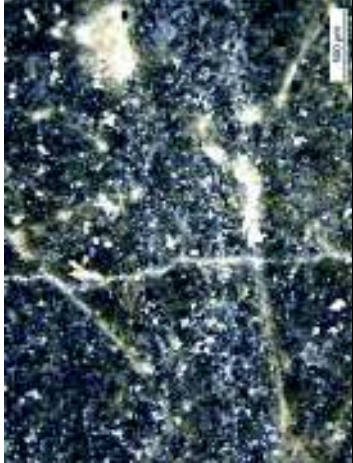

C SH 4 - 0024



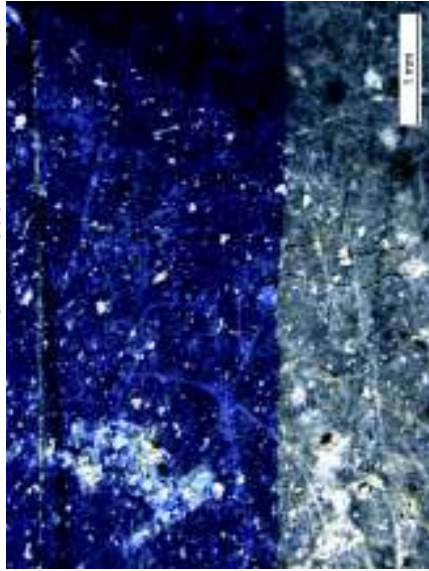
C SH 5 - 0026



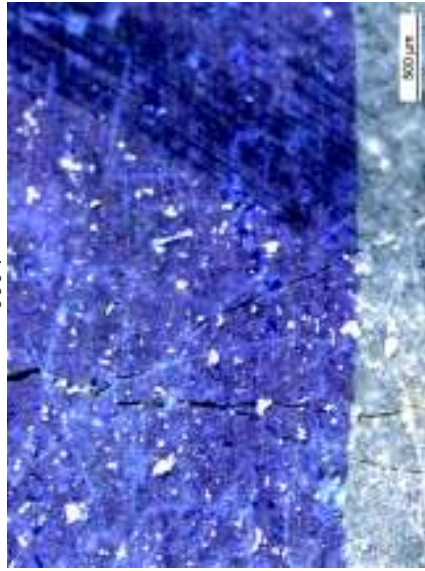
M 1.5 IV SH

Initial	v = 1.5	SH
<p>C1 -7-</p>  <p>0001</p> 	<p>C1 -7 SH -</p>  <p>Aprox 0001</p>  <p>0003</p> 	<p>C1: 7 SH2 - 0005</p> 

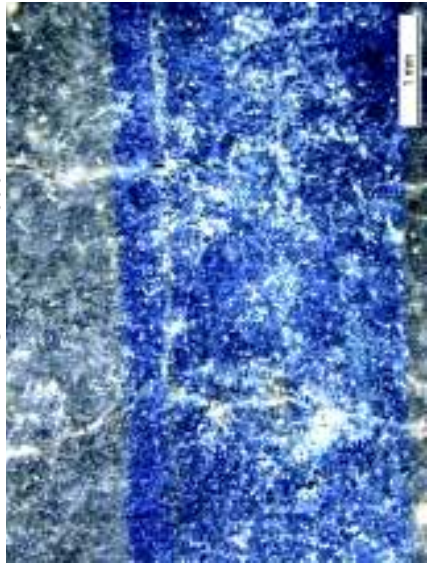
C2+C3+R - 0002



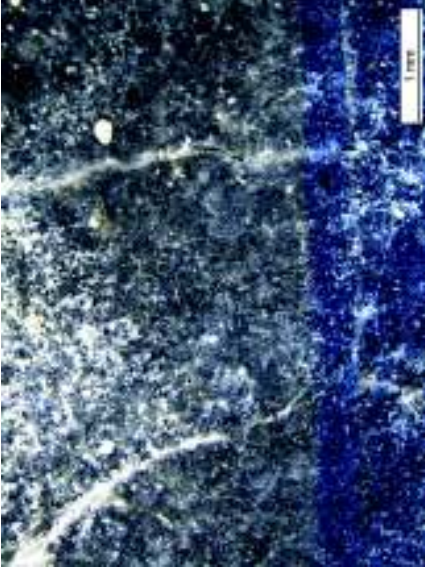
0004



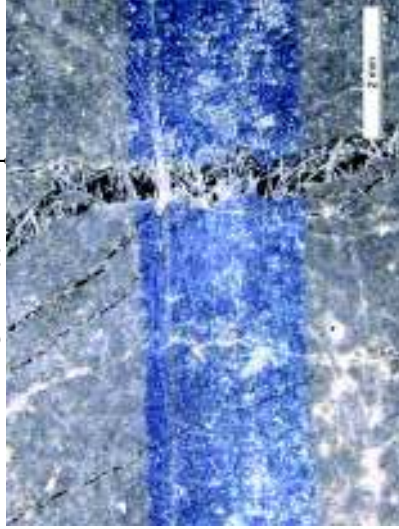
C2+C3+R SHI - 0004



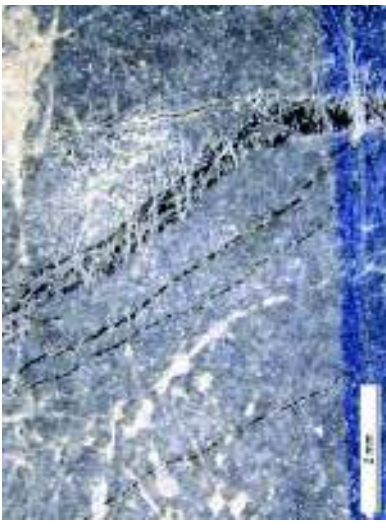
0005



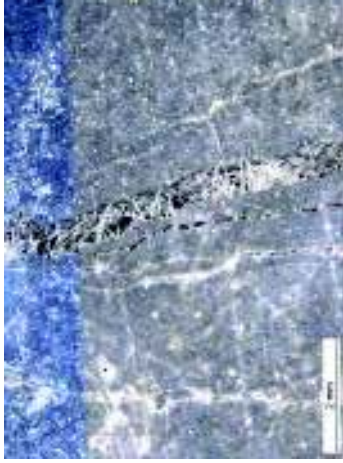
C2+C3+R - 0011 - Rupere



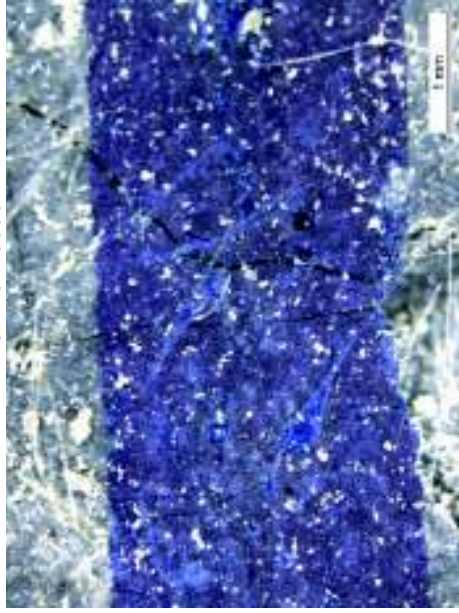
00012



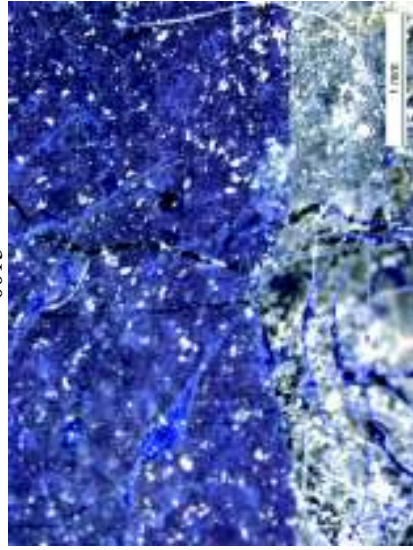
00013



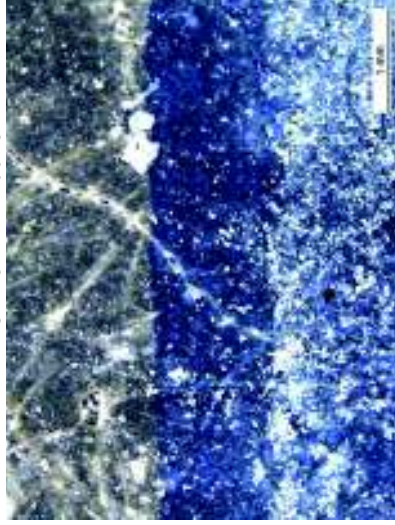
C4+C5+C6 - 0006



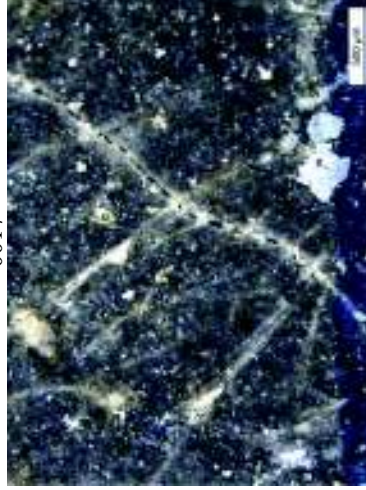
0013



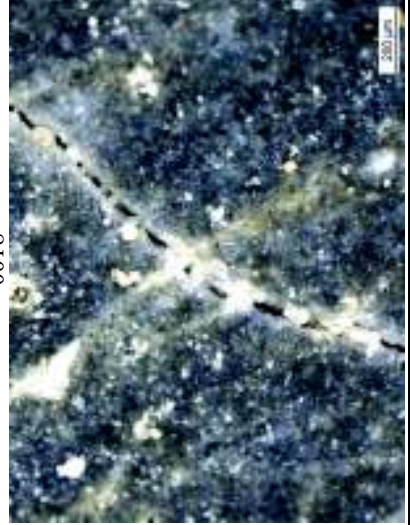
C4+C5+C6 SH1 - 0016



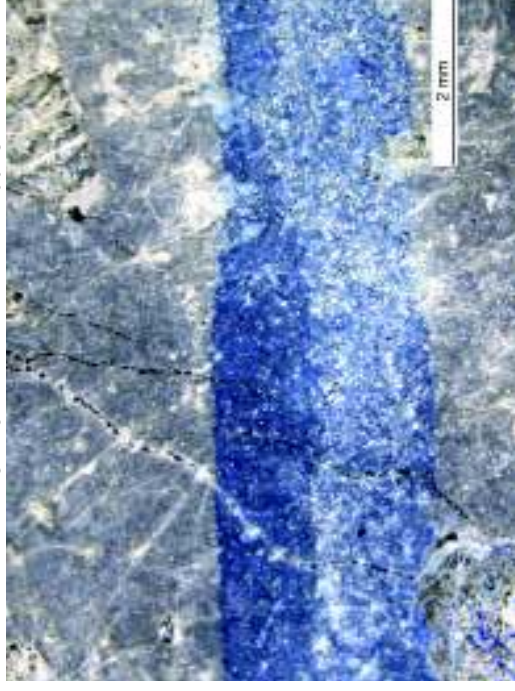
0017



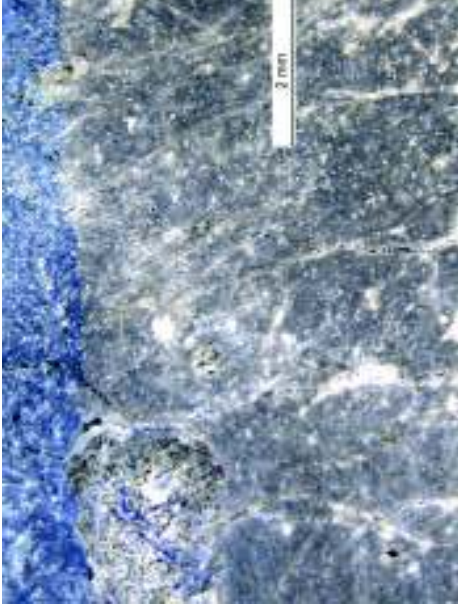
0018



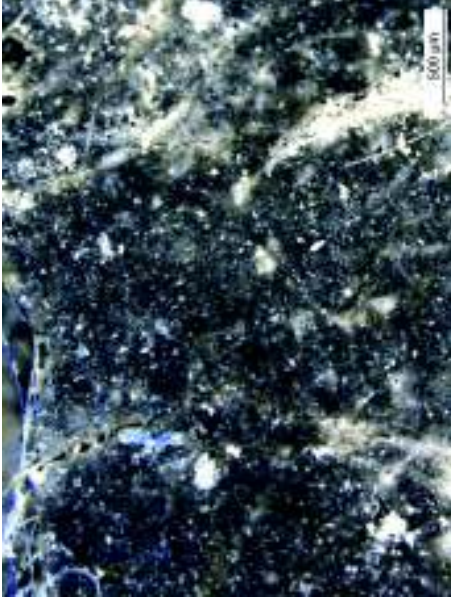
C4+C5+C6 SH2+ new cracks - 0018



Continuare
0020

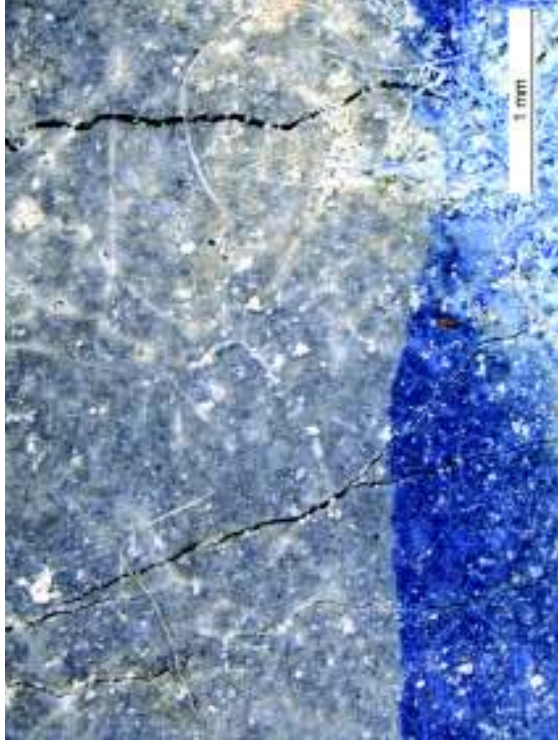


Continuare
0019



SH – Test 2

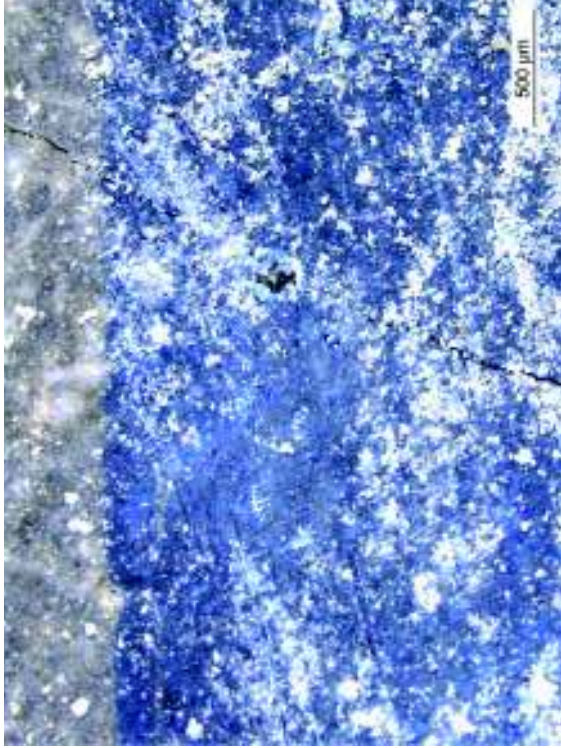
C SH 1+C SH 2+C SH 3+ ramificatii - 0001



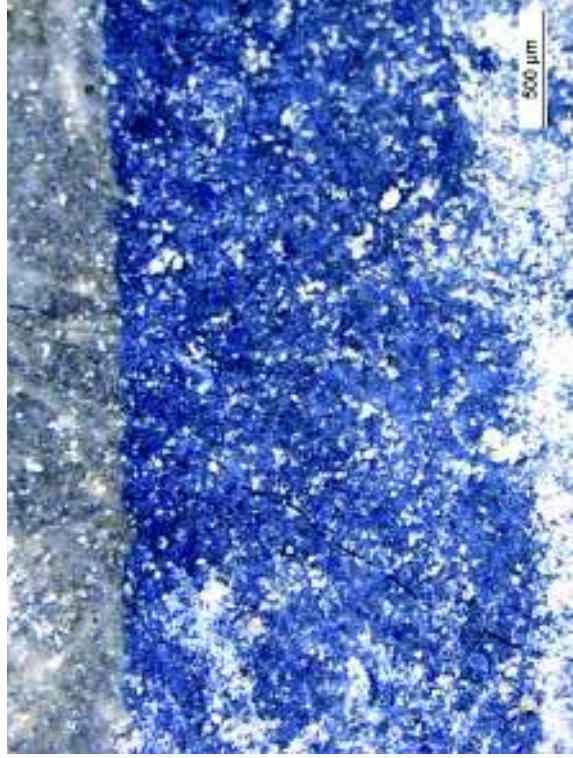
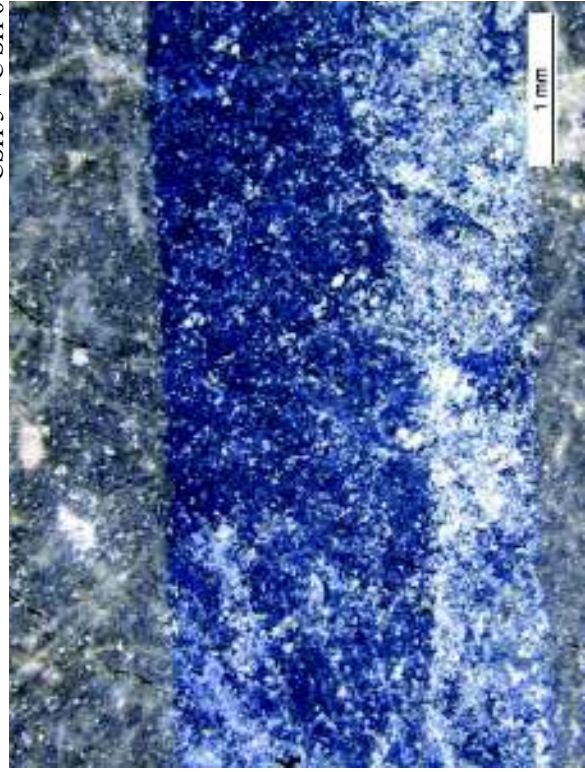
C SH 4 - 0007



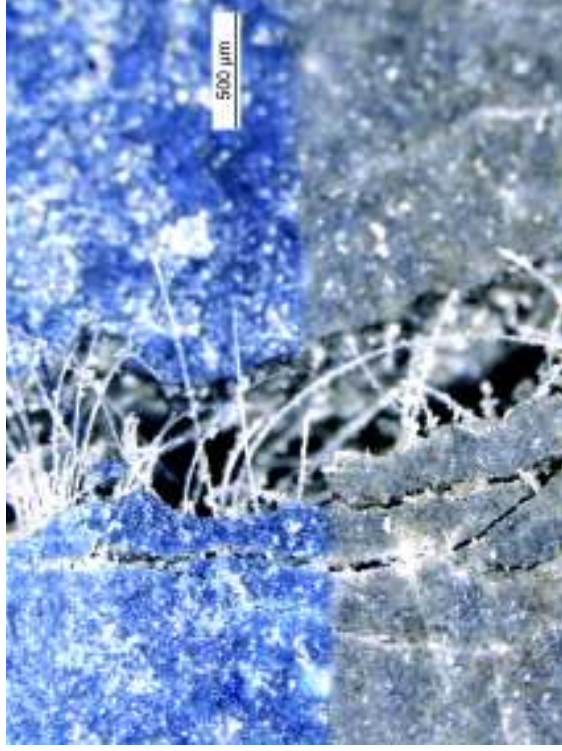
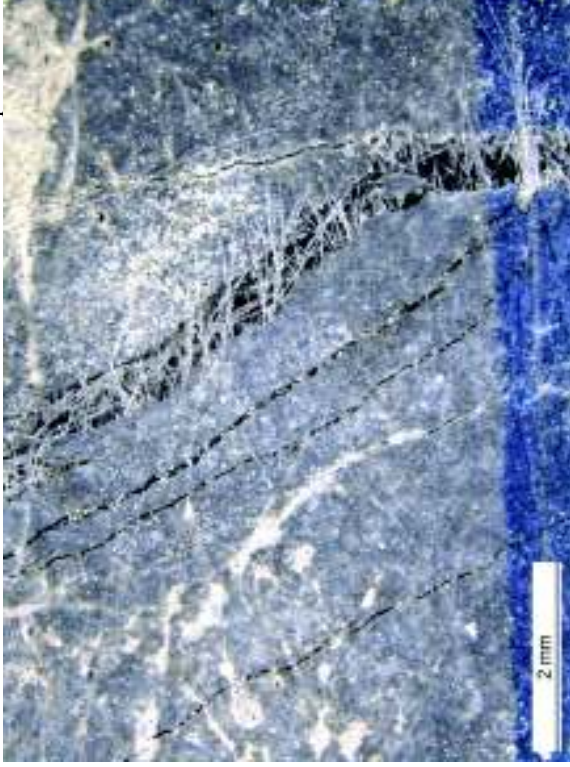
CSH 5 - 0008



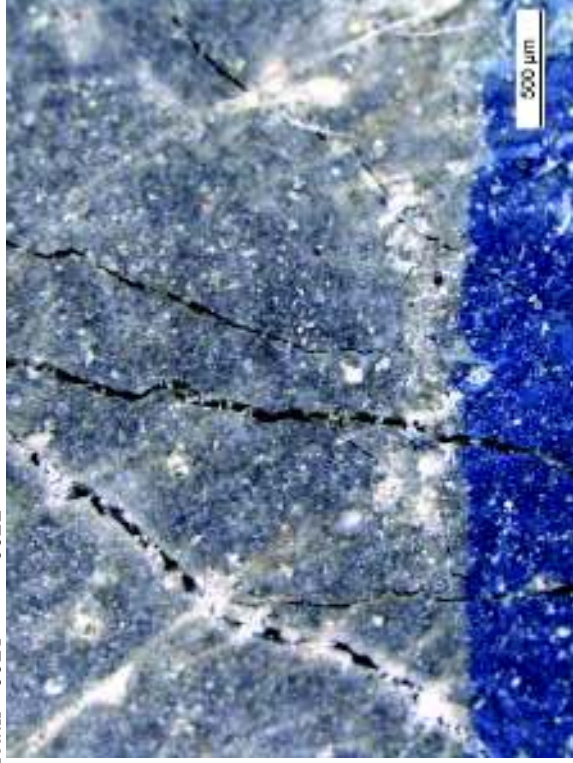
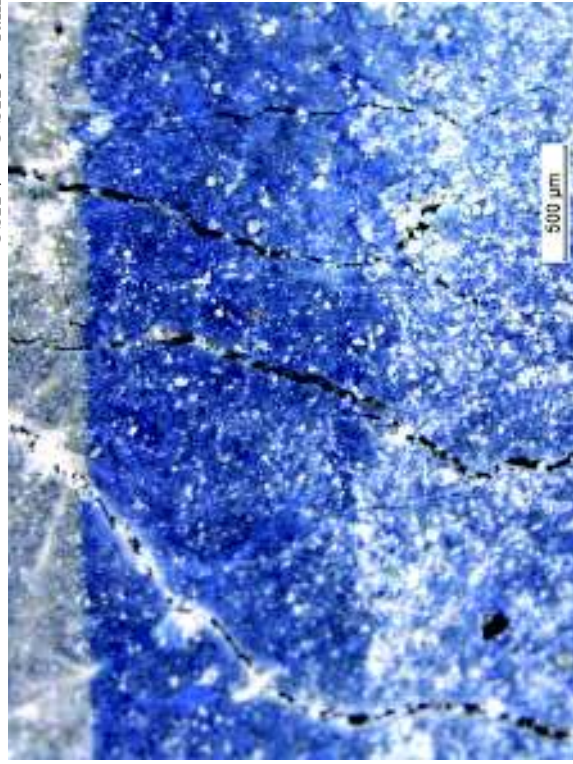
CSH 5 + CSH 6 - 0009 0010



Fisura rupere +Ramificatii - 0012; 0016



CSH 7 + C SH 8 + ramificatii - 0021 0022

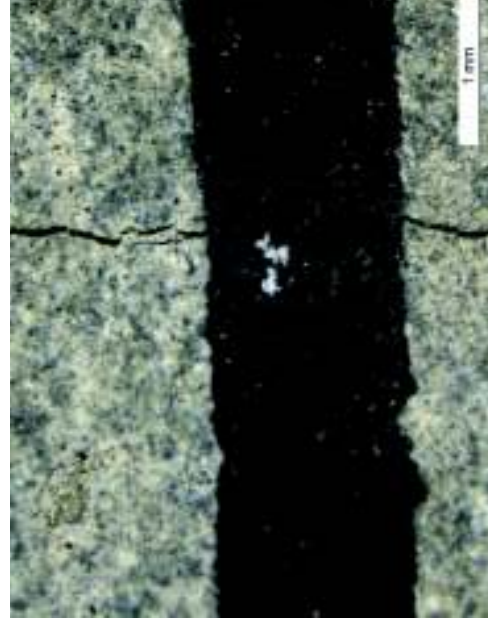


M 4.2 IV SH

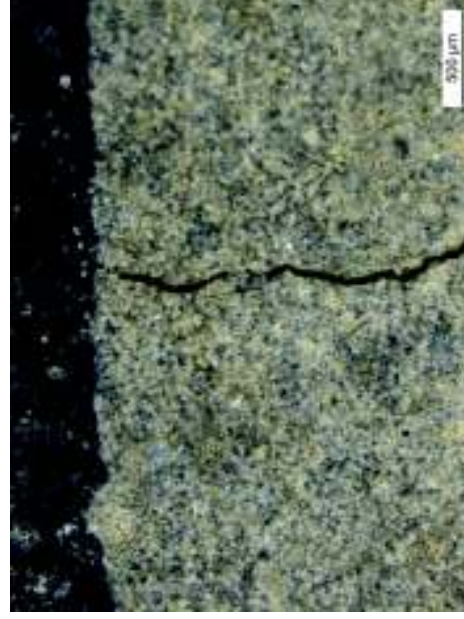
v = 1.5

Initial

CI -28-

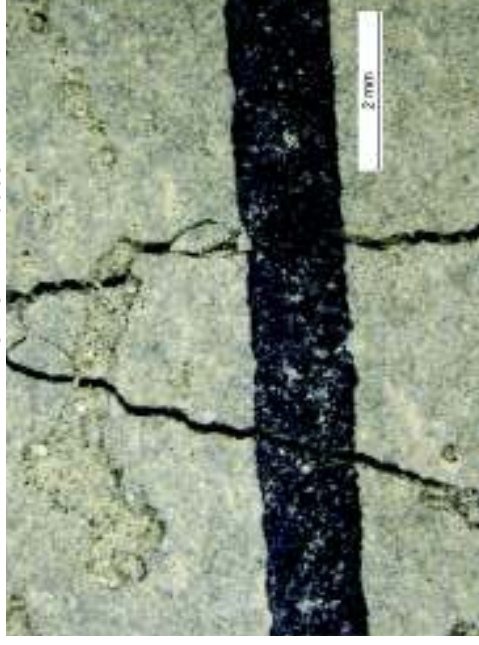


CI -28 SH -

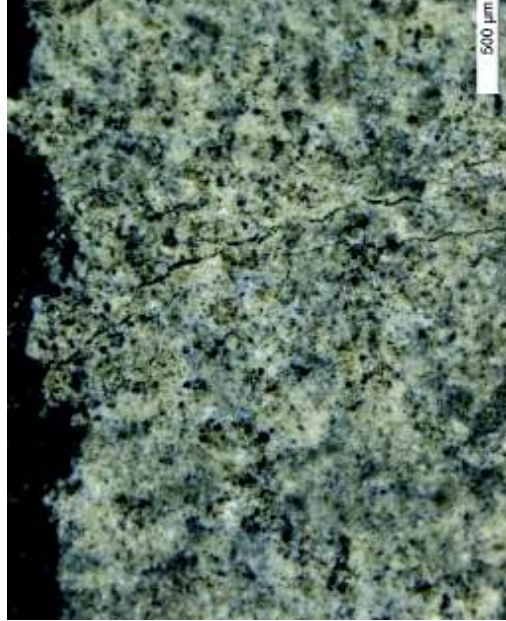


SH

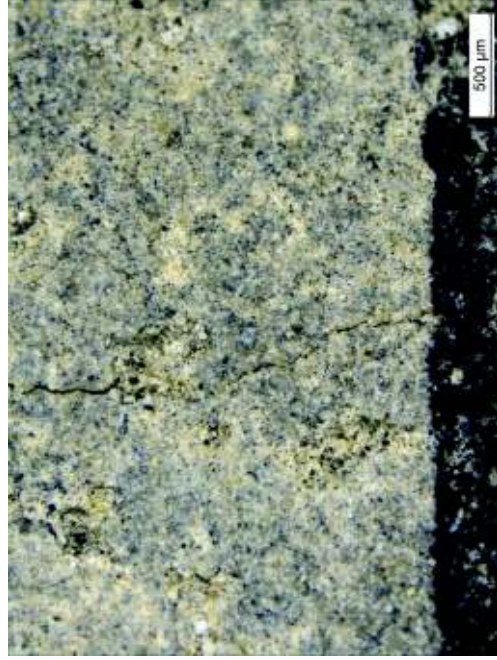
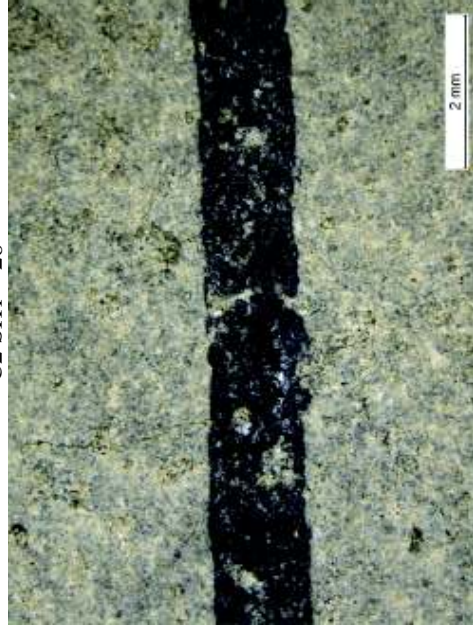
CI + C SH 8: 28 SH2 - 0008



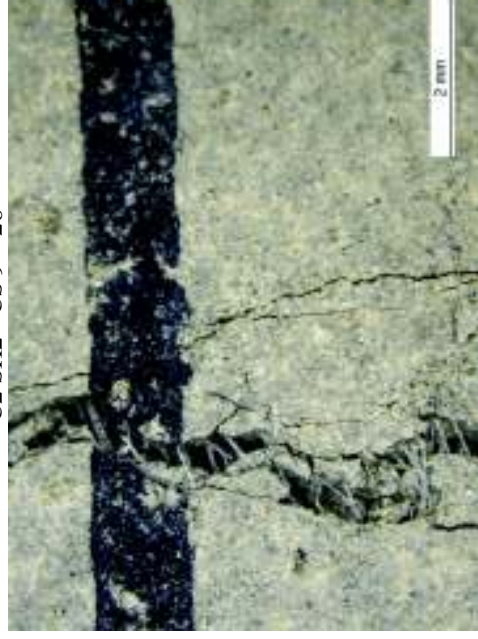
C2 - 28



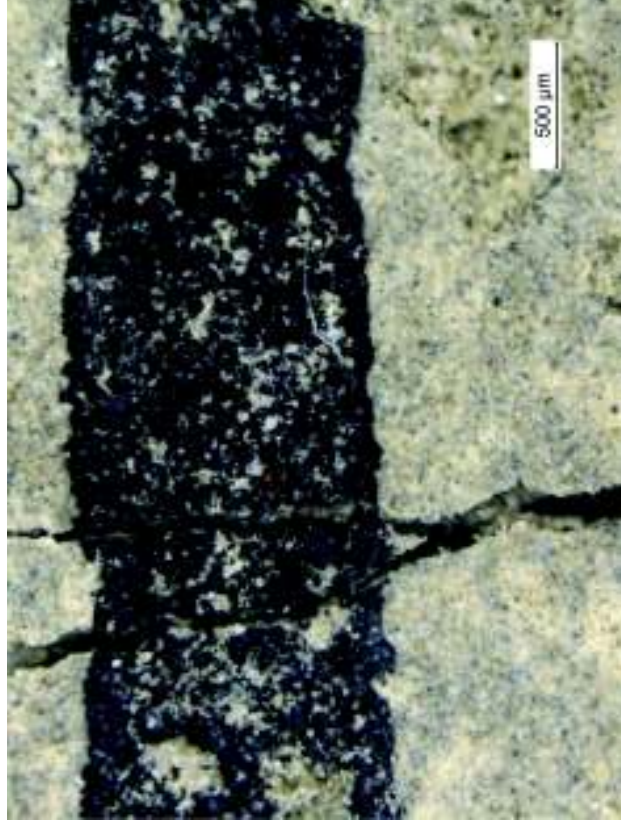
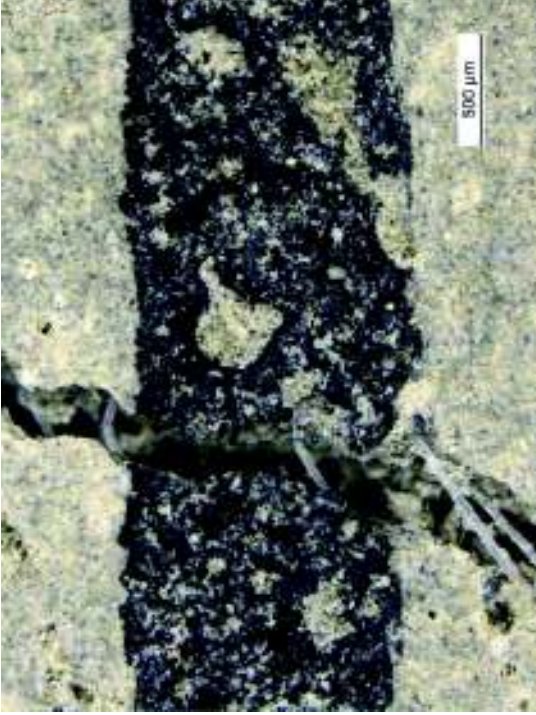
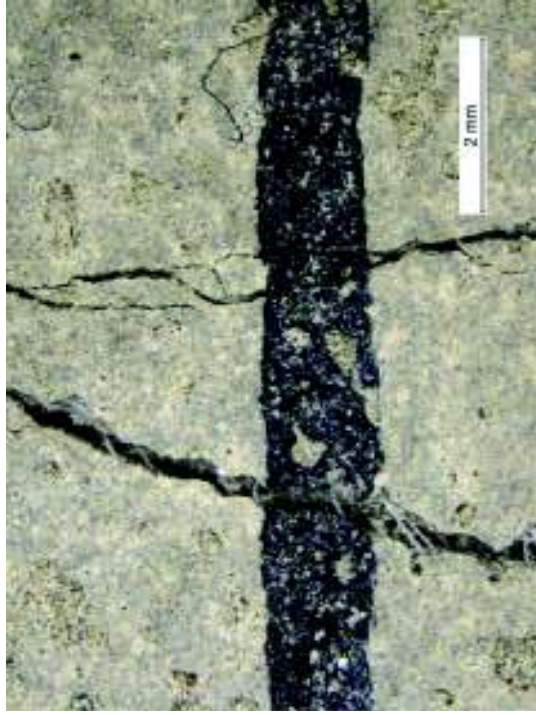
C2 SH1 - 28



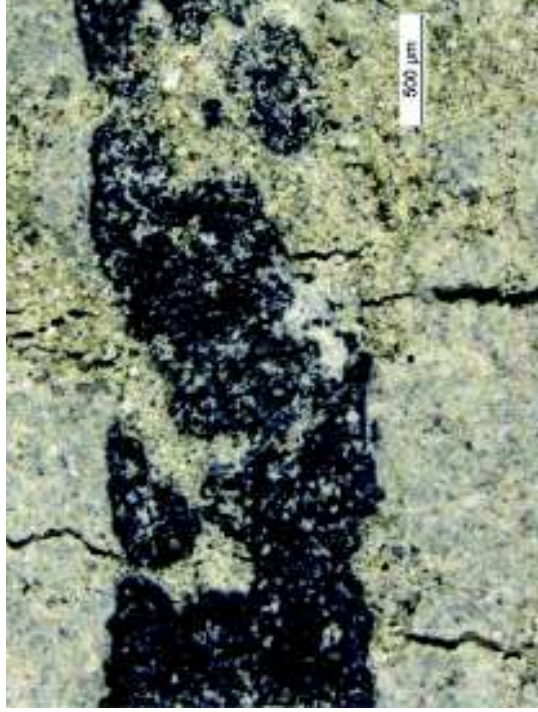
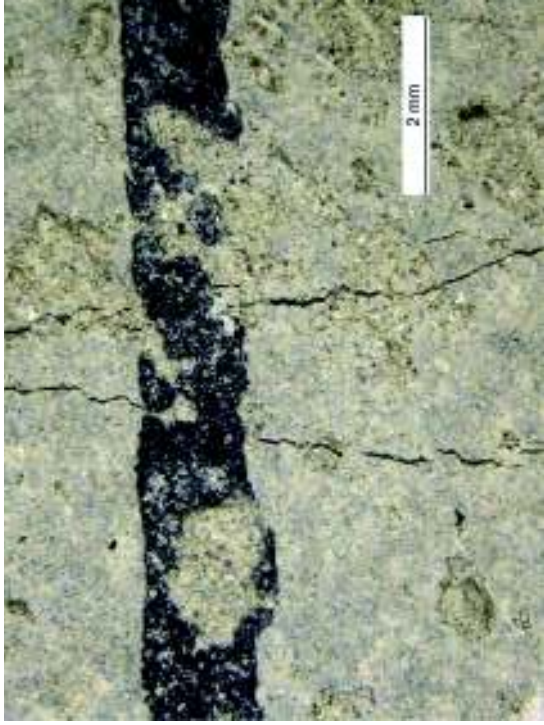
C2 SH2+CS 9 - 28



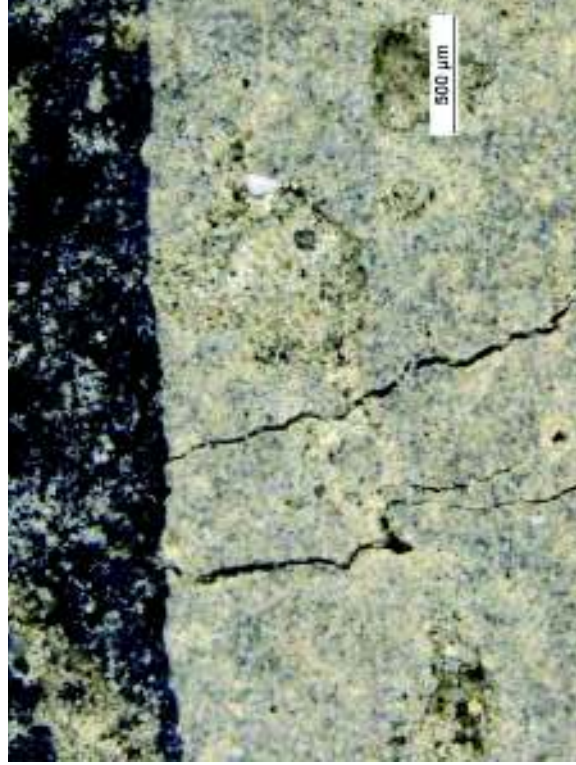
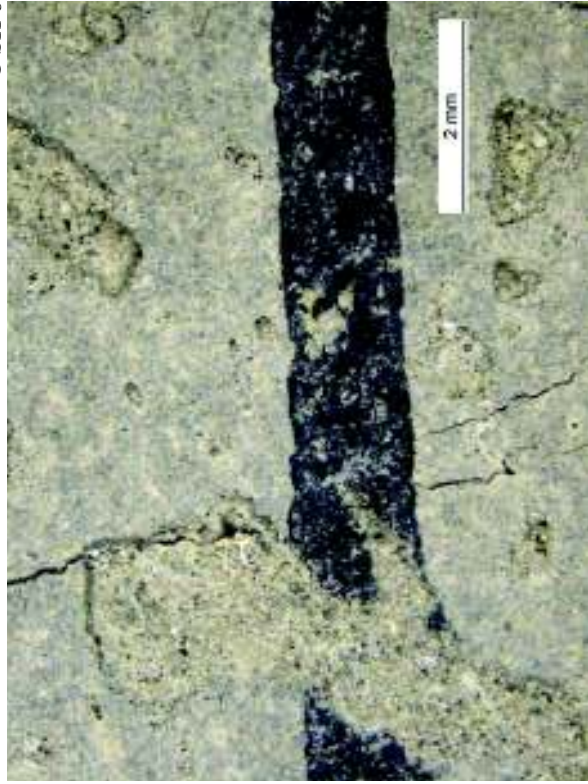
SH – Test 2
C SH 1+ C SH 2



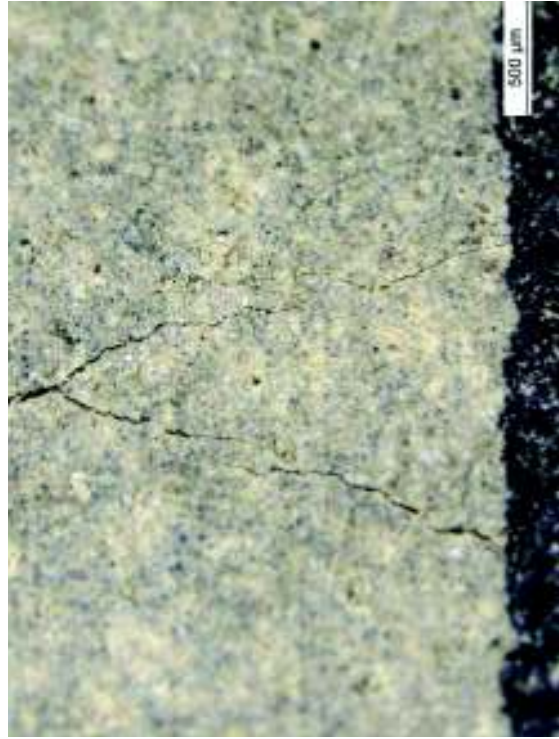
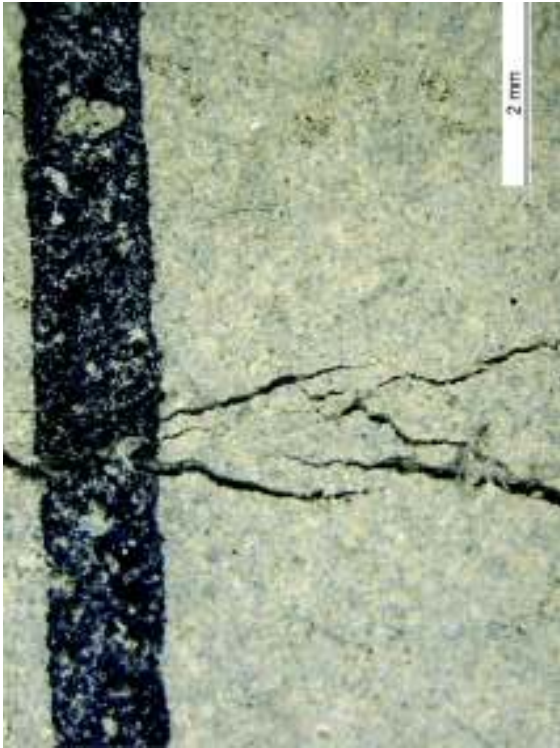
C SH 3+ C SH 4+ C SH 5



C SH 6+ C SH 7



CSH 10 – ramificatii



ANEXA 6.1– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 1.4 R

INITIAL

M 1.4 a – fața superioară

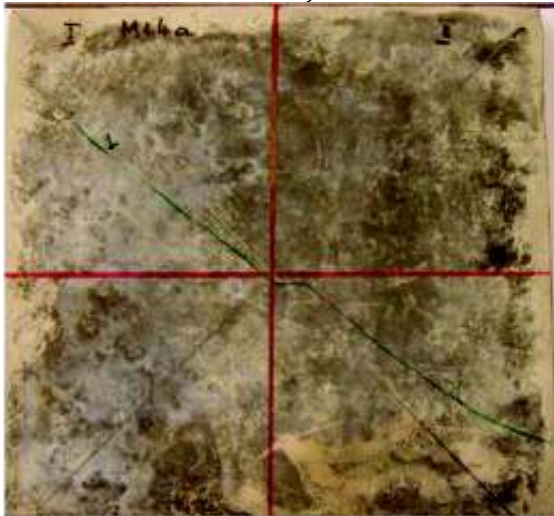


M 1.4 a – fața inferioară

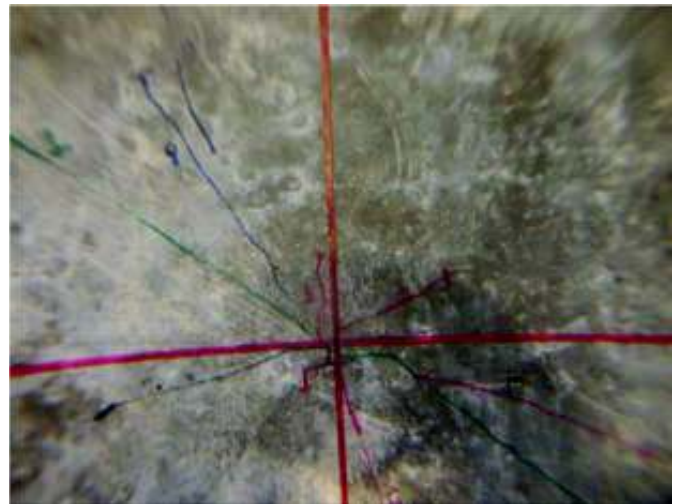


Ciclul I – 5 x 0.5m ($h_1 = 0.5$ m)

M 1.4 a – 1 x 0.5 m fața inferioară



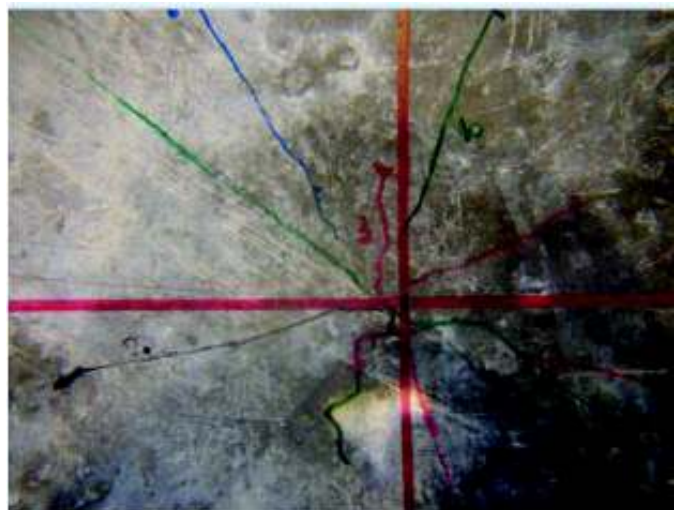
M 1.4 a – 4 x 0.5 m fața inferioară



M 1.4 a – 5 x 0.5 m fața inferioară

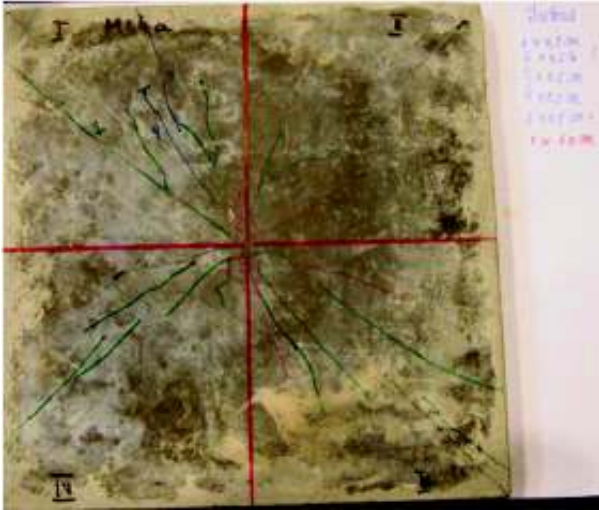


M 1.4 a – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)

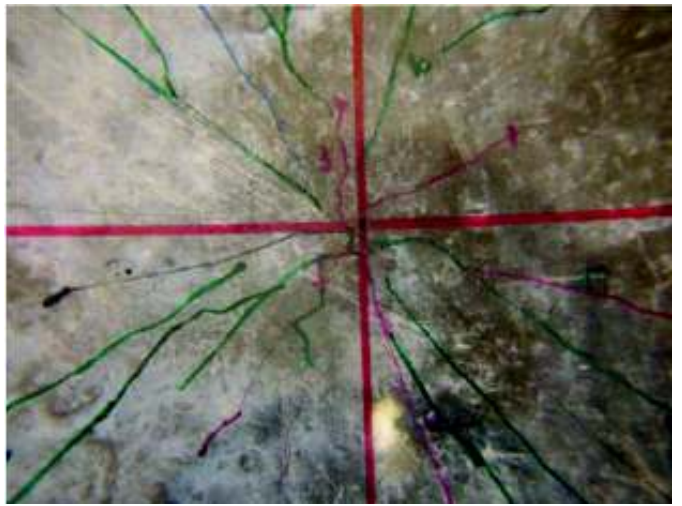


Ciclul II – 5 x 1.0m ($h_1 = 1.0$ m)

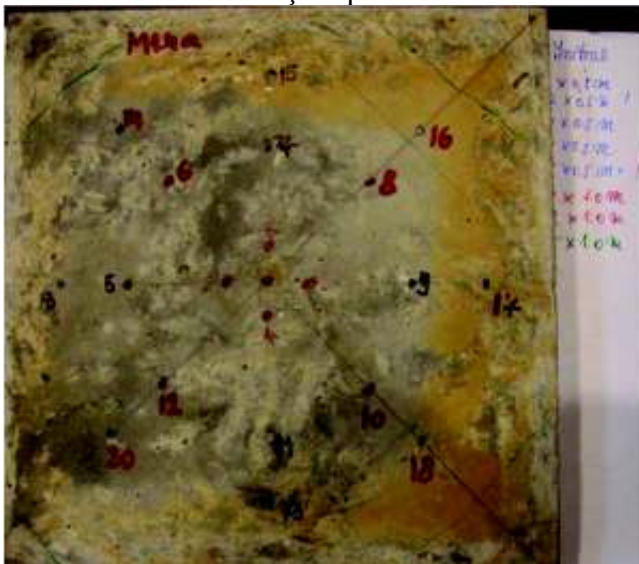
M 1.4 a – 1 x 1.0 m fața inferioară



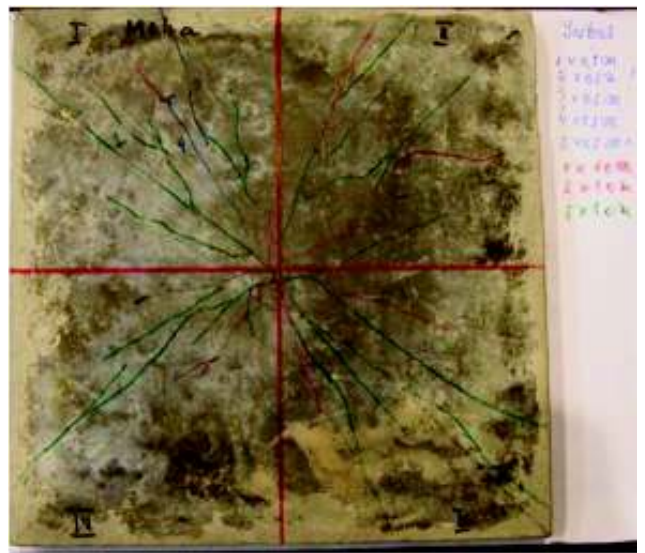
M 1.4 a – 2 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)



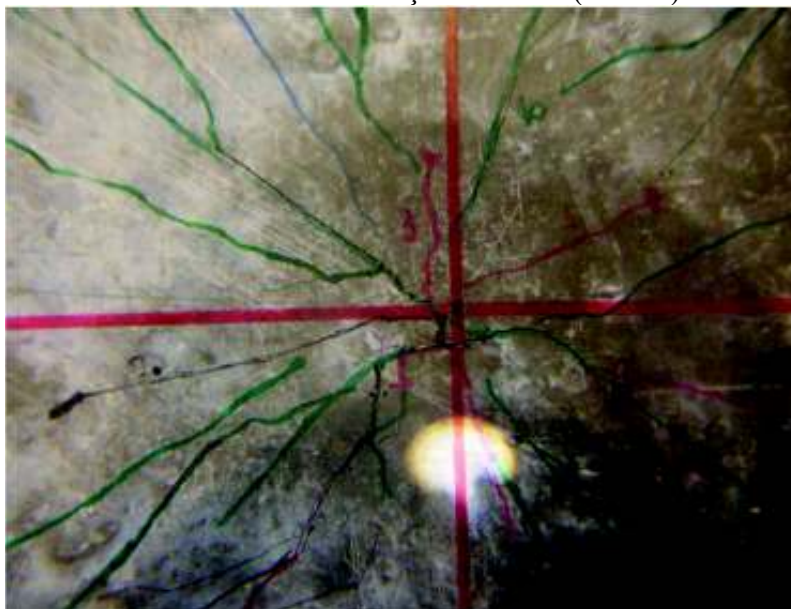
M 1.4 a – 5 x 1.0 m fața superioară



M 1.4 a – 5 x 1.0 m fața inferioară

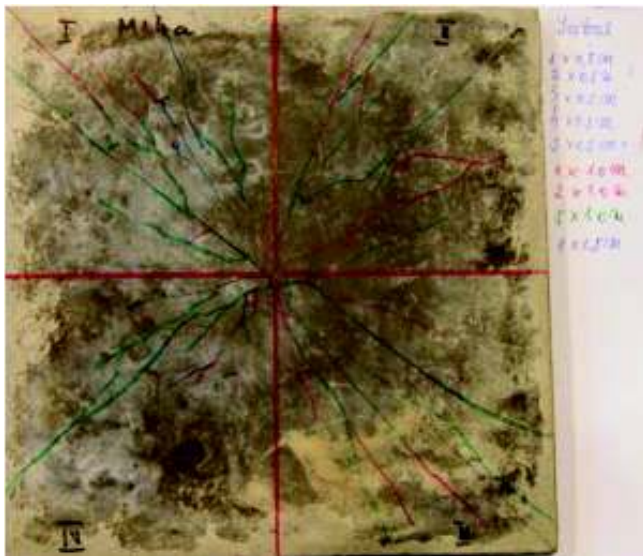


M 1.4 a – 5 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)

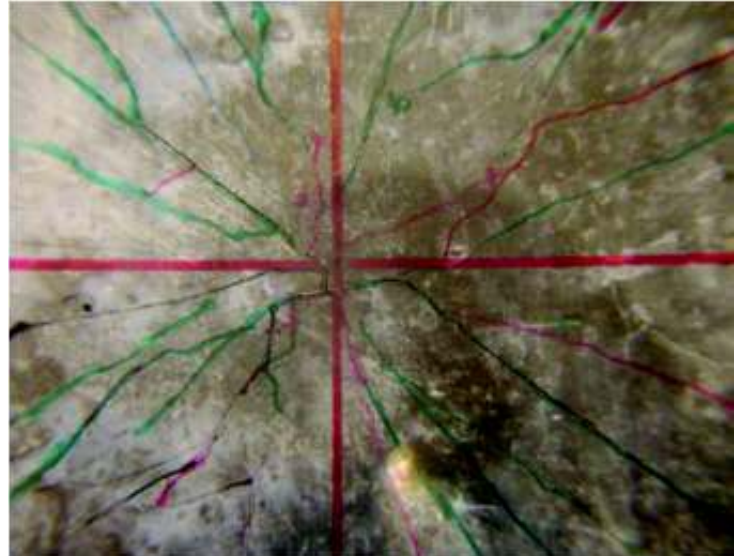


Ciclul III – 5 x 1.5m ($h_1 = 1.5$ m)

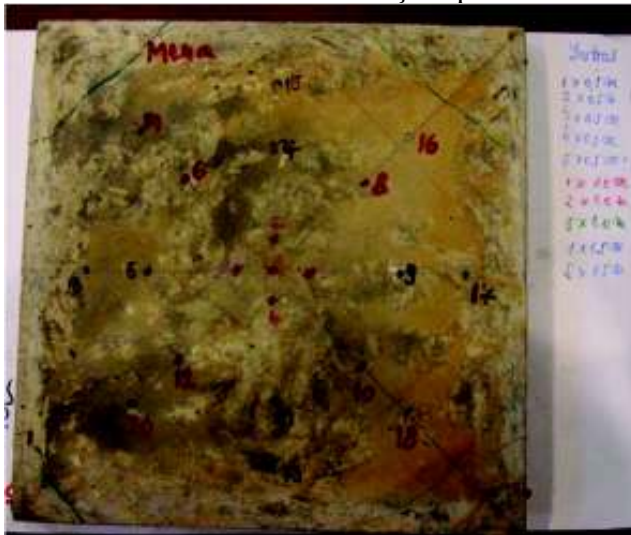
M 1.4 a – 1 x 1.5 m fața inferioară



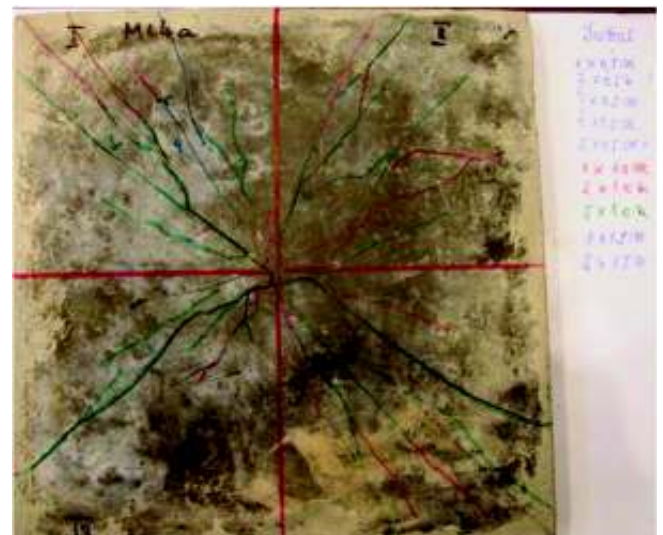
M 1.4 a – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



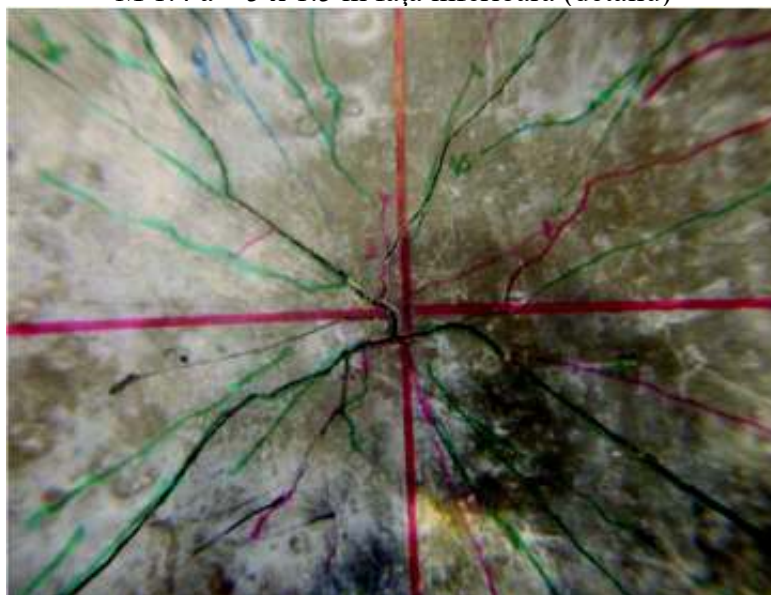
M 1.4 a – 5 x 1.5 m Fața superioară



M 1.4 a – 5 x 1.5 m bottom

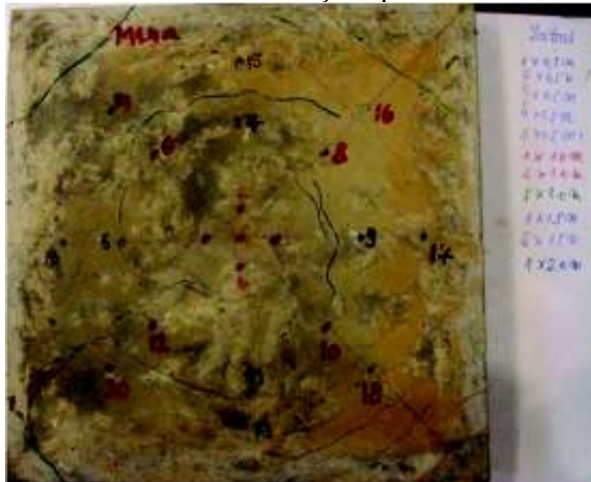


M 1.4 a – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)

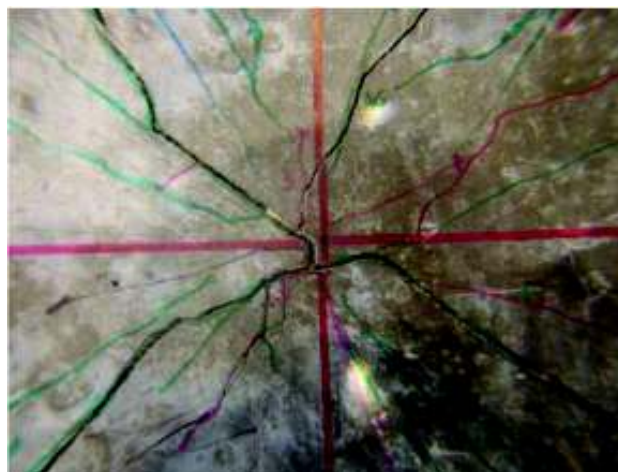


Ciclul IV – 2 x 2.0m ($h_1 = 2.0$ m)

M 1.4 a – 1 x 2.0 m fața superioară

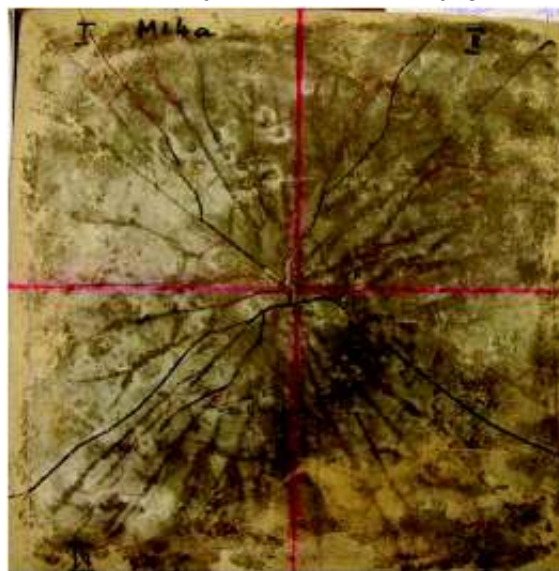


M 1.4 a – 1 x 2.0 m fața inferioară (detaliu)



M 1.4 a – 1 x 2.0 m fața inferioară (detaliu)

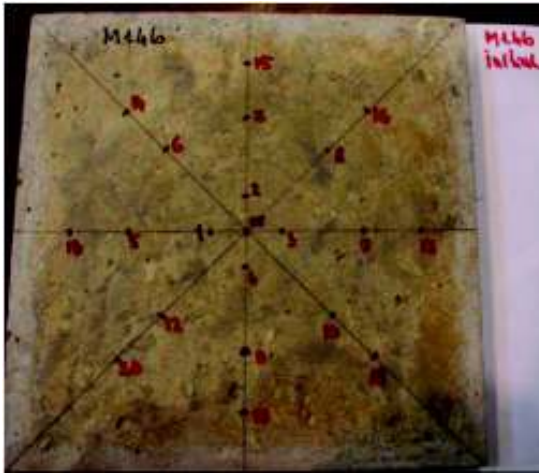
M 1.4 a – 1 x 2.0 m - Noiembrie 2015



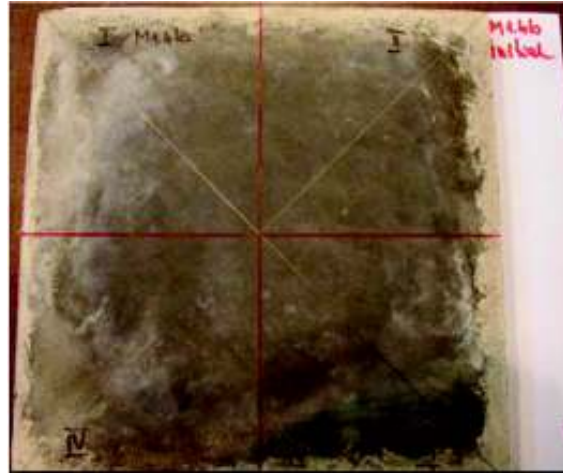
ANEXA 6.2– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 1.4 SH

INIȚIAL

M 1.4 b – fața superioară

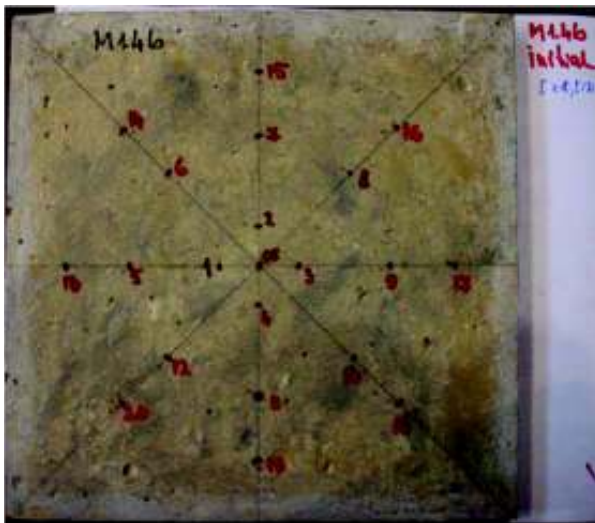


M 1.4 b – fața inferioară

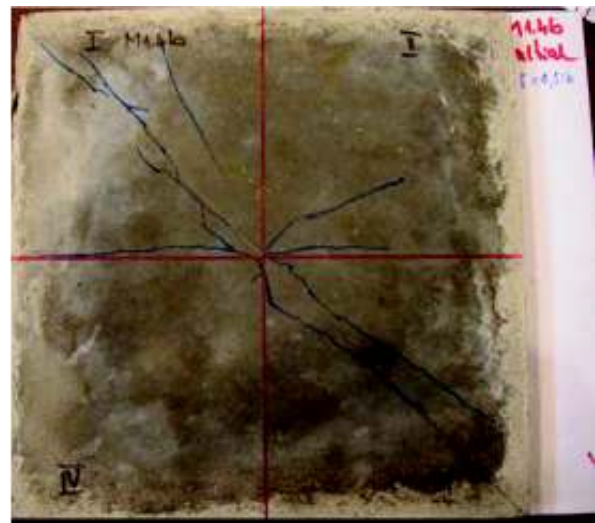


Ciclul I* – 5 x 0.5m

M 1.4 b – 5 x 0.5 m fața superioară

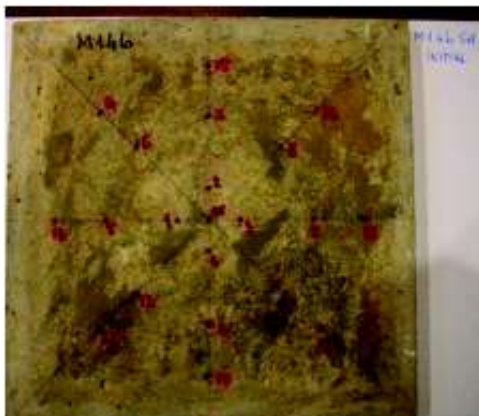


M 1.4 b – 5 x 0.5 m fața inferioară

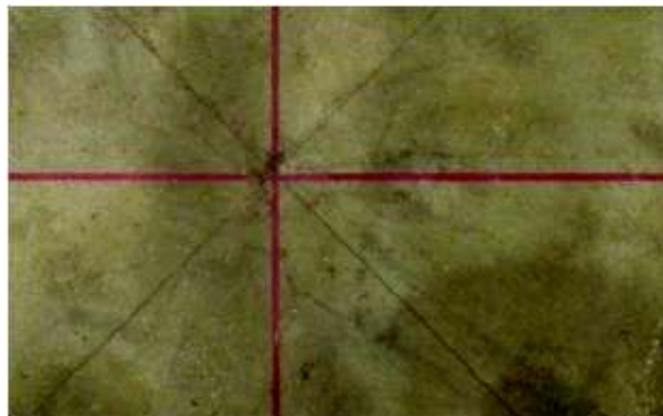


După condiționarea SH - INIȚIAL

M 1.4 b –SH, fața superioară

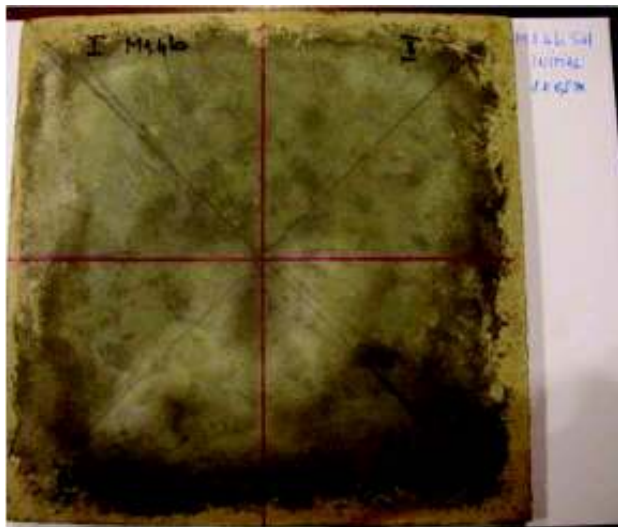


M 1.4 b –SH, fața inferioară (detaliu)



RETESTARE – Ciclu I – 5 x 0.5m

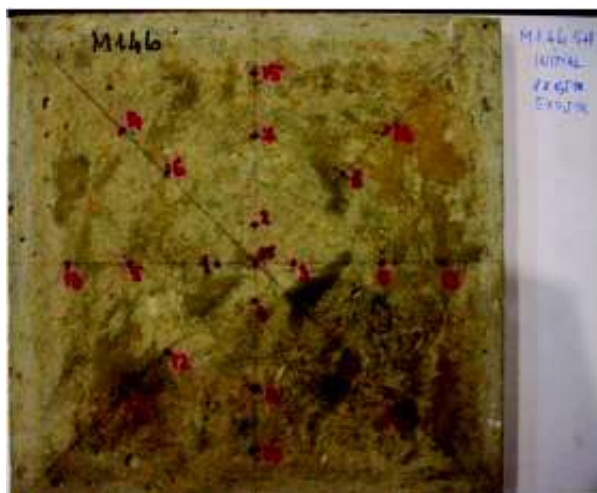
M 1.4 b – 1 x 0.5 m fața inferioară



M 1.4 b – 1 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)



M 1.4 b – 5 x 0.5 m fața superioară

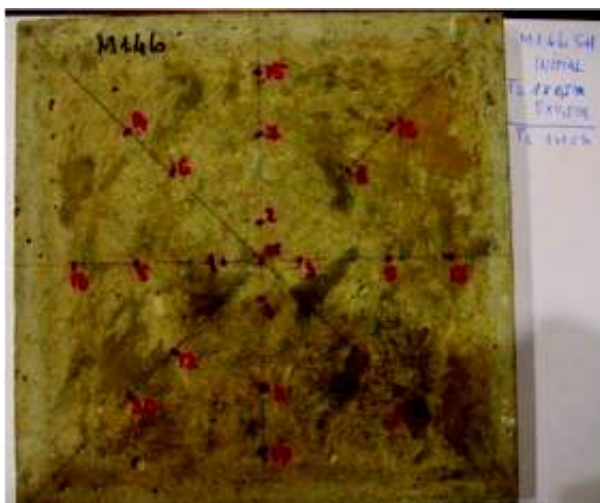


M 1.4 b – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)

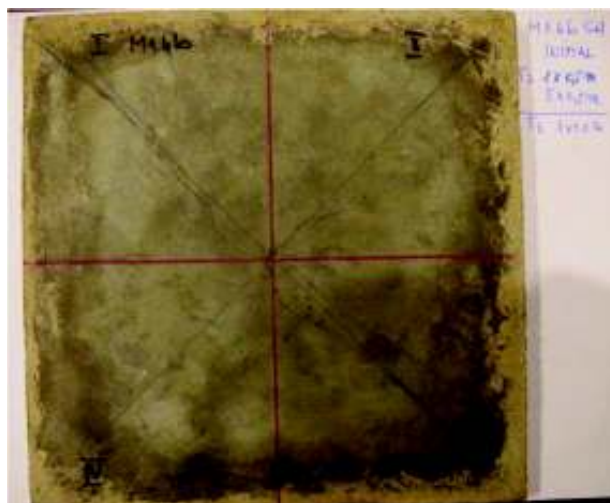


Ciclu II – 5 x 1.0m

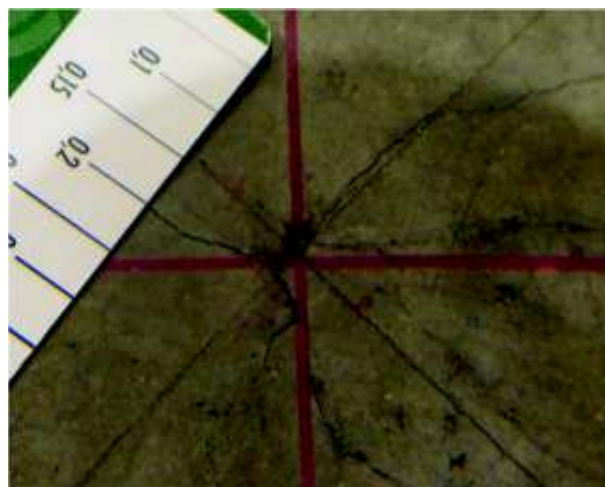
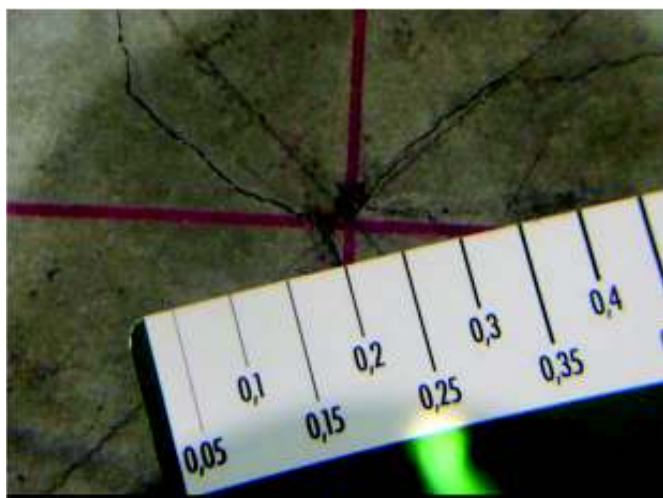
M 1.4 b – 1 x 1.0 m fața superioară



M 1.4 b – 1 x 1.0 m fața inferioară

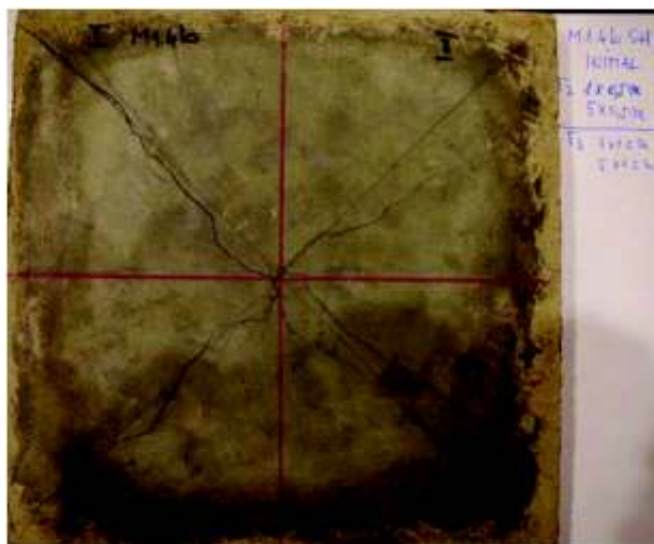
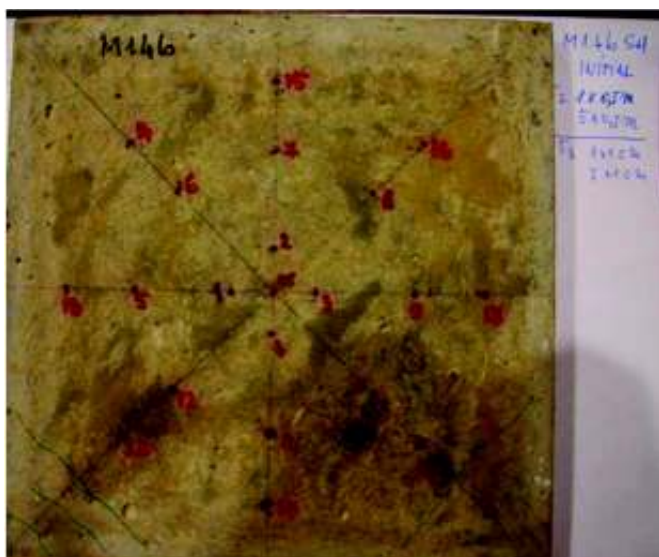


M 1.4 b – 1 x 1.0 m fața inferioară (detaliu) M 1.4 b – 1 x 1.0 m SH fața inferioară (detaliu)



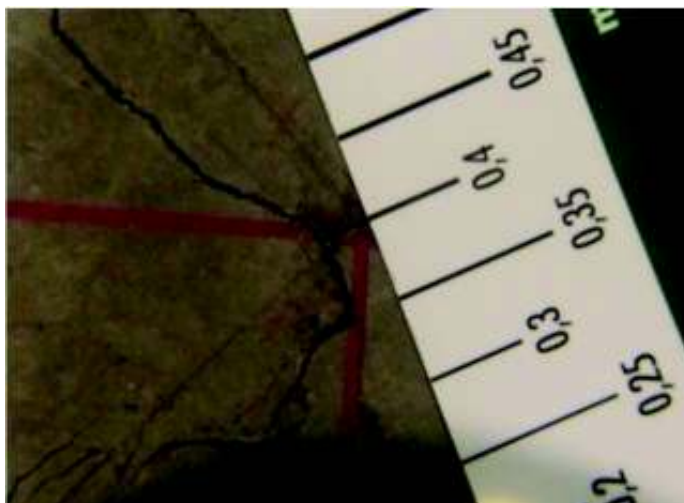
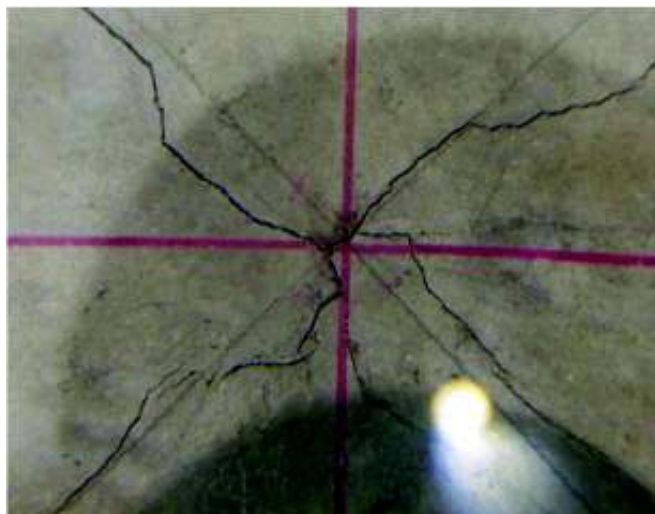
M 1.4 b – 5 x 1.0 m fața superioară

M 1.4 b – 5 x 1.0 m fața inferioară



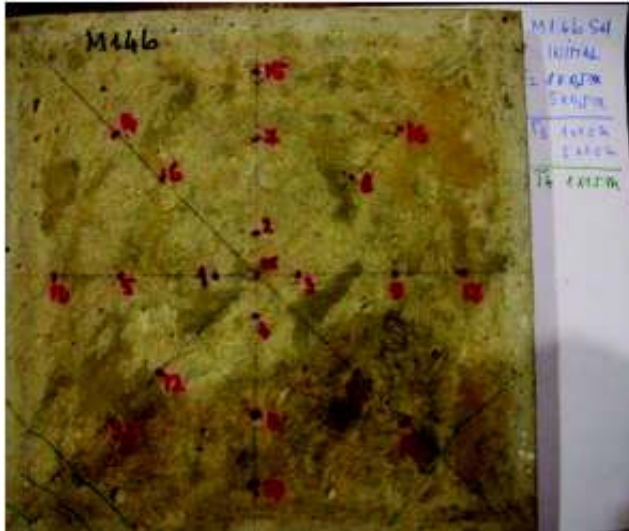
M 1.4 b – 5 x 1.0m fața inferioară detaliu)

M 1.4 b – 5 x 1.0m fața inferioară detaliu)

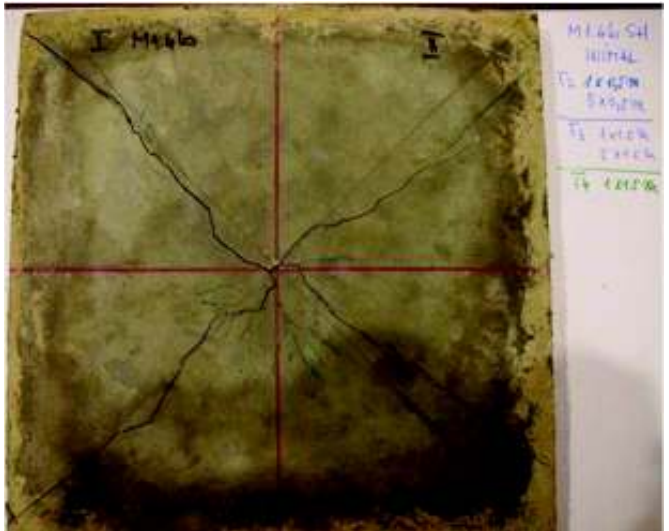


Ciclul III – 5 x 1.5 m

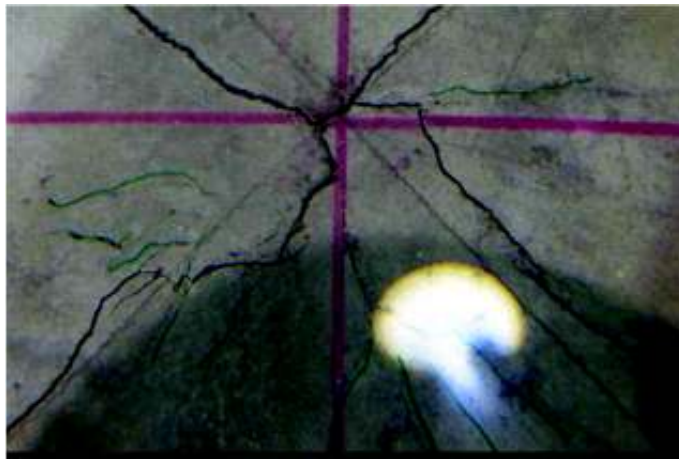
M 1.4 b – 1 x 1.5 m fața inferioară



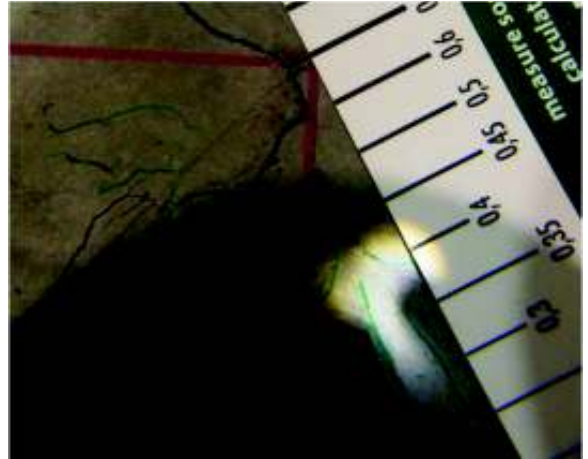
M 1.4 a – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



M 1.4 b – 1 x 1.5 m, fața inferioară detaliu)



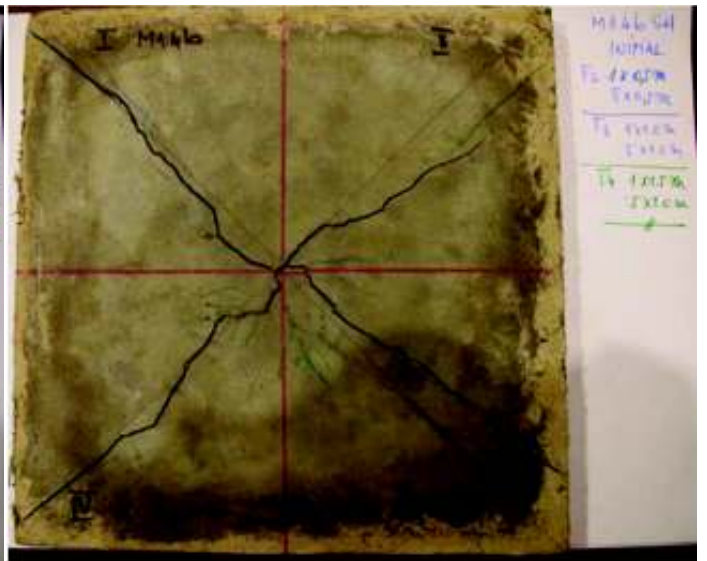
M 1.4 b – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



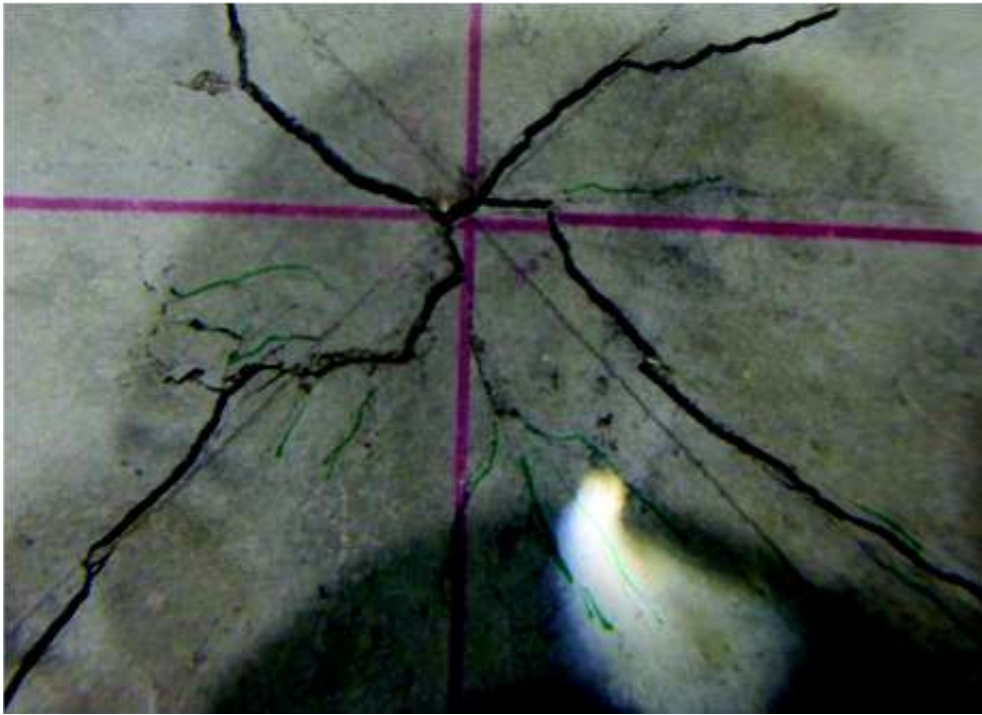
M 1.4 b – 5 x 1.5 m, fața superioară



M 1.4 b – 5 x 1.5 m, fața inferioară



M 1.4 b – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



M 1.4 b – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



ANEXA 6.3– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 2.2 R

INIȚIAL

M 2.2 b – fața superioară

M 2.2 b – fața inferioară

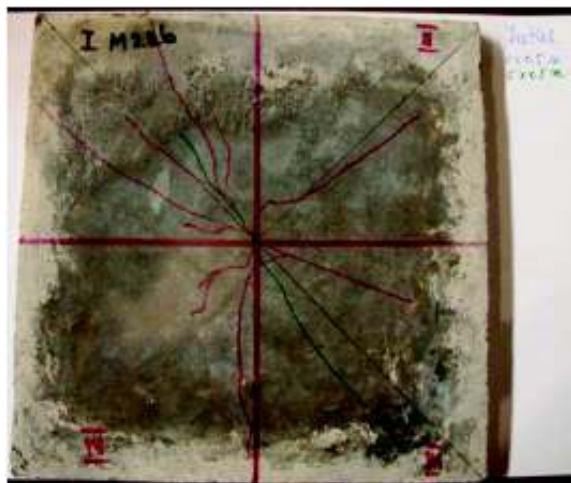


Ciclul I – 5 x 0.5m ($h_1 = 0.5$ m)

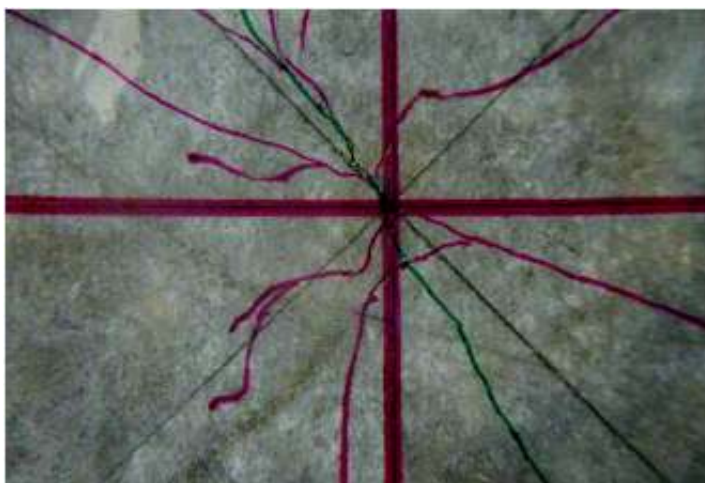
M 2.2 b – 1 x 0.5 m fața inferioară



M 2.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară

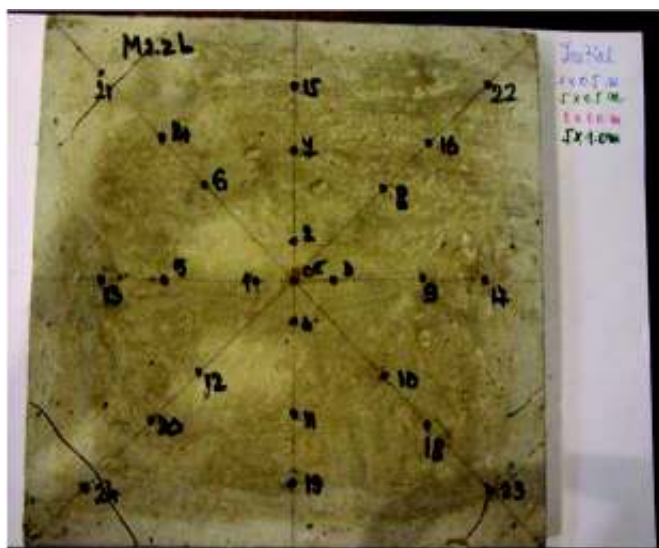


M 2.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)

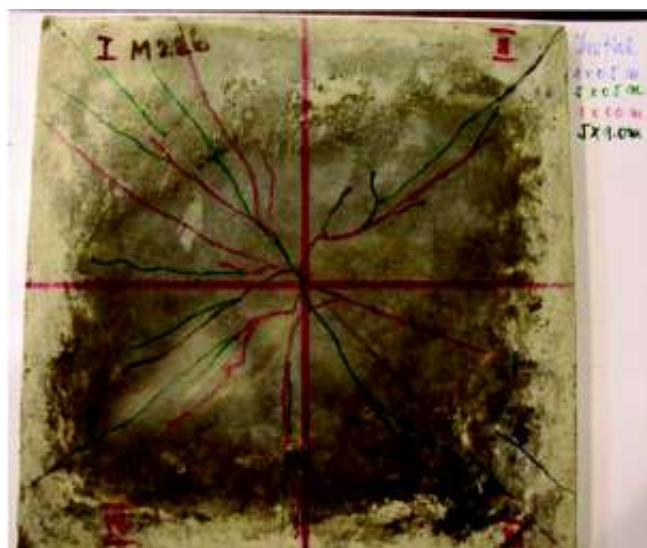


Ciclul II – 5 x 1.0 m ($h_1 = 1.0$ m)

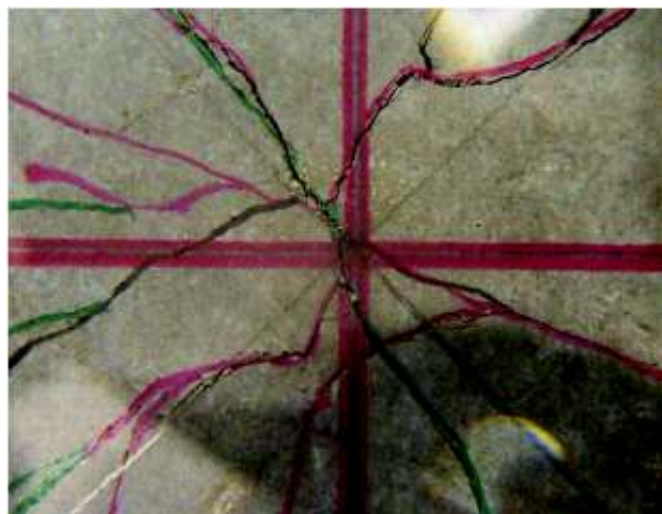
M 2.2 b – 5 x 1.0 m fața superioară



M 2.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară



M 2.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)

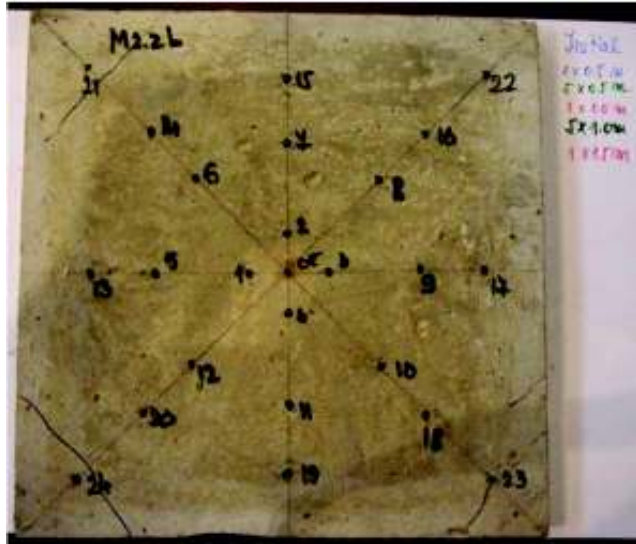


M 2.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)

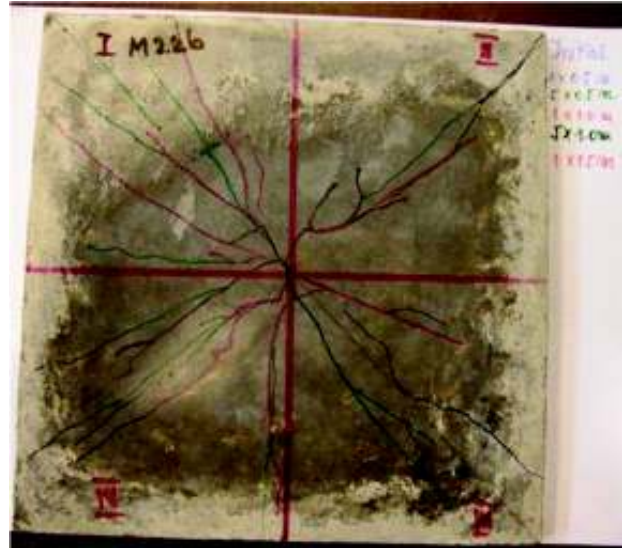


Ciclul III – 5 x 1.5m ($h_1 = 1.5$ m)

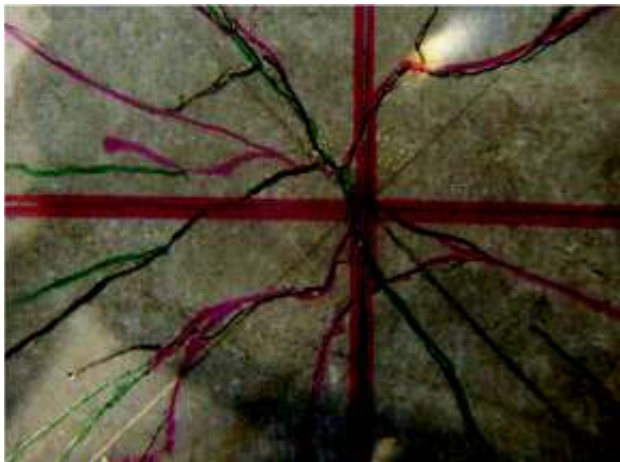
M 2.2 b – 1 x 1.5 m fața superioară



M 2.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară



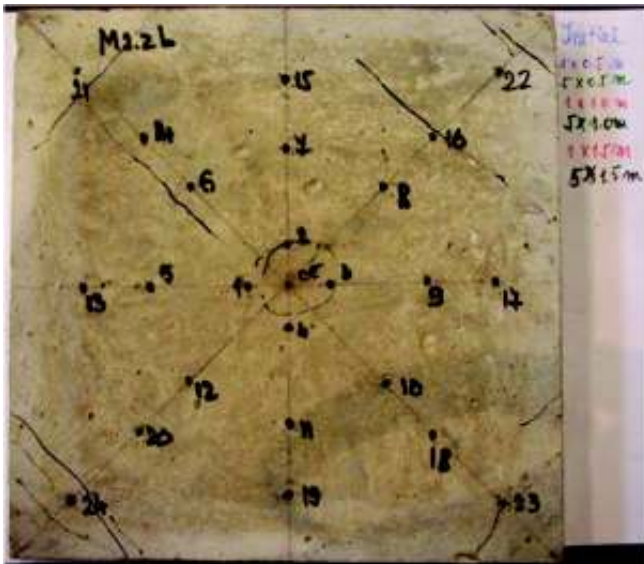
M 2.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



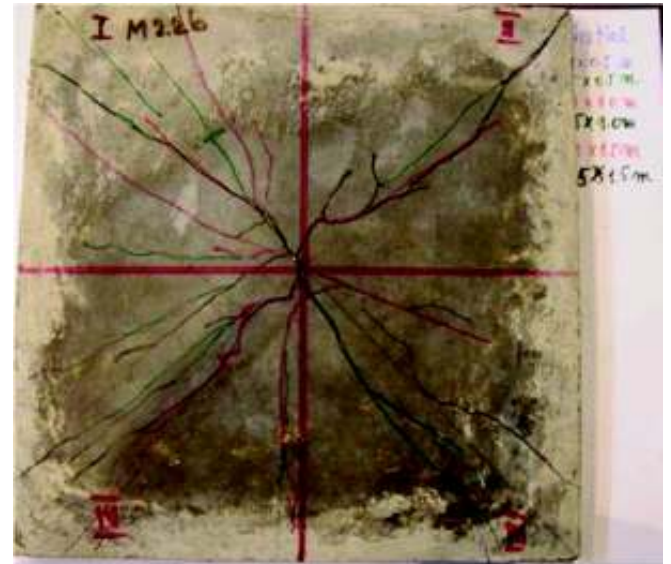
M 2.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



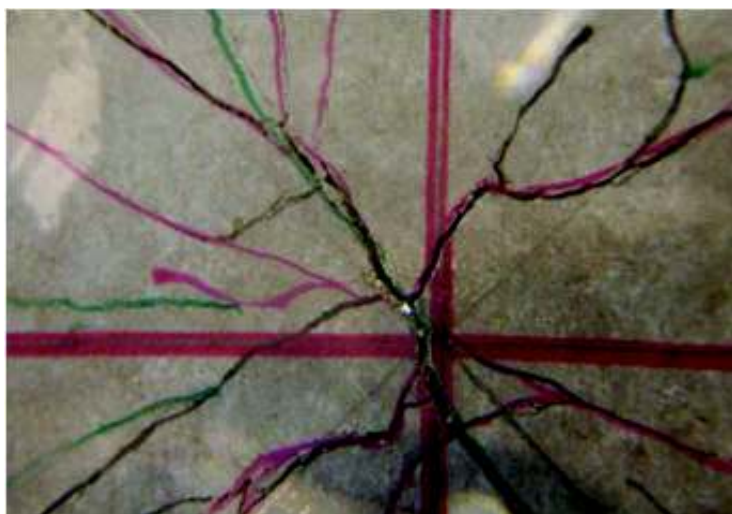
M 2.2 b – 5 x 1.5 m fața superioară



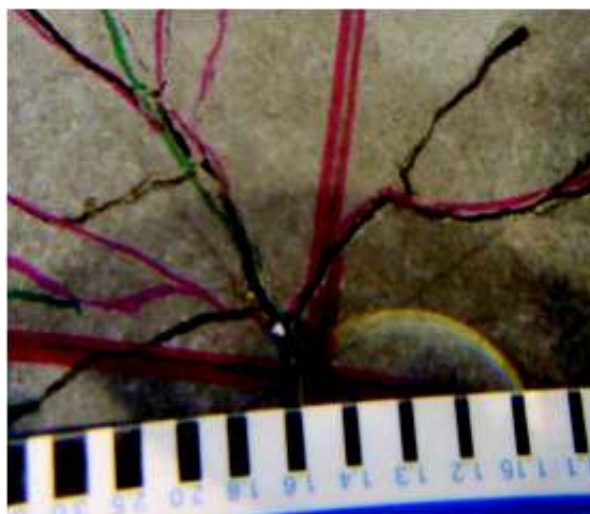
M 2.2 b – 5 x 1.5 m fața inferioară



M 2.2 b – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)

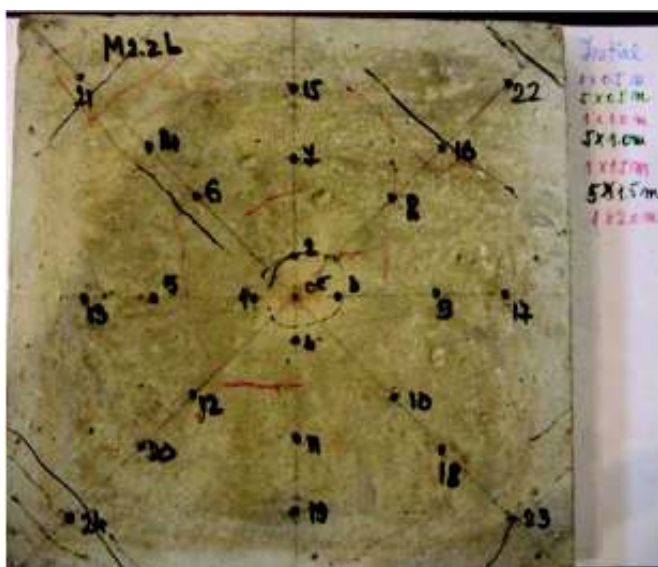


M 2.2 b – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)

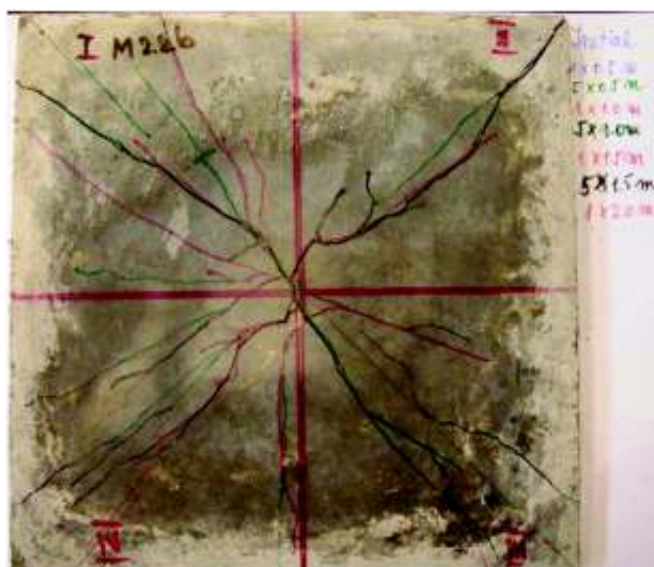


Ciclul IV – 1 x 2.0 m ($h_1 = 2.0$ m)

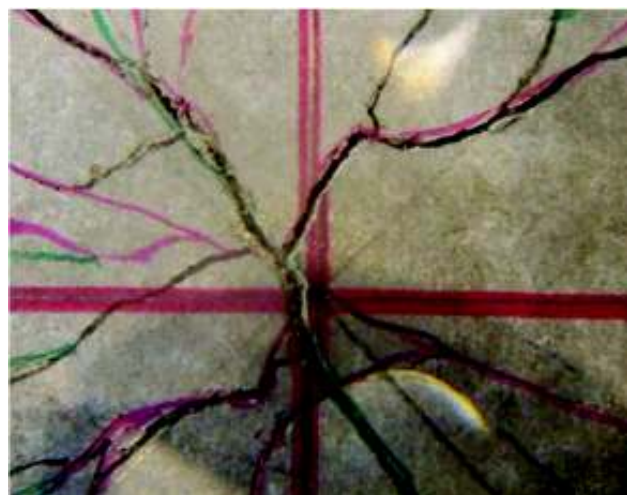
M 2.2 b – 1 x 2.0 m fața superioară



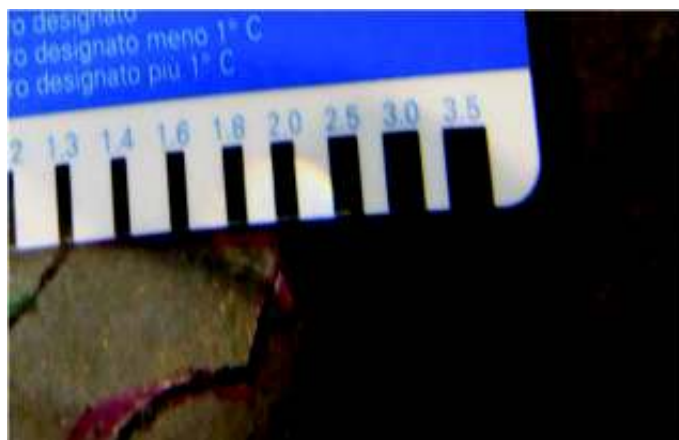
M 2.2 b – 1 x 2.0 m fața inferioară (detaliu)



M 2.2 b – 1 x 2.0 m fața inferioară (detaliu)



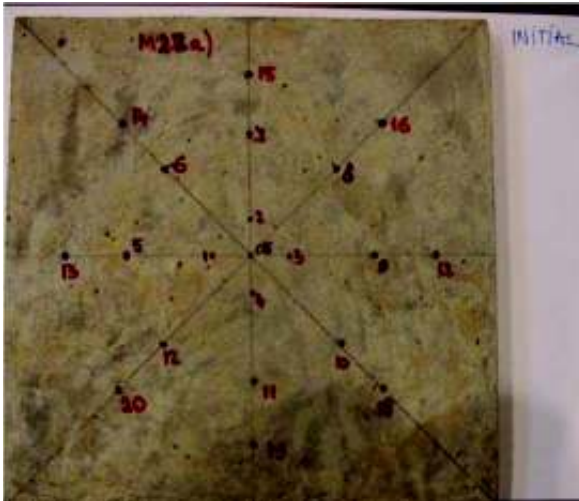
M 2.2 a – 1 x 2.0 m - fața inferioară (detaliu)



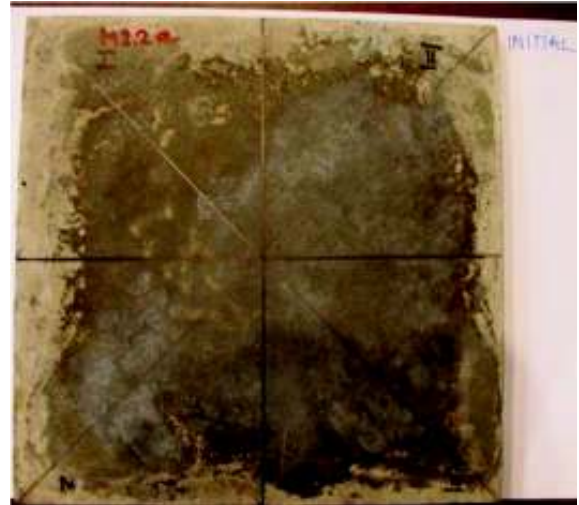
ANEXA 6.4– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 2.2 SH

INIȚIAL

M 2.2 a – fața superioară

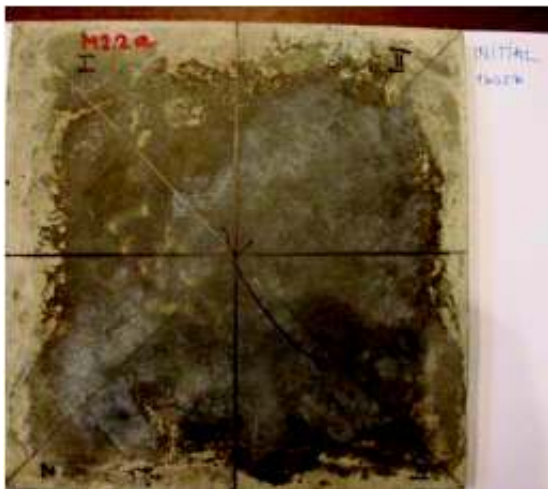


M 2.2 a – fața inferioară



Ciclul I* – 5 x 0.5m

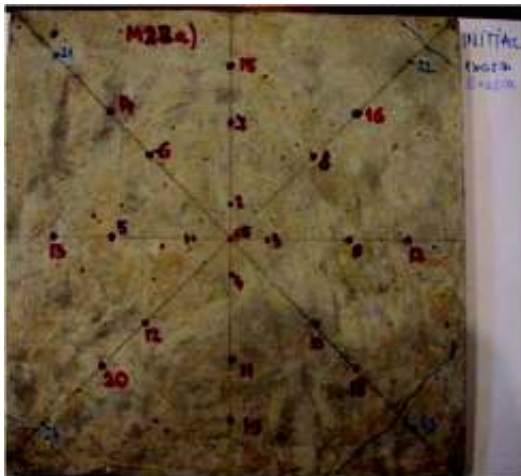
M 2.2 a – 1 x 0.5 m fața inferioară



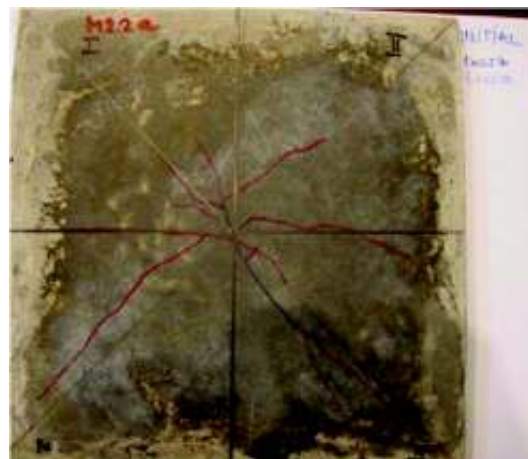
M 2.2 a – 1 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)



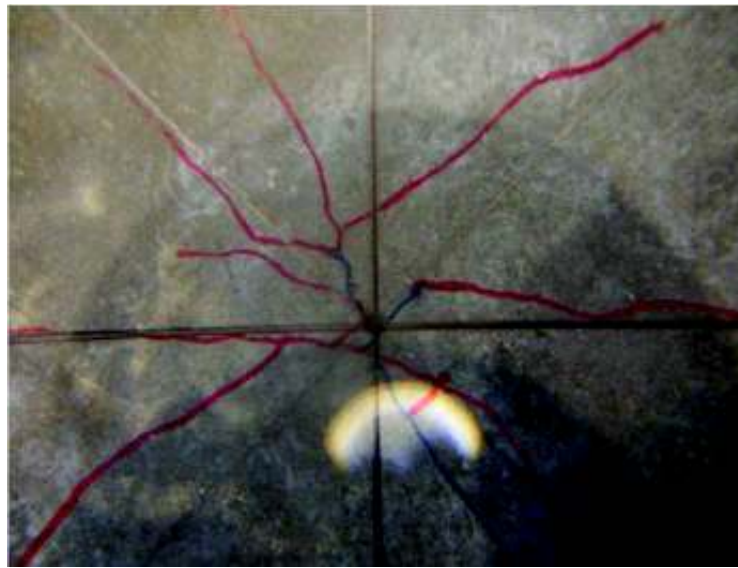
M 2.2 a – 5 x 0.5 m fața superioară



M 2.2 a – 5 x 0.5 m fața inferioară

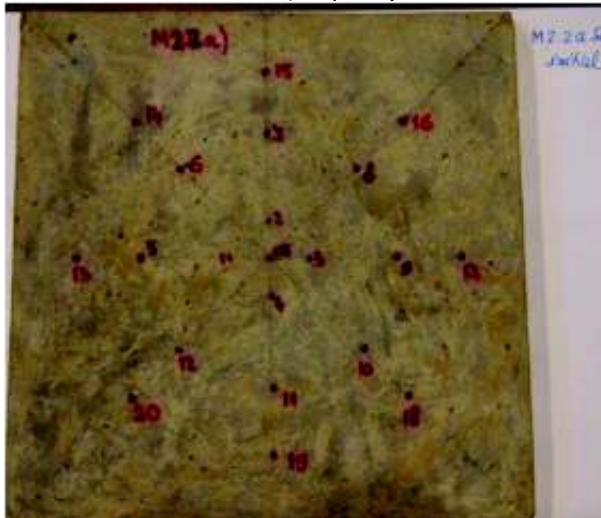


M 2.2 a – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)

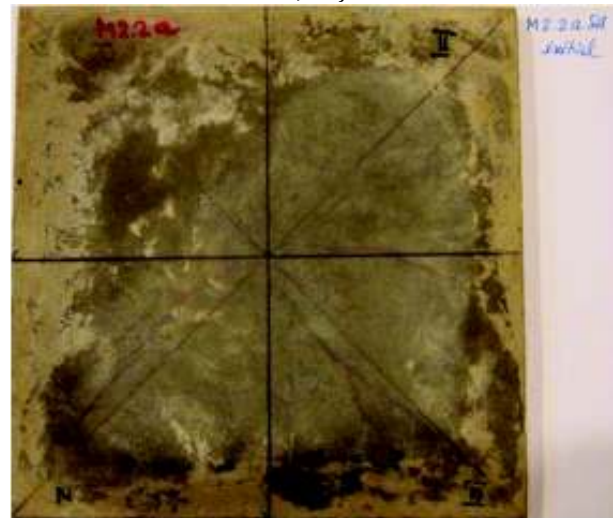


După condiționarea SH - INIȚIAL

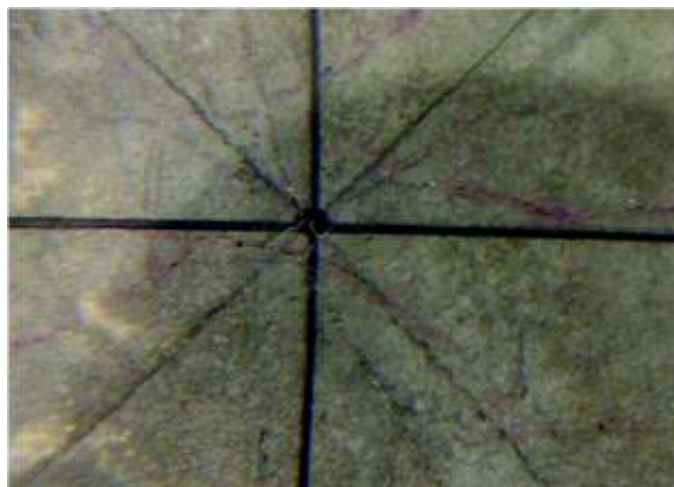
M 2.2 a –SH, fața superioară



M 2.2 b –SH, fața inferioară

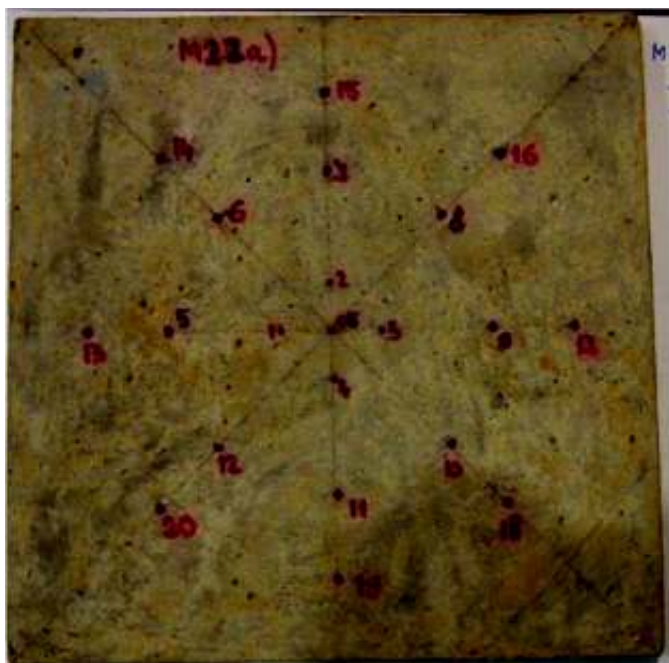


M 2.2 b –SH fața inferioară (detaliu)

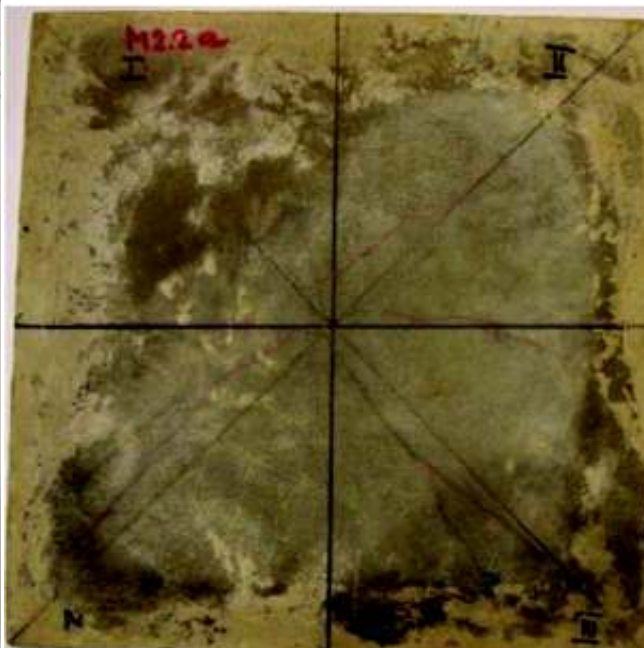


RETESTARE – Ciclu I – 5 x 0.5m

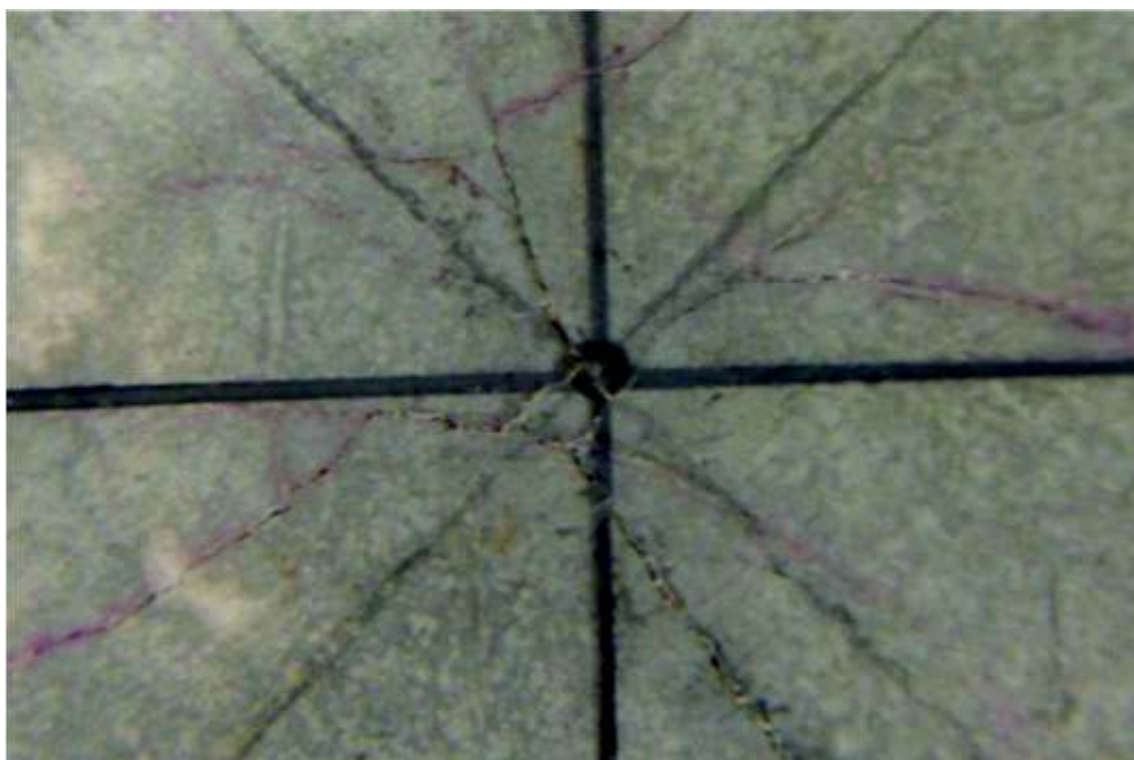
M 2.2 a – 5 x 0.5 m, fața superioară



M 2.2 a – 5 x 0.5 m, fața inferioară



M 2.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



Ciclul II – 5 x 1.0m

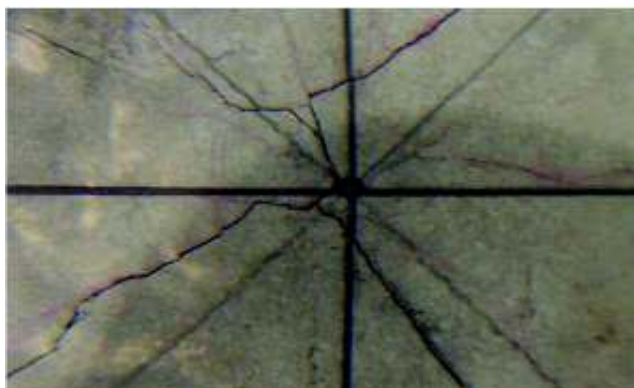
M 2.2 a – 5 x 1.0 m fața superioară



M 2.2 a – 5 x 1.0 m fața inferioară



M 2.2 a – 5 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)

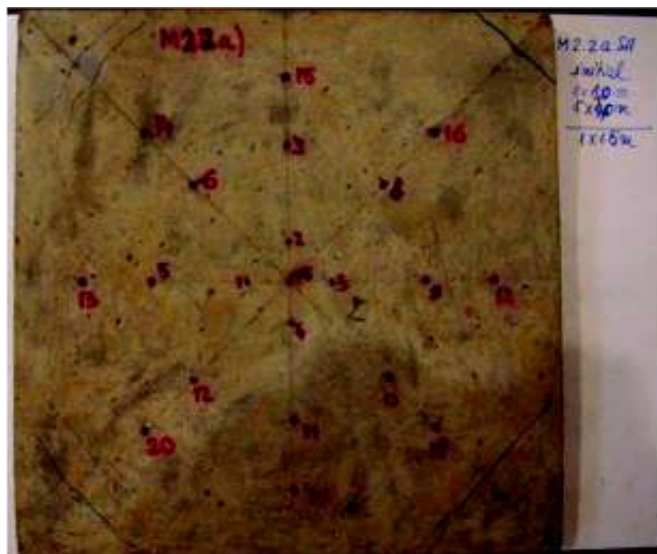


M 2.2 a – 5 x 1.0 m, fața inferioară (detaliu)



Ciclul III – 3 x 1.5 m

M 2.2 a – 1 x 1.5 m, fața inferioară



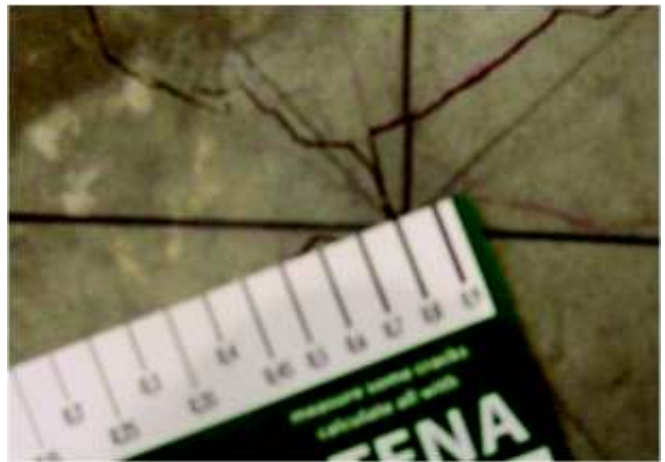
M 2.2 a – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



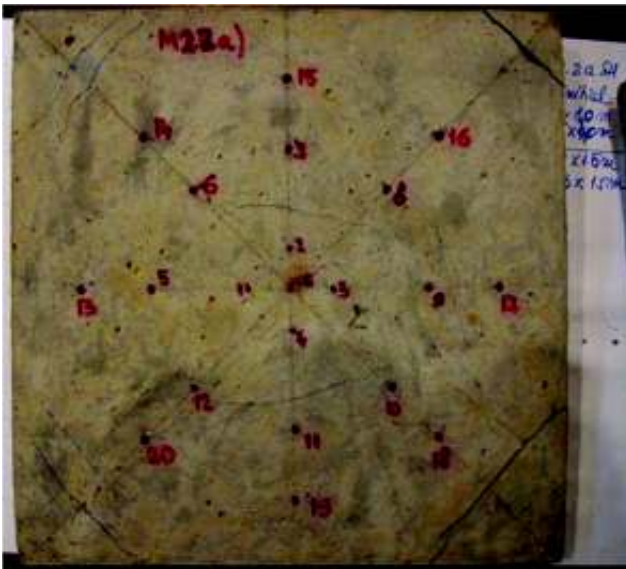
M 2.2 a – 1 x 1.5 m, fața superioară (detaliu)



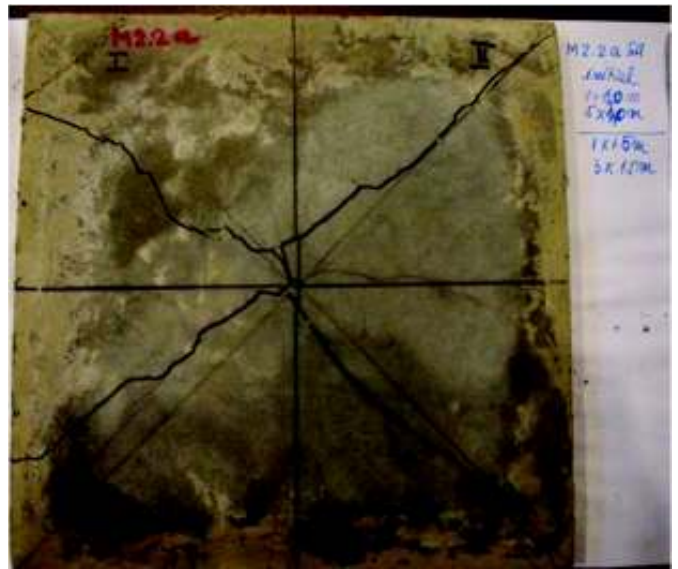
M 2.2 a – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



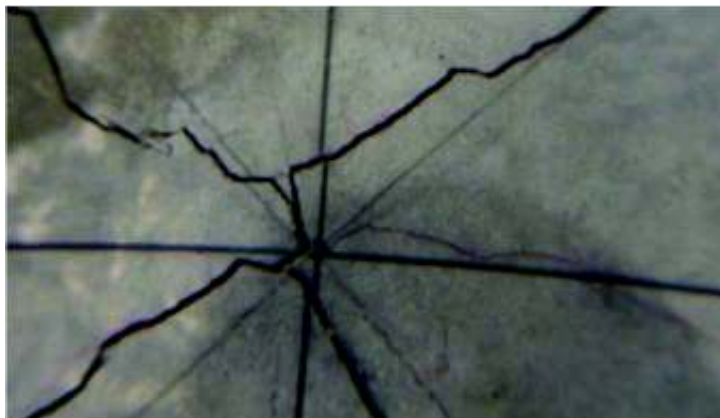
M 2.2 a – 3 x 1.5 m, fața superioară



M 2.2 a – 3 x 1.5 m, fața inferioară



M 2.2 a – 3 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



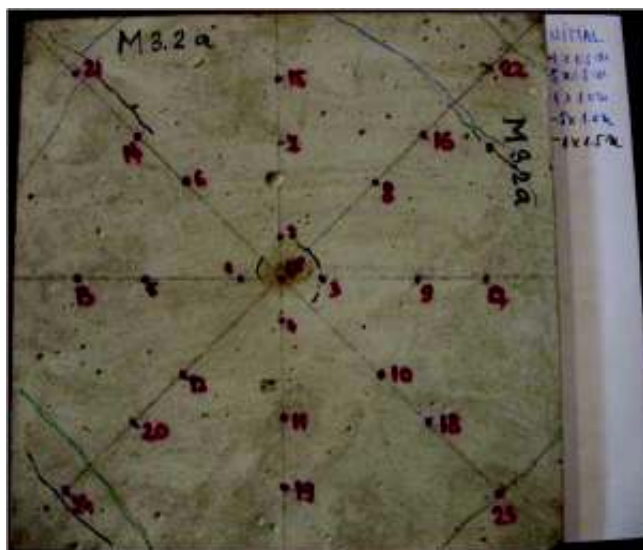
M 2.2 a – 3 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



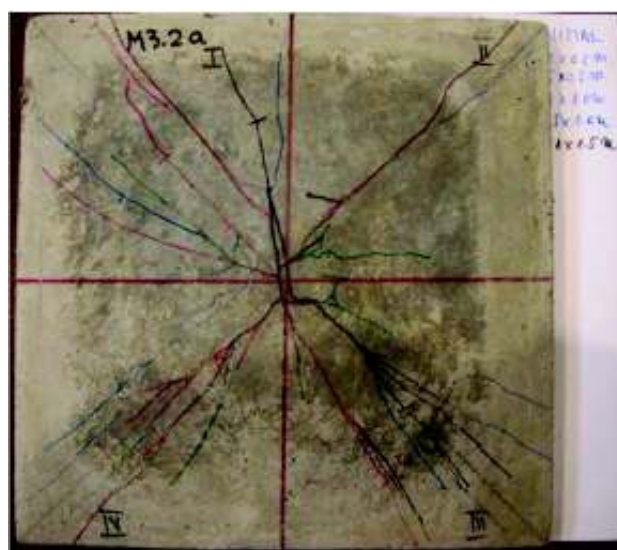
ANEXA 6.5– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 3.2 R

Ciclul III – 5 x 1.5m ($h_1 = 1.5$ m)

M 3.2 a – 1 x 1.5 m fața superioară



M 3.2 a – 1 x 1.5 m fața inferioară



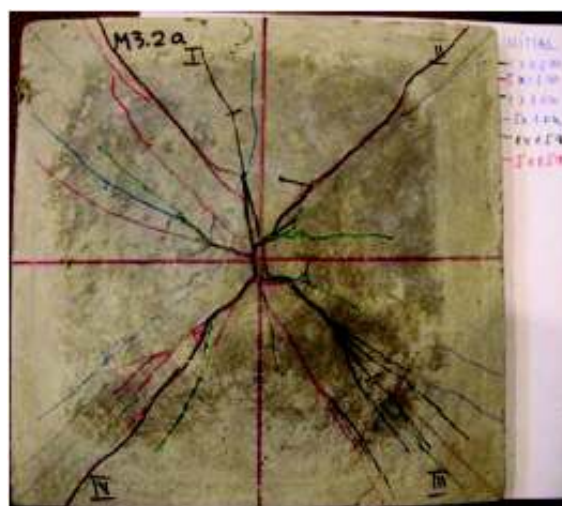
M 3.2 a – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



M 3.2 b – 5 x 1.5 m fața superioară



M 3.2 a – 5 x 1.5 m fața inferioară



M 3.2 a – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



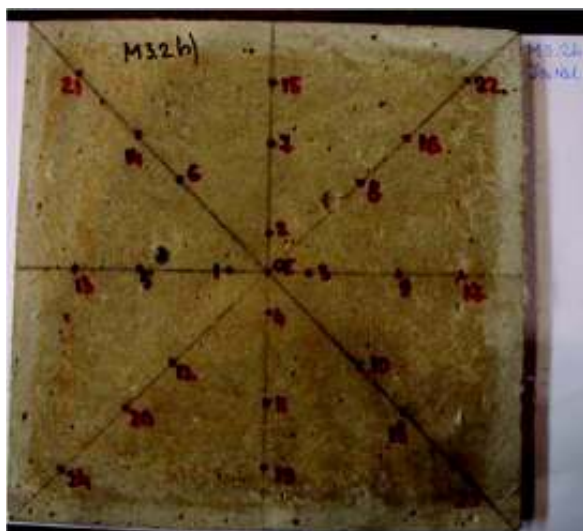
M 3.2 a – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



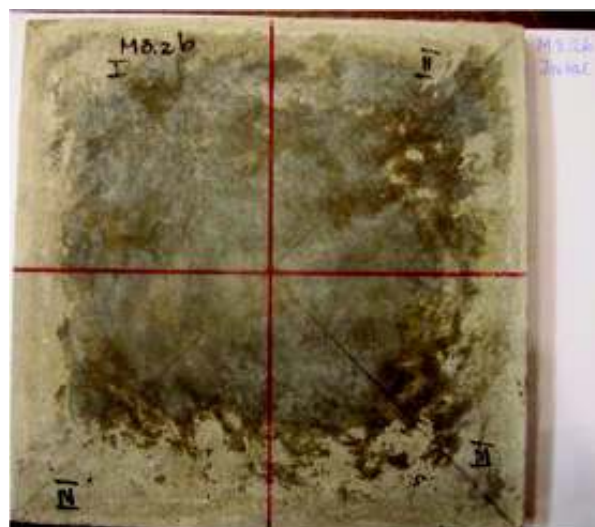
ANEXA 6.6– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 3.2 SH

INIȚIAL

M 3.2 b – fața superioară

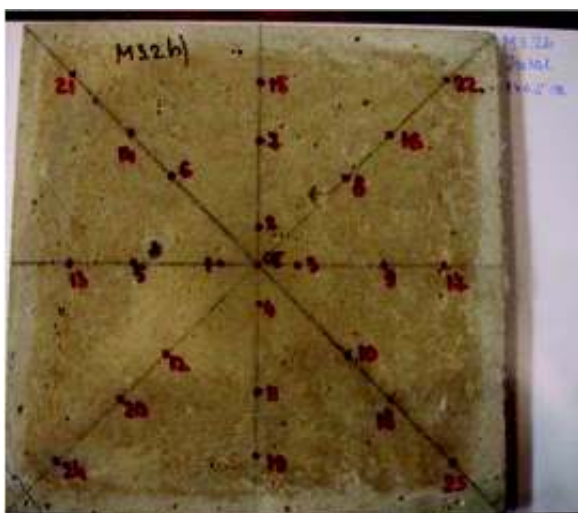


M 3.2 b – fața inferioară

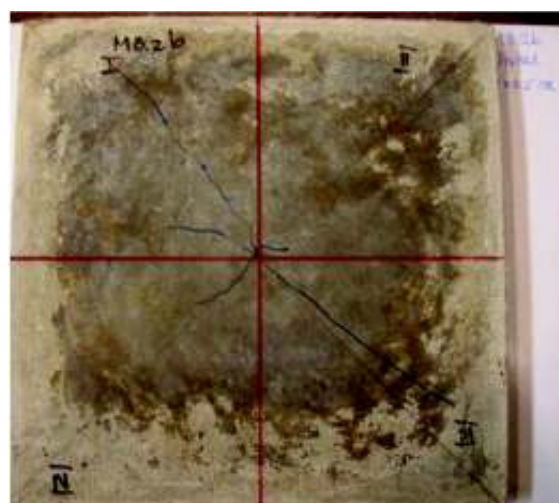


Ciclul I* – 5 x 0.5m

M 3.2 b – 1 x 0.5 m fața superioară



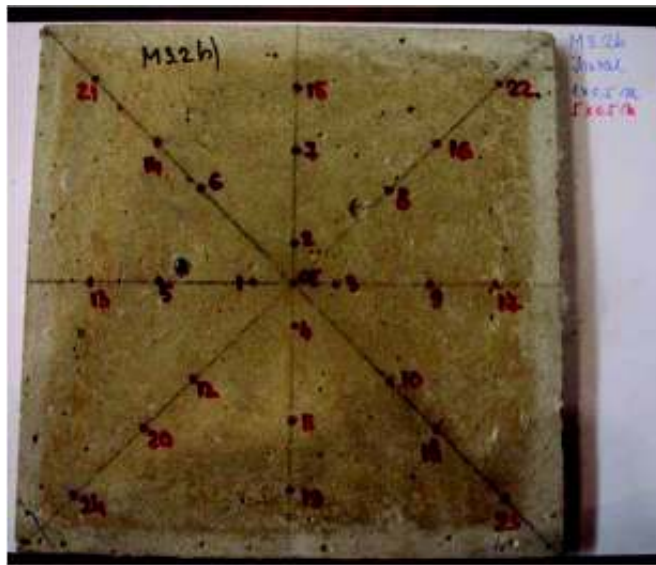
M 3.2 b – 1 x 0.5 m fața inferioară



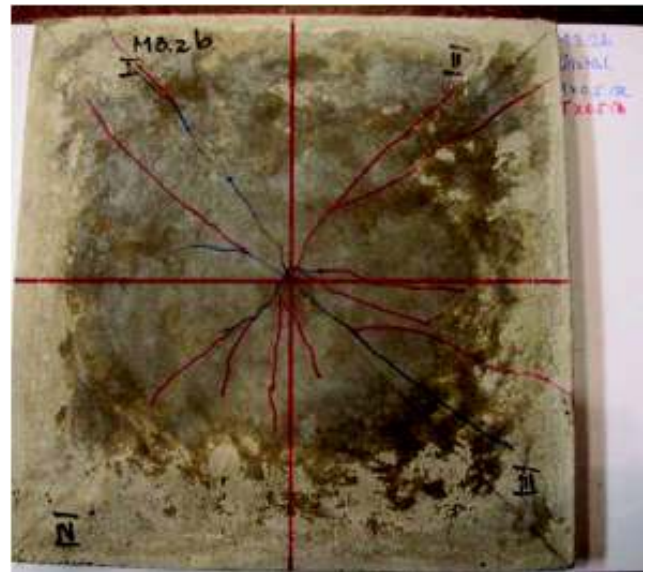
M 3.2 b – 1 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)



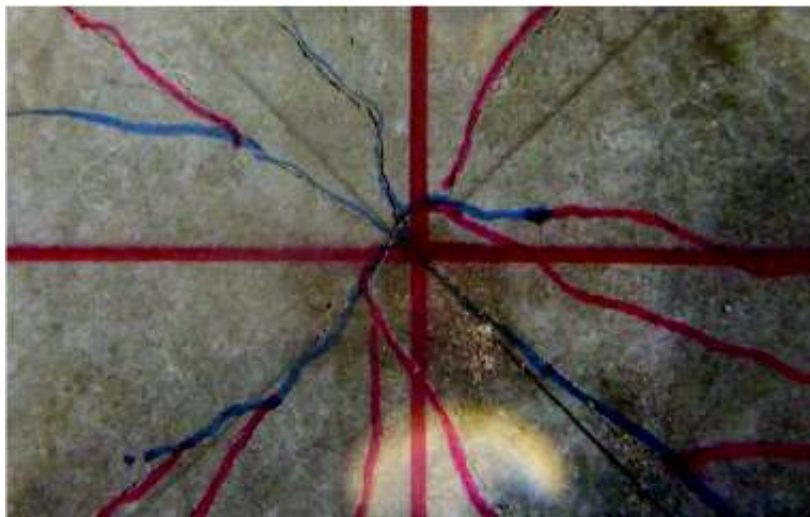
M 3.2 b – 5 x 0.5 m fața superioară



M 3.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară



M 3.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)



După condiționarea SH - INIȚIAL

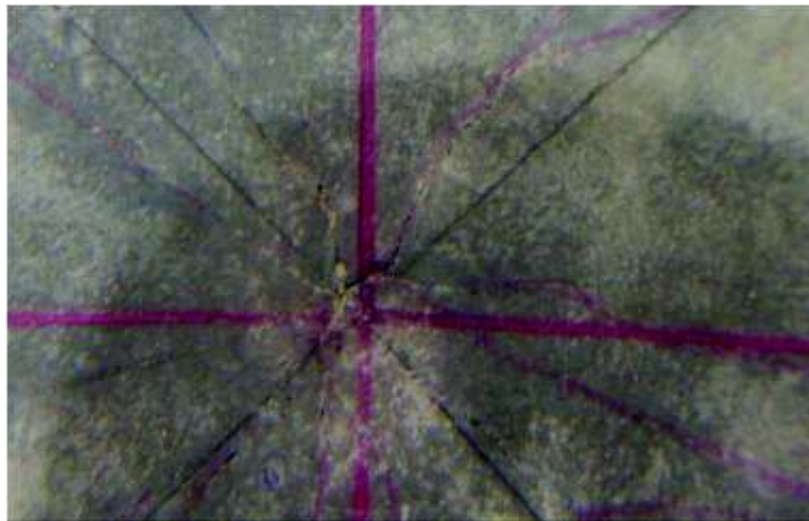
M 3.2 b –SH fața superioară



M 3.2 b –SH fața inferioară



M 3.2 b –SH fața inferioară (detaliu)

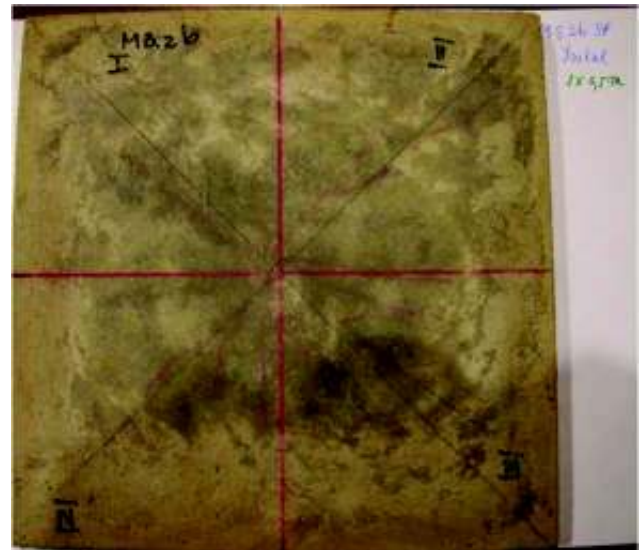


RETESTARE – Ciclul I – 5 x 0.5m

M 3.2 b – 1 x 0.5 m, fața superioară



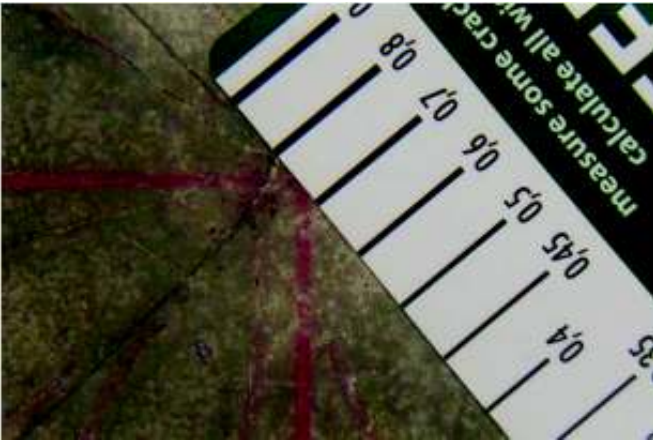
M 3.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară



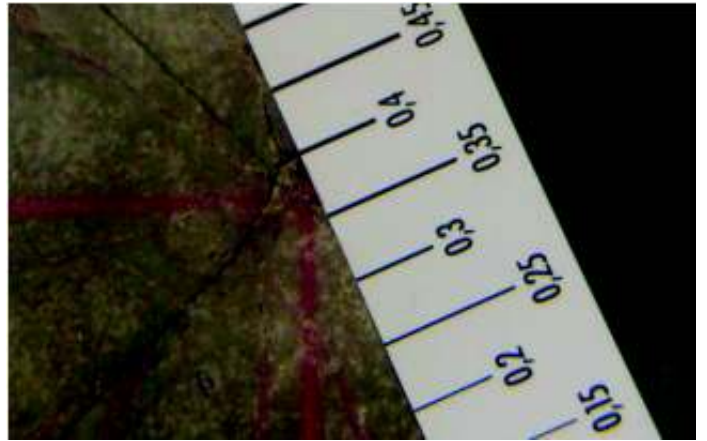
M 3.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



M 3.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



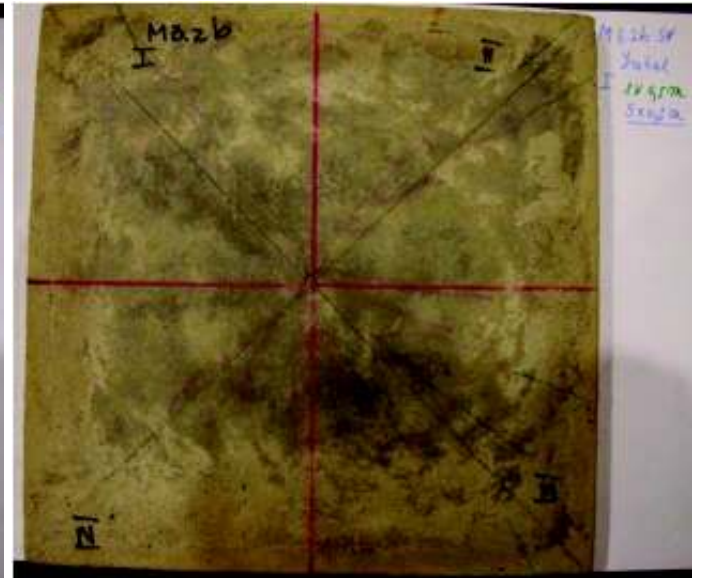
M 3.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



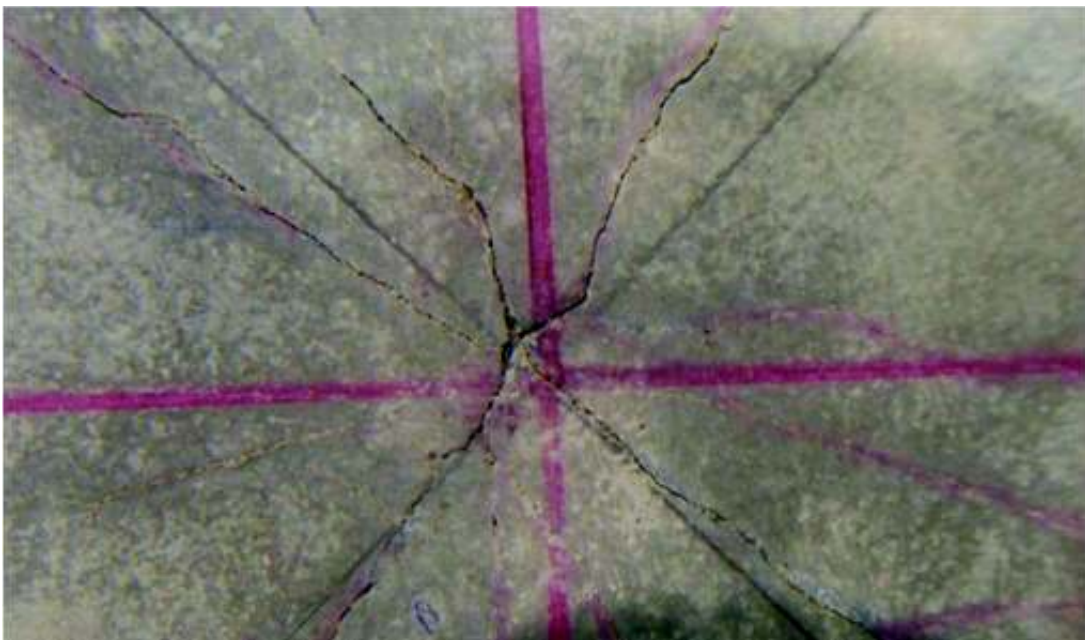
M 3.2 b – 5 x 0.5 m, fața superioară



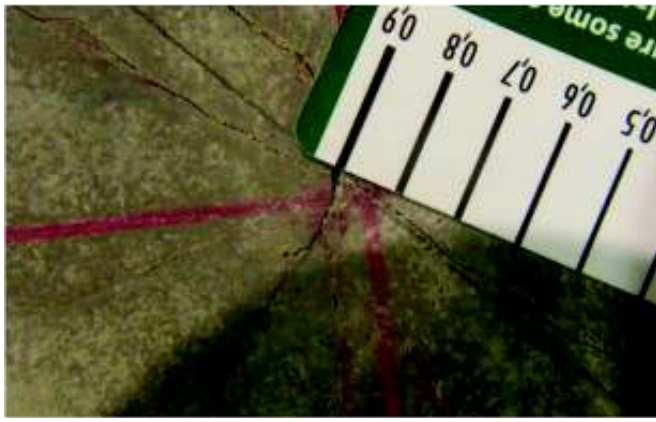
M 3.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară



M 3.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



M 3.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)

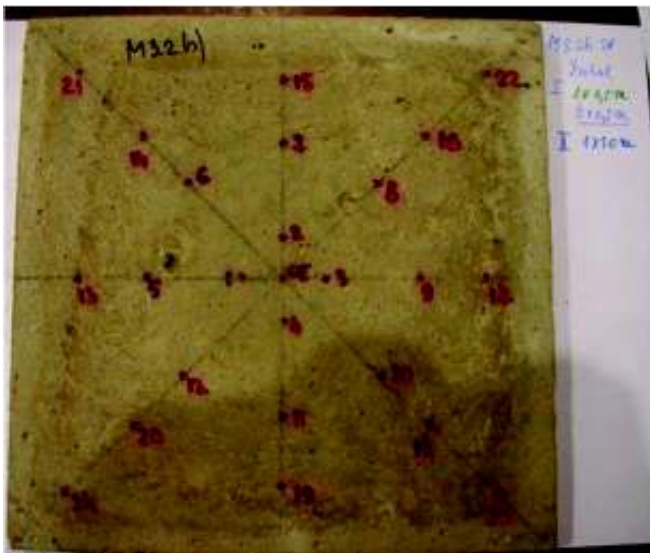


M 3.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)

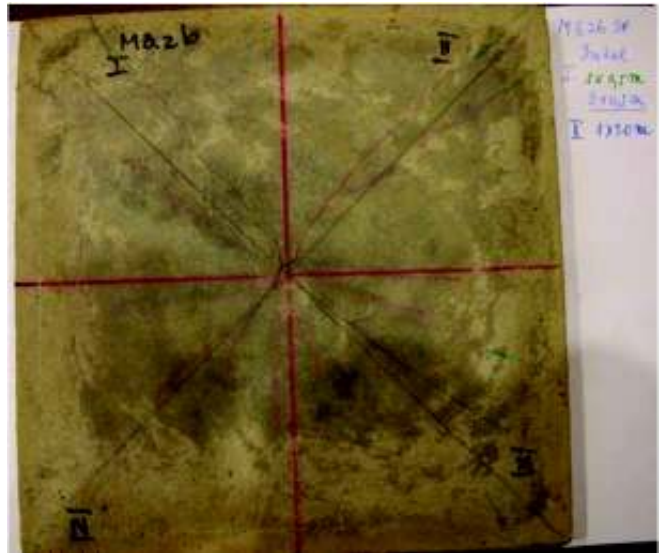


Ciclul II – 5 x 1.0m

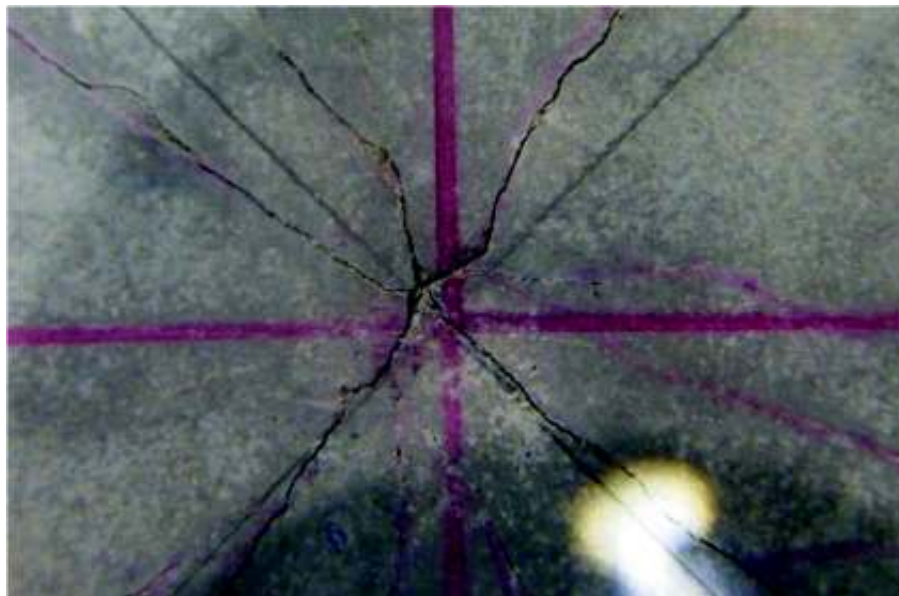
M 3.2 b – 1 x 1.0 m, fața superioară



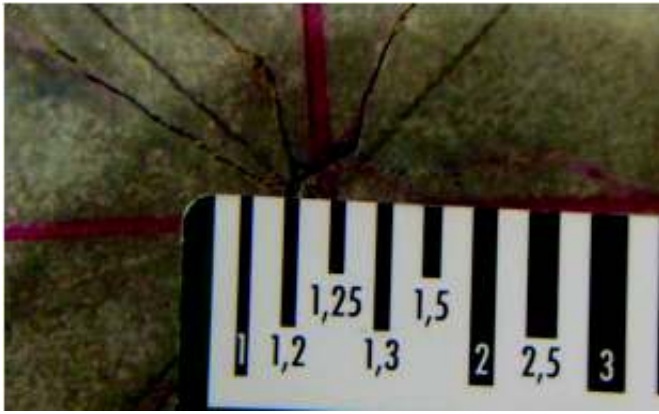
M 3.2 b – 1 x 1.0 m fața inferioară



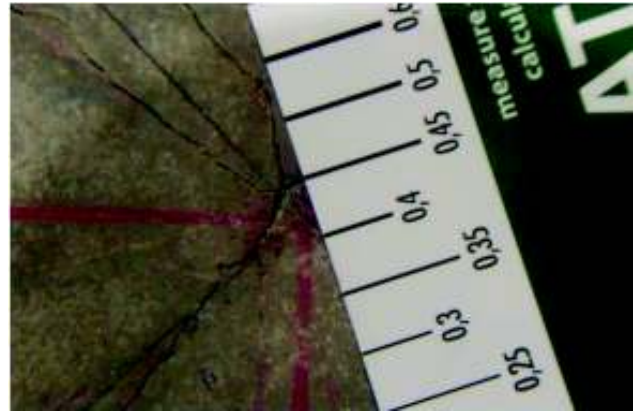
M 3.2 b – 1 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)



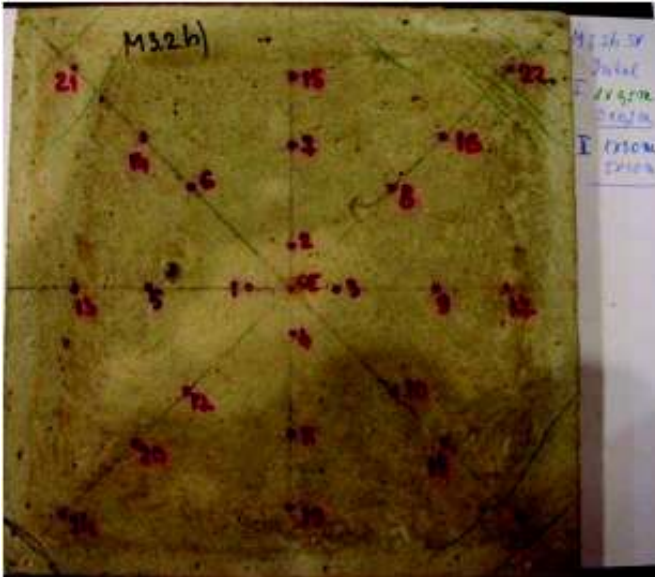
M 3.2 b – 1 x 1.0 m, fața inferioară (detaliu)



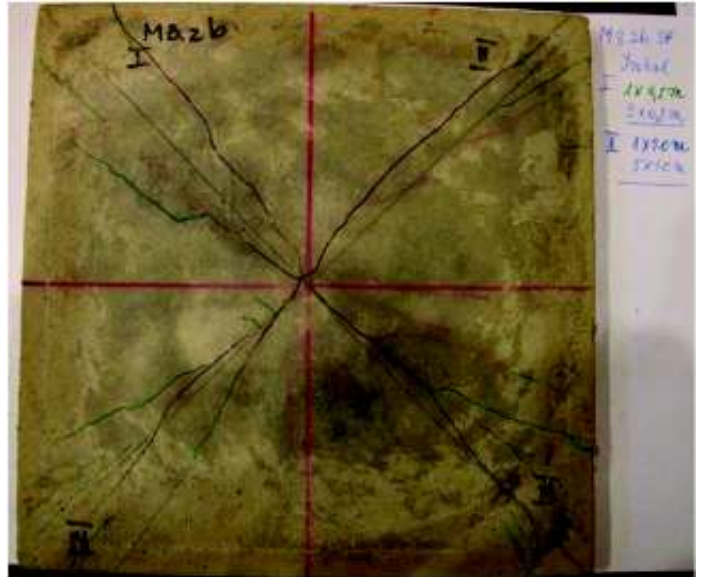
M 3.2 b – 1 x 1.0 m, fața inferioară (detaliu)



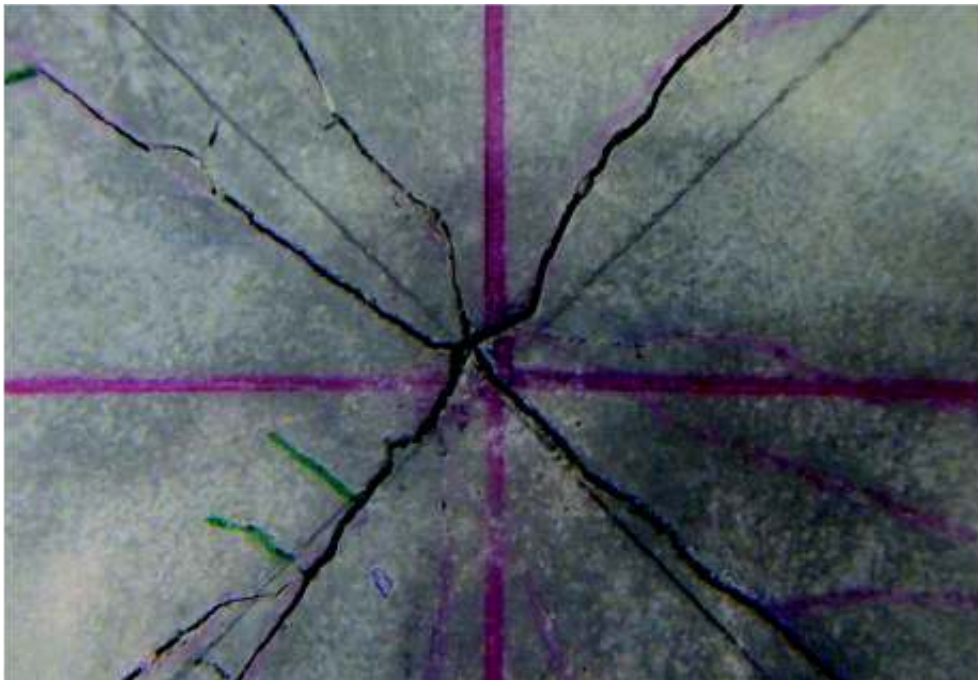
M 3.2 b – 5 x 1.0 m fața superioară



M 3.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară



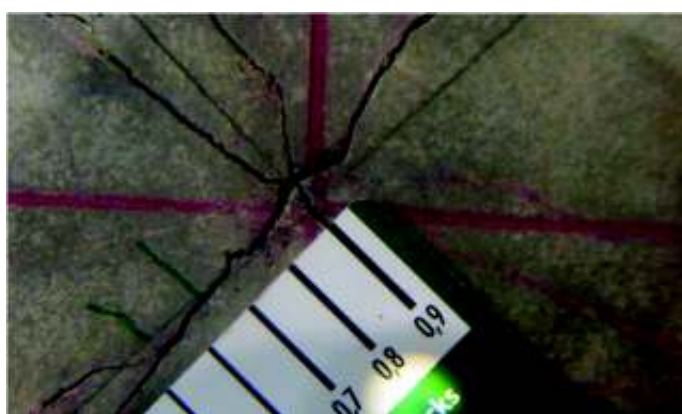
M 3.2 b – 5 x 1.0m SH fața inferioară (detaliu)



M 3.2 b – 5 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)

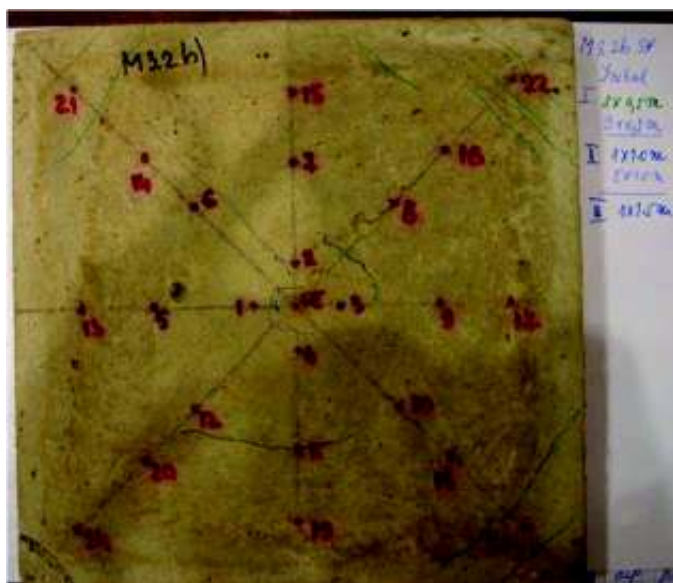


M 3.2 b – 5 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)

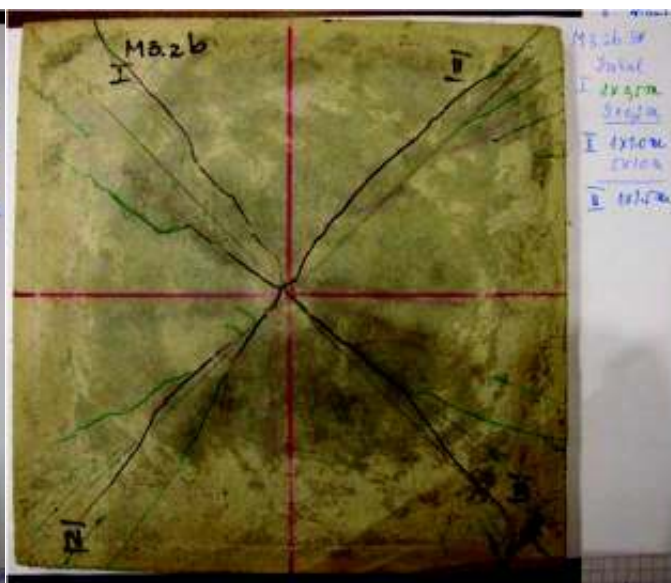


Ciclul III – 3 x 1.5 m

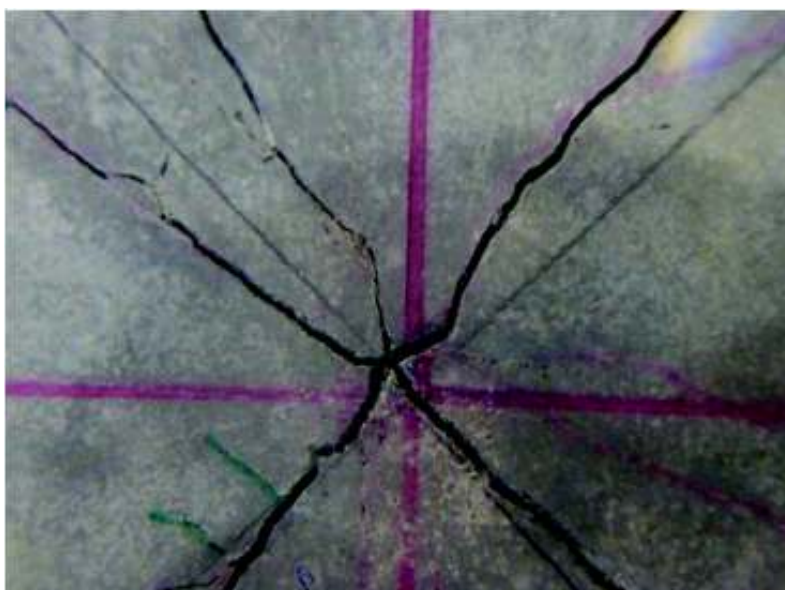
M 3.2 b – 1 x 1.5 m SH fața superioară



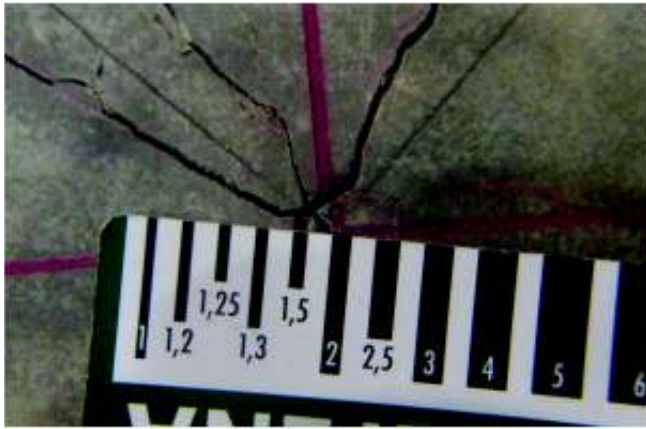
M 3.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară



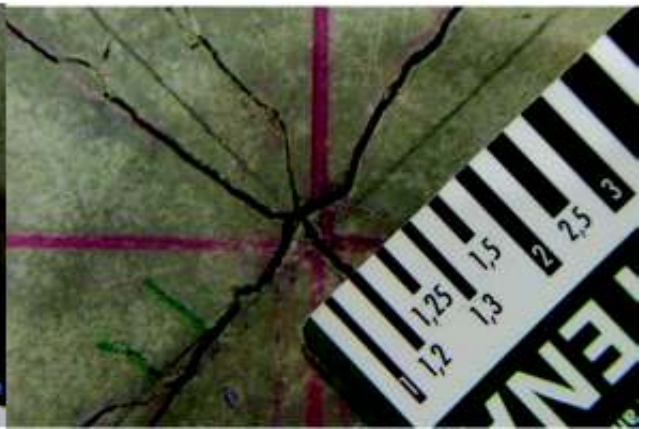
M 3.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



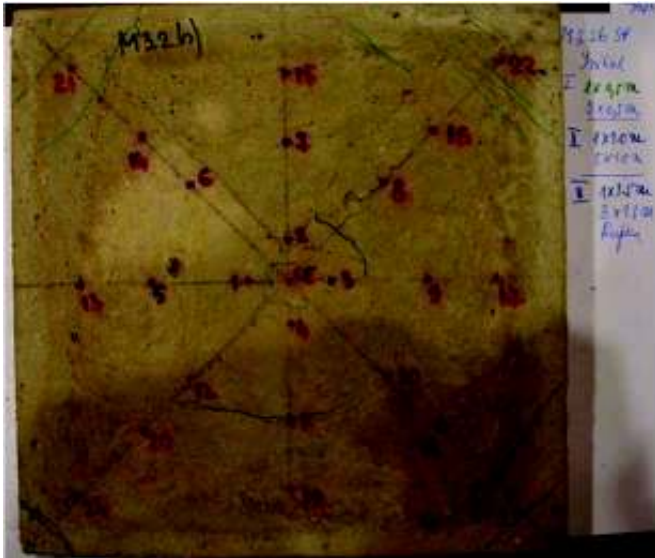
M 3.2 b – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



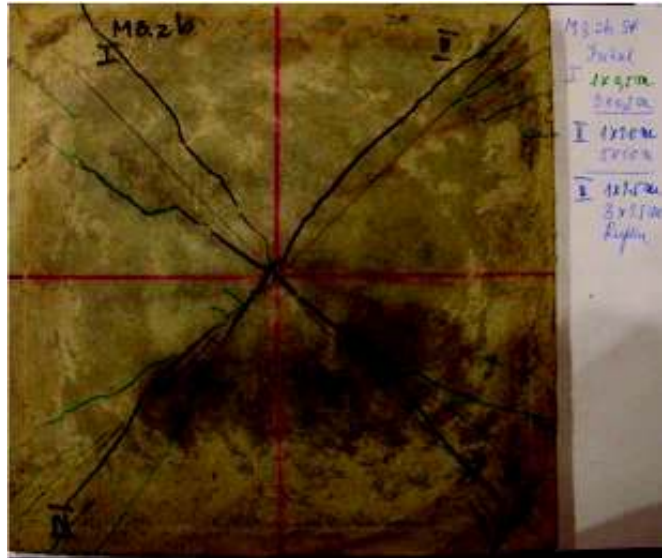
M 3.2 b – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



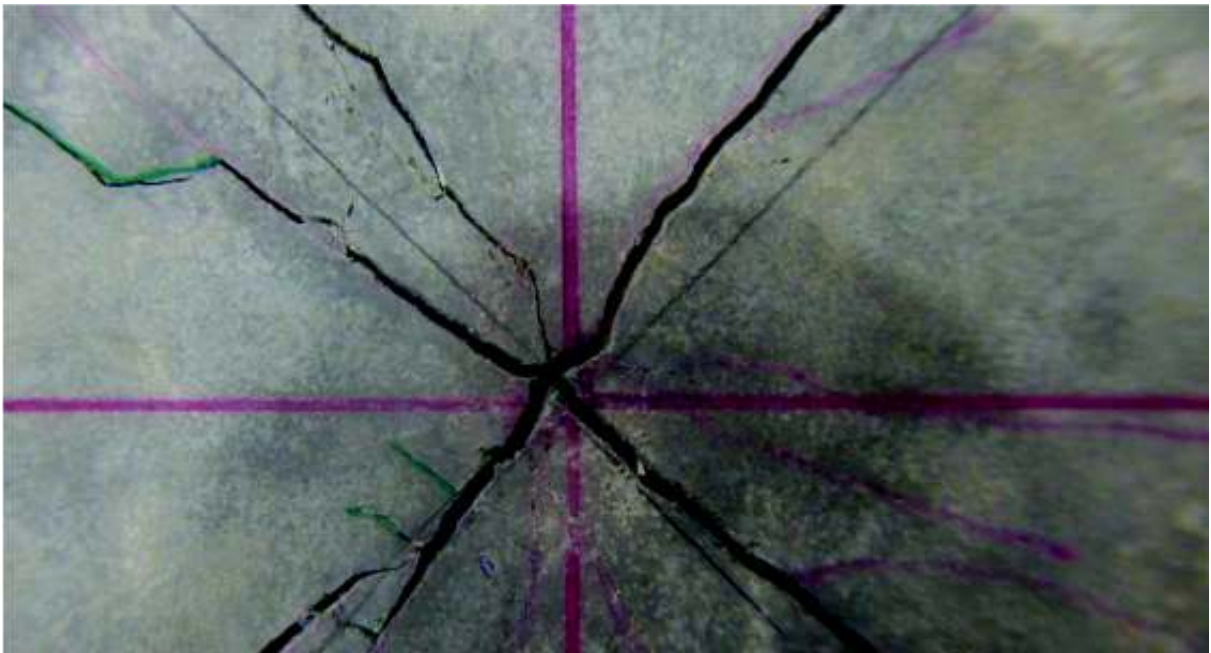
M 3.2 b – 3 x 1.5 m, fața superioară



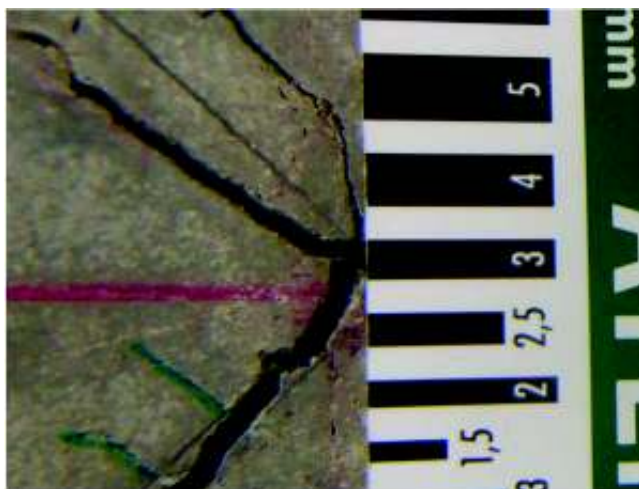
M 3.2 b – 3 x 1.5 m, fața inferioară



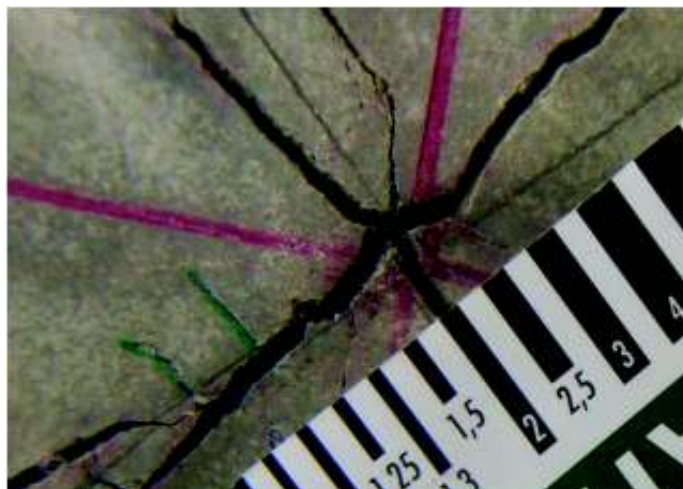
M 3.2 b – 3 x 1.5m, fața inferioară (detaliu)



M 3.2 b – 3 x 1.5m, fața inferioară (detaliu)



M 3.2 b – 3 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)



ANEXA 6.7– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 4.2 R

INIȚIAL

M 4.2 b – fața superioară



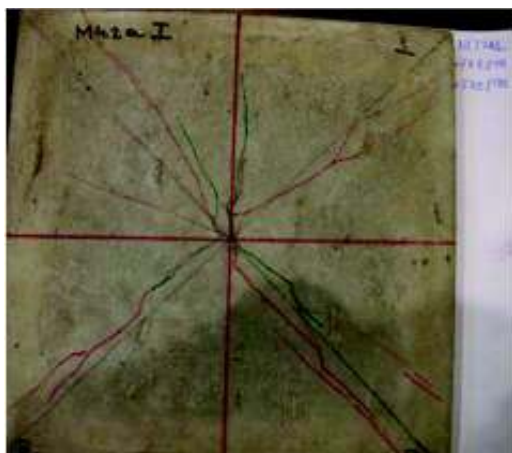
M 4.2 b – fața inferioară



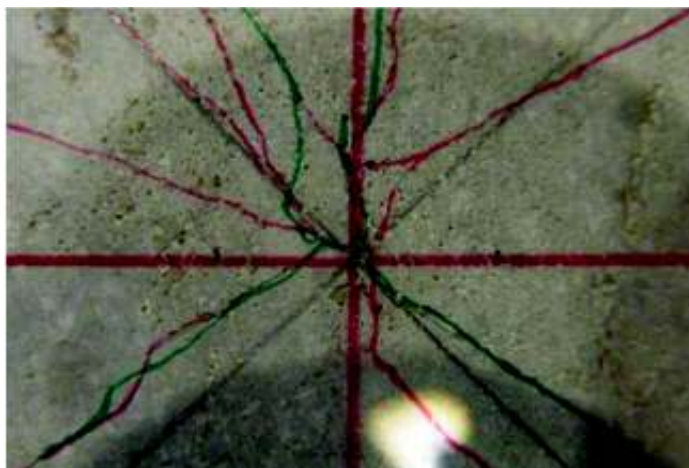
Ciclul I – 5 x 0.5m ($h_1 = 0.5$ m) M 4.2 b – 1 x 0.5 m fața inferioară



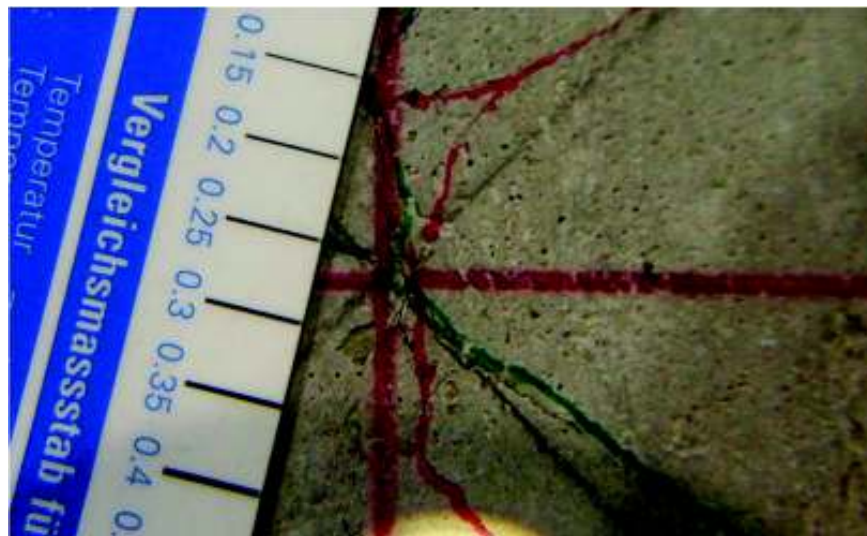
M 4.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară



M 4.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)

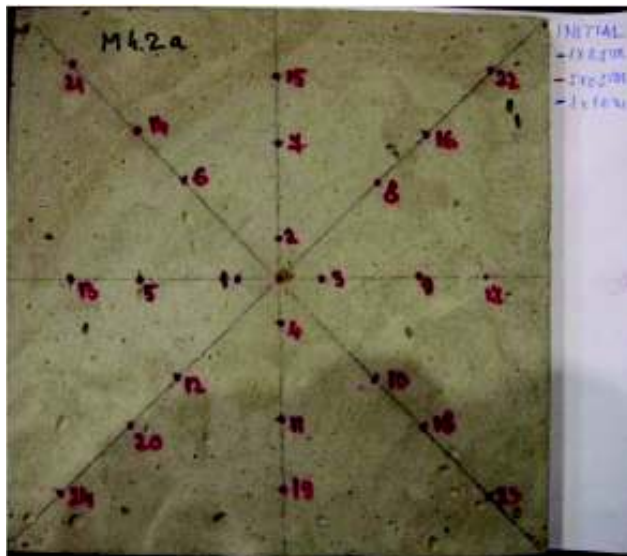


M 4.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)

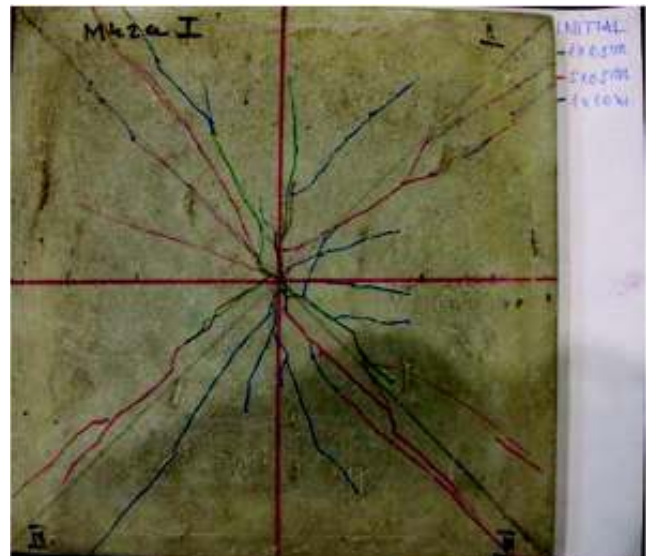


Ciclul II – 5 x 1.0m ($h_1 = 1.0$ m)

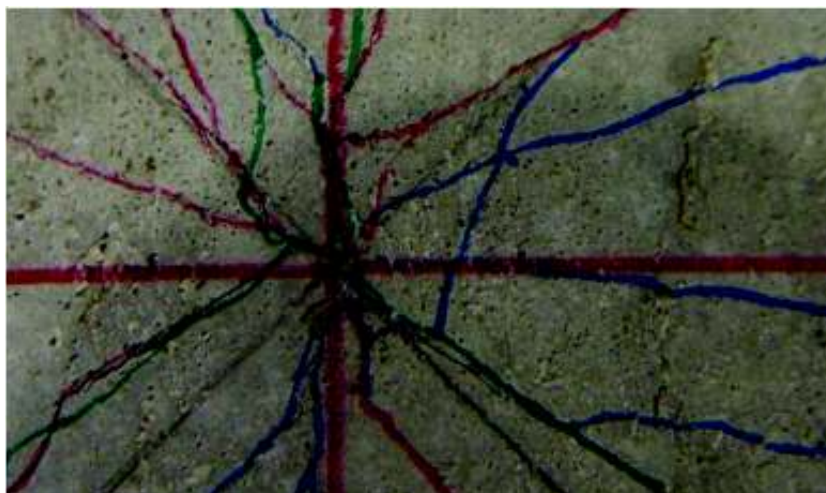
M 4.2 b – 1 x 1.0 m fața superioară



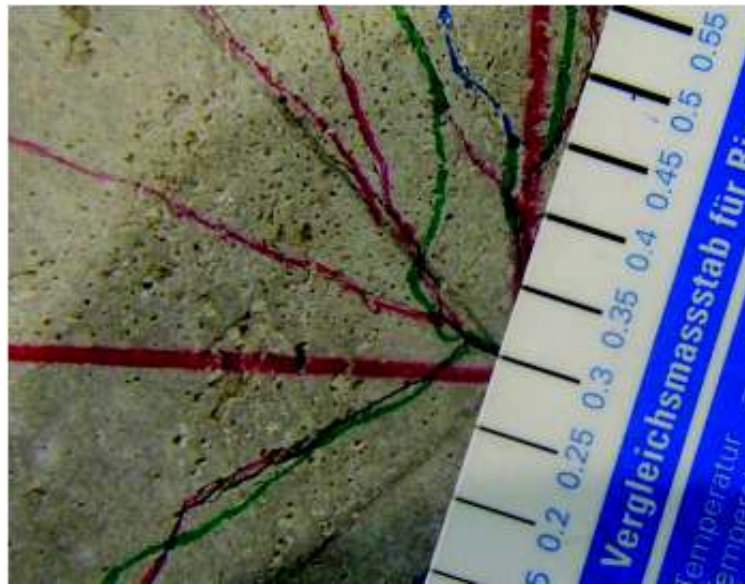
M 4.2 b – 1 x 1.0 m fața inferioară



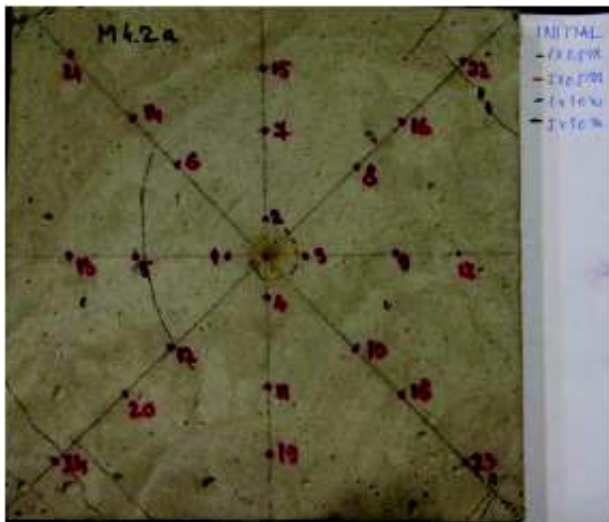
M 4.2 b – 1 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)



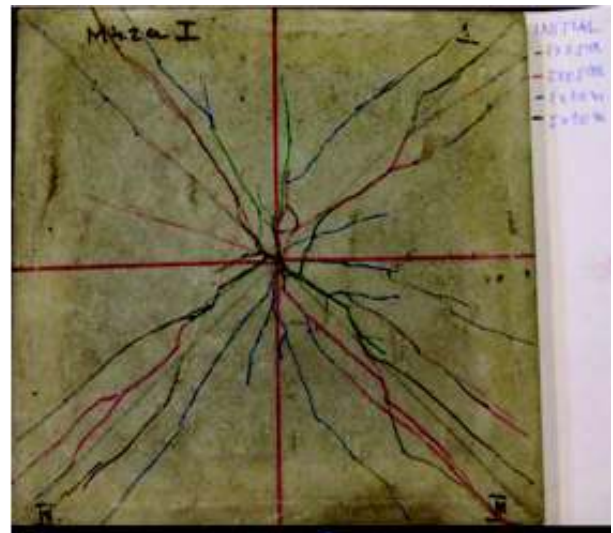
M 4.2 b – 1 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)



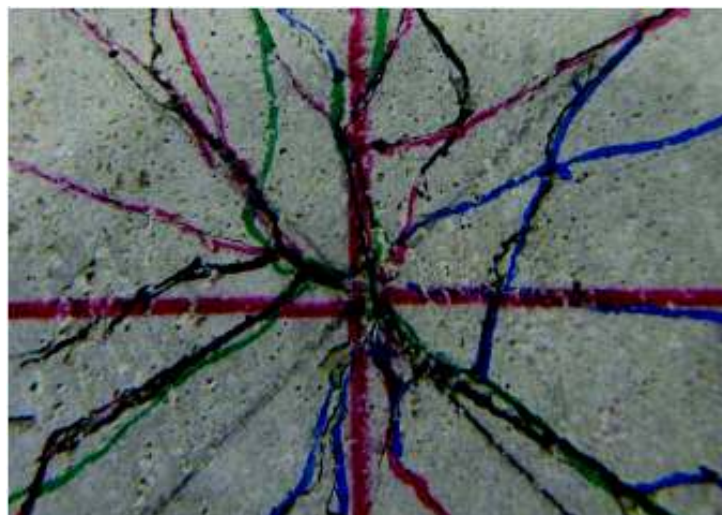
M 4.2 b – 5 x 1.0 m fața superioară



M 4.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară



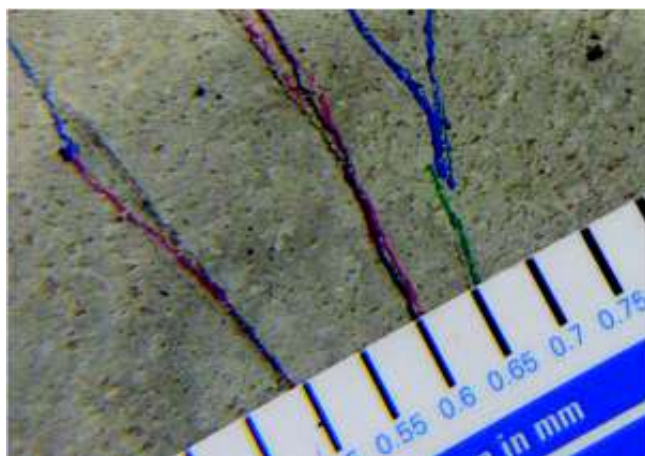
M 4.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)



M 4.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)



M 4.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)

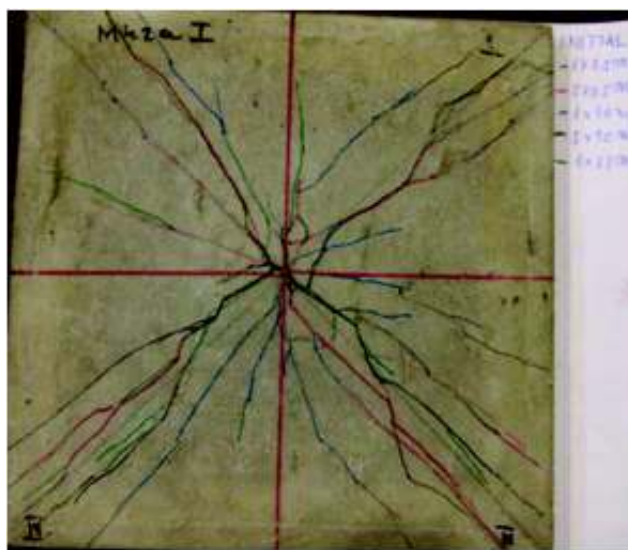


Ciclul III – 5 x 1.5m ($h_1 = 1.5$ m)

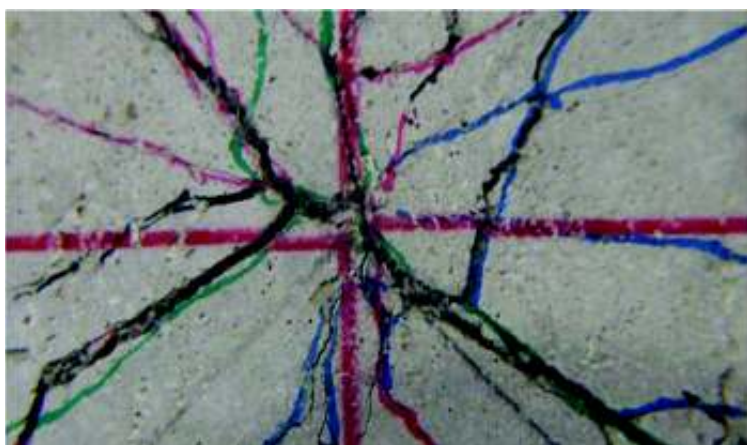
M 4.2 b – 1 x 1.5 m fața superioară



M 4.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară



M 4.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



M 4.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



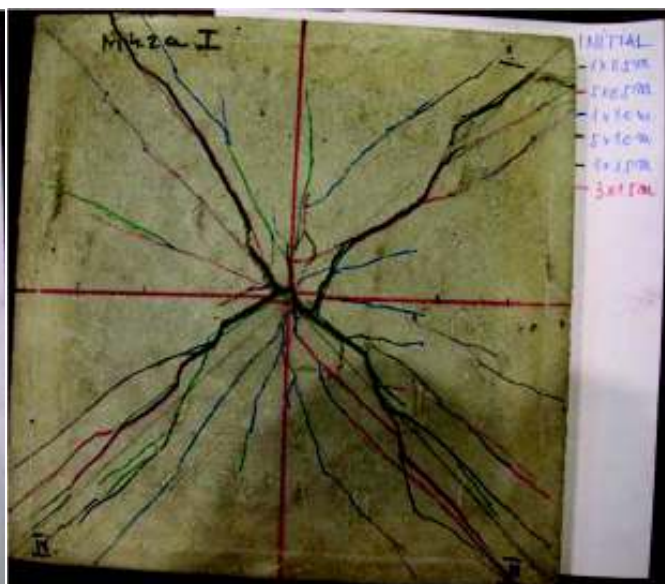
M 4.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară



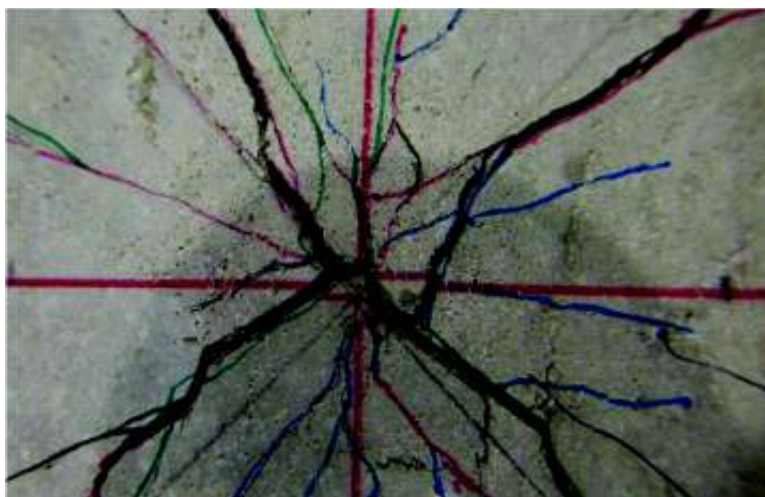
M 4.2 b – 3 x 1.5 m fața superioară



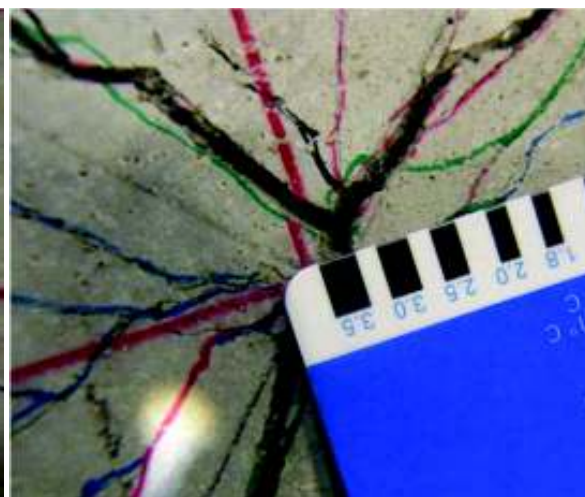
M 4.2 b – 3 x 1.5 m fața inferioară



M 4.2 b – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



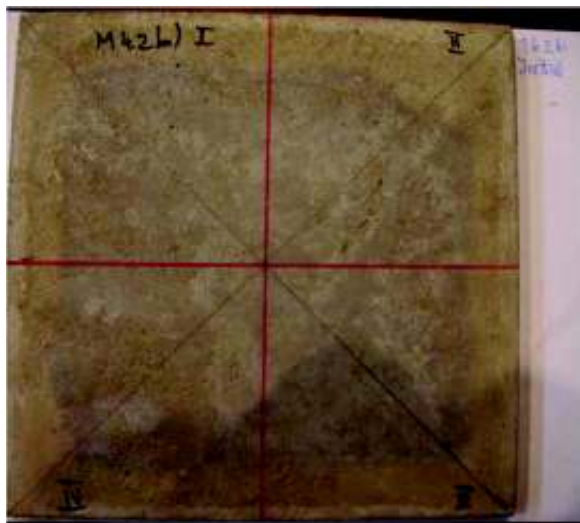
M 4.2 b – 5 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)



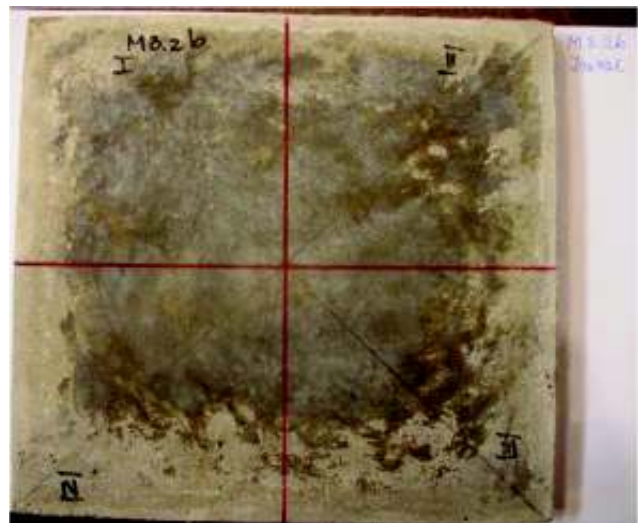
ANEXA 6.8– Analiză vizuală a evoluției fisurilor plăcii M 4.2 SH

INIȚIAL

M 4.2 b – fața superioară

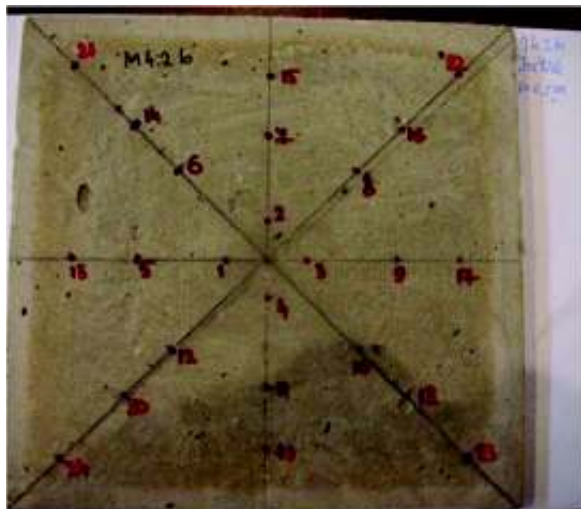


M 4.2 b – fața inferioară

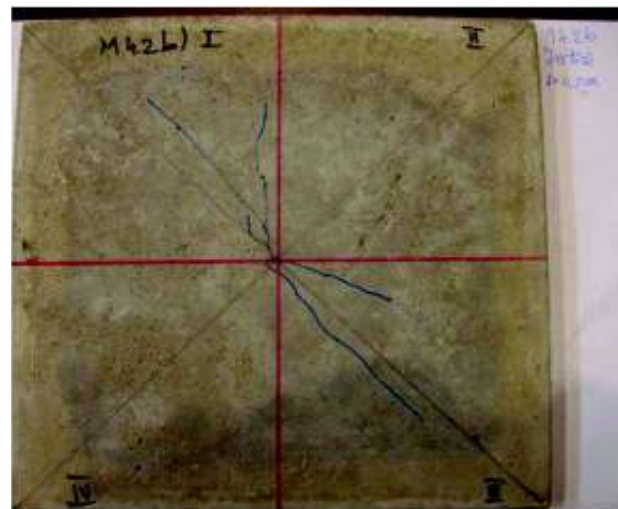


Ciclul I* – 5 x 0.5m

M 4.2 b – 1 x 0.5 m fața superioară



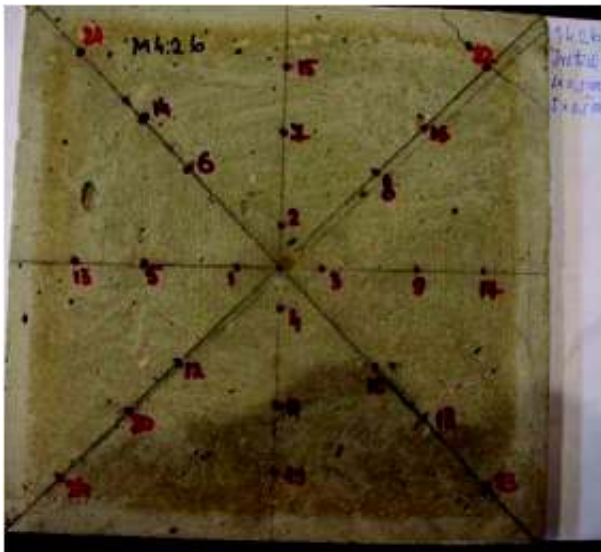
M 4.2 b – 1 x 0.5 m fața inferioară



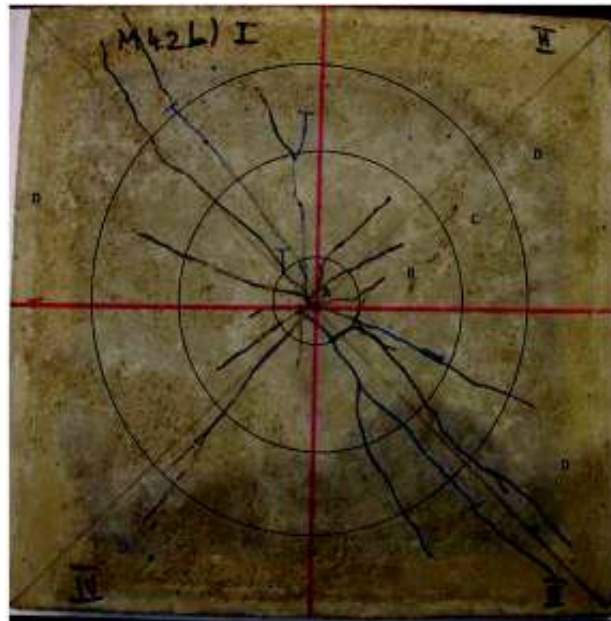
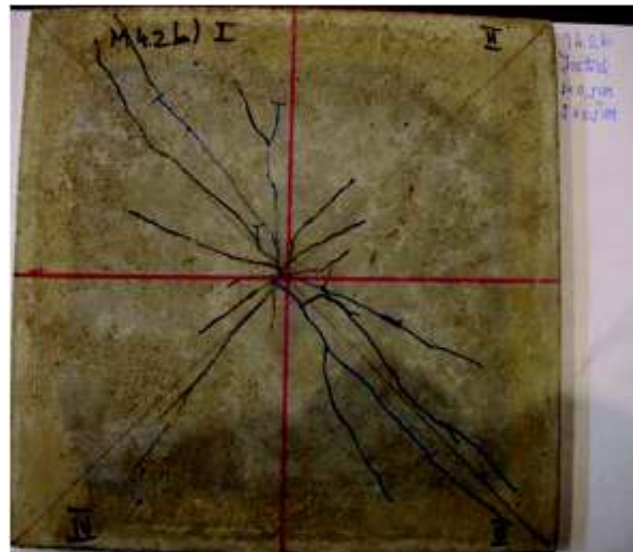
M 4.2 b – 1 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)



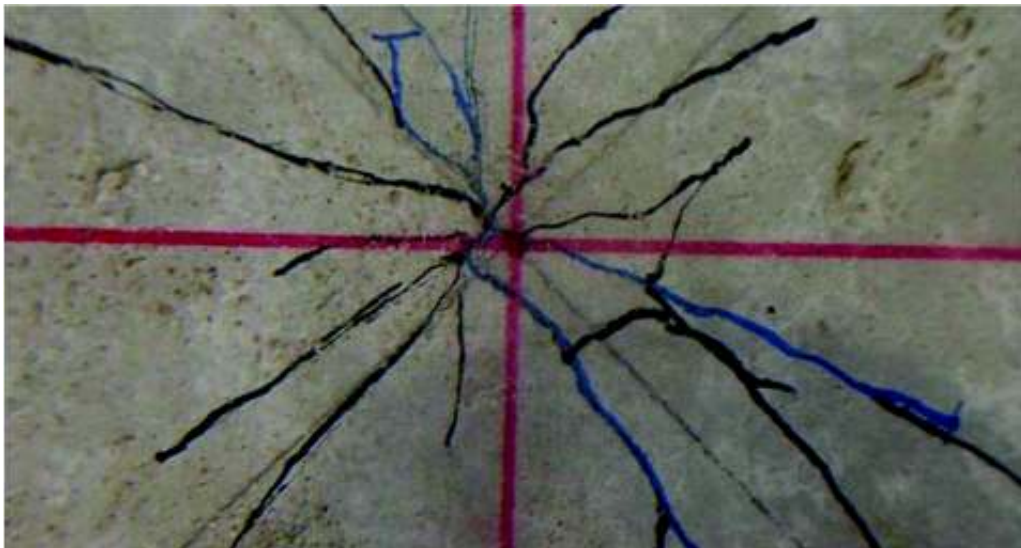
M 4.2 b – 5 x 0.5 m fața superioară



M 4.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară

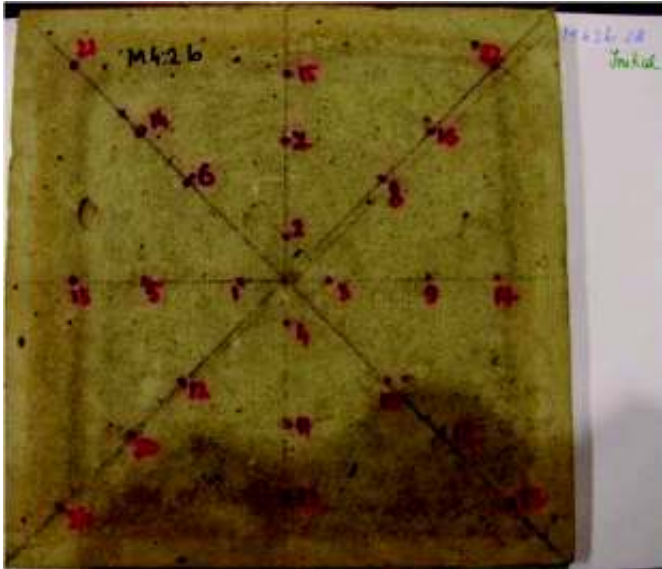


M 4.2 b – 5 x 0.5 m fața inferioară (detaliu)

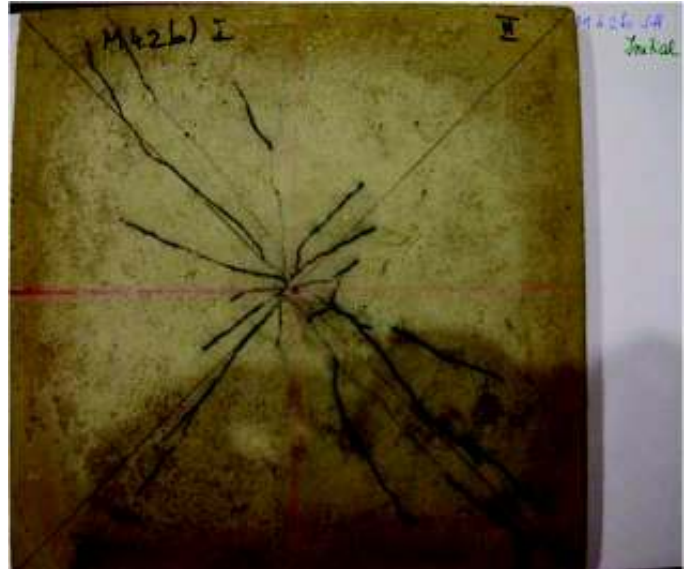


După condiționarea SH - INIȚIAL

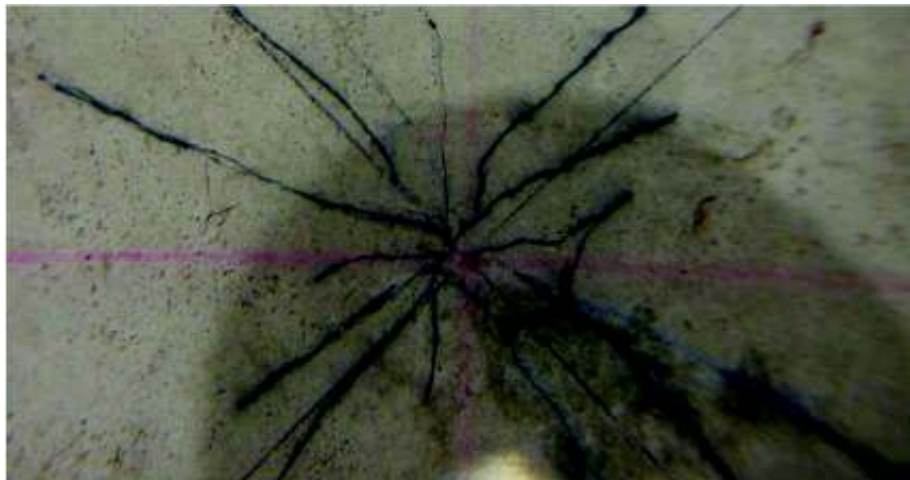
M 4.2 b –SH fața superioară



M 4.2 b –SH fața inferioară

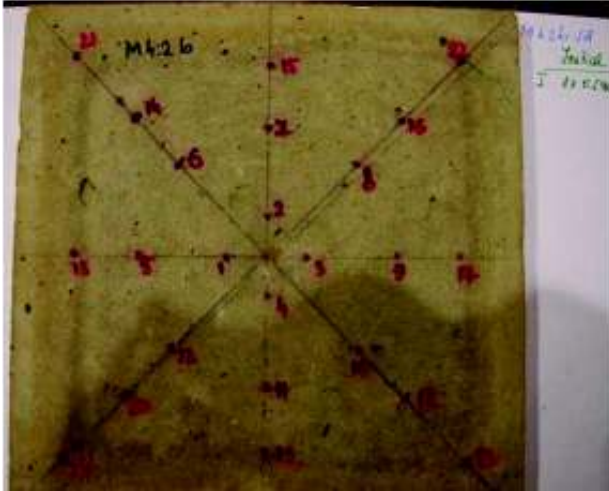


M 4.2 b –SH fața inferioară (detaliu)

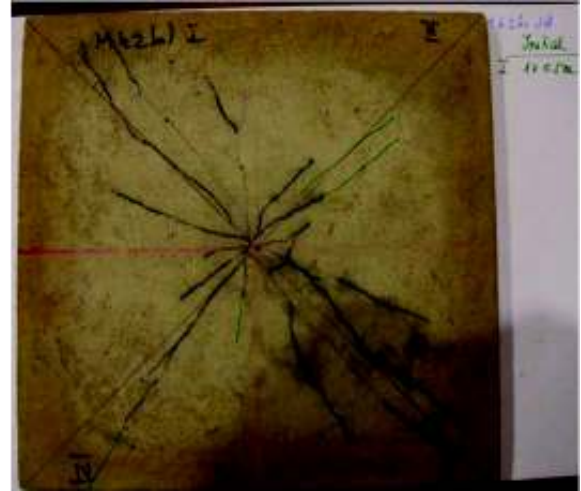


RETESTARE – Ciclu I – 5 x 0.5m

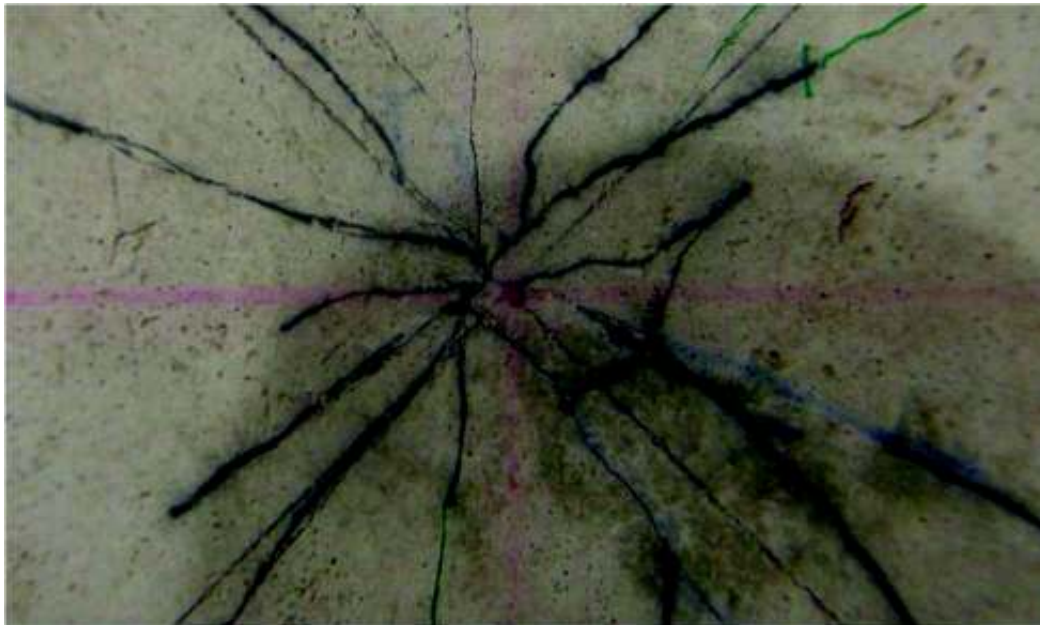
M 4.2 b – 1 x 0.5 m, fața superioară



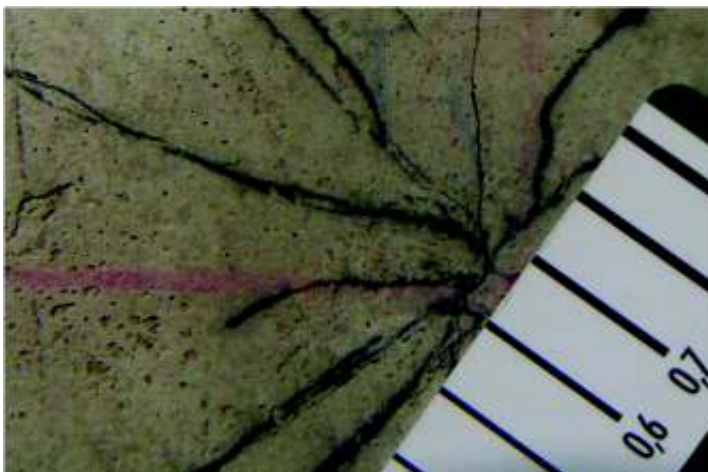
M 4.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară



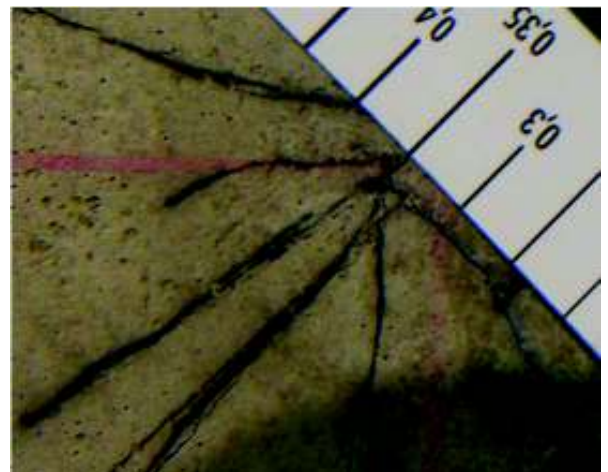
M 4.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



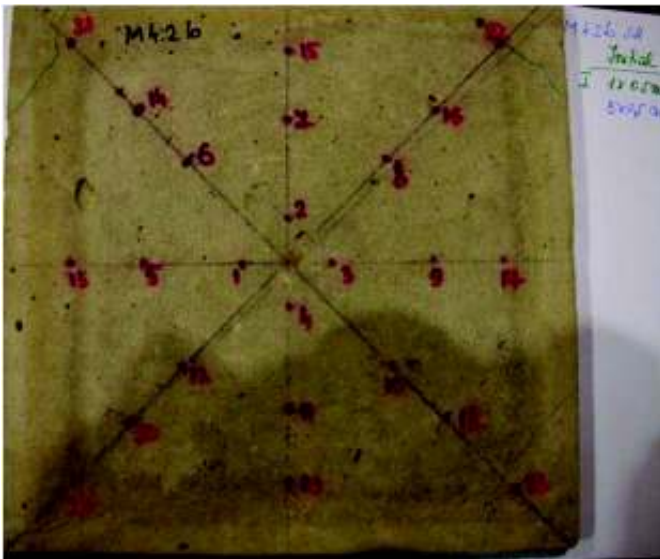
M 4.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



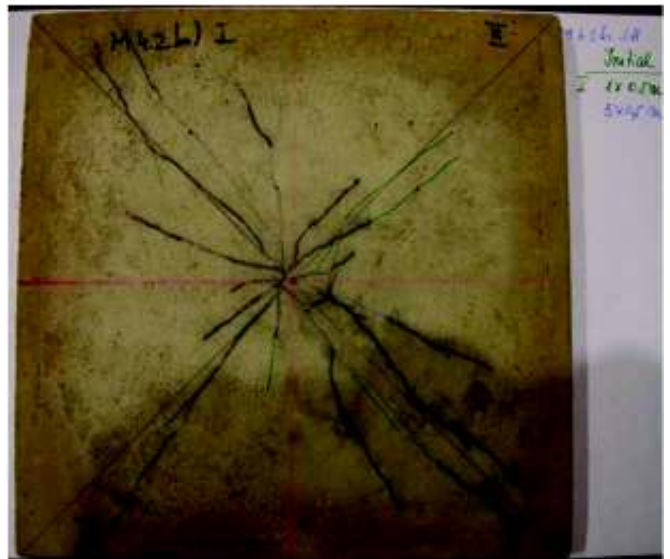
M 4.2 b – 1 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



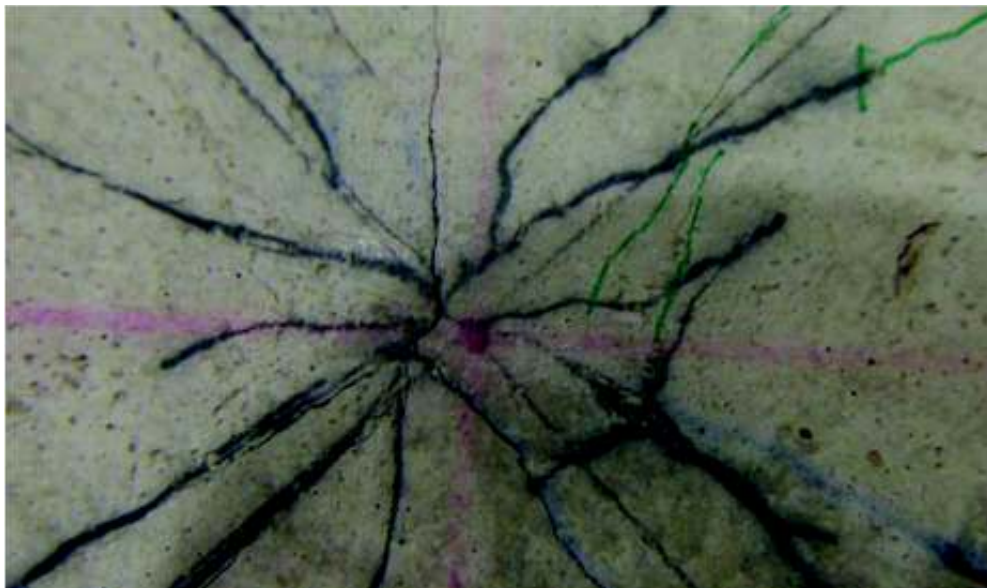
M 4.2 b – 5 x 0.5 m, fața superioară



M 4.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară



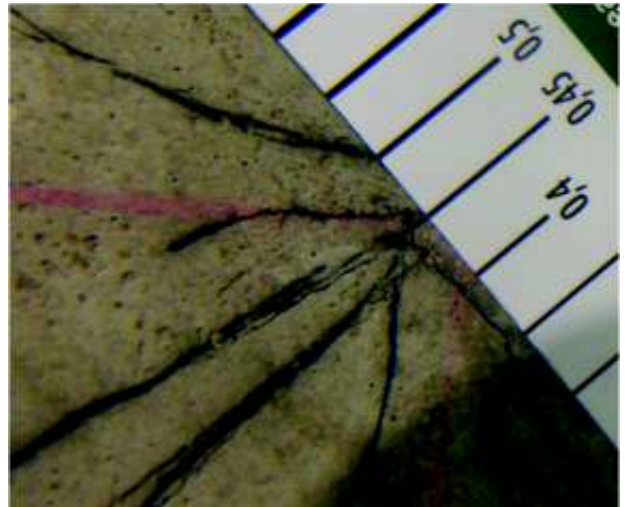
M 4.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)



M 4.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară

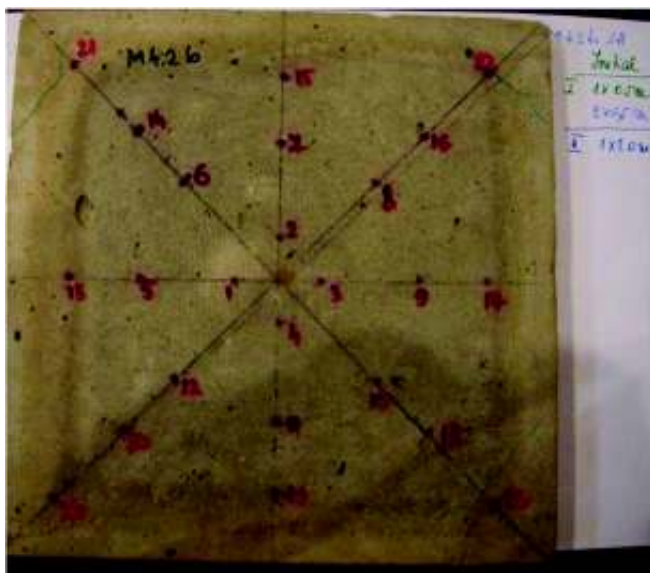


M 4.2 b – 5 x 0.5 m, fața inferioară (detaliu)

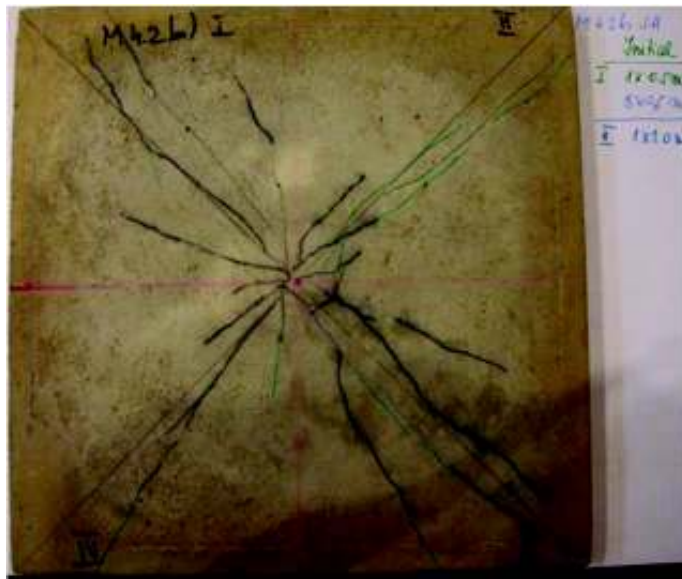


Ciclul II – 5 x 1.0m

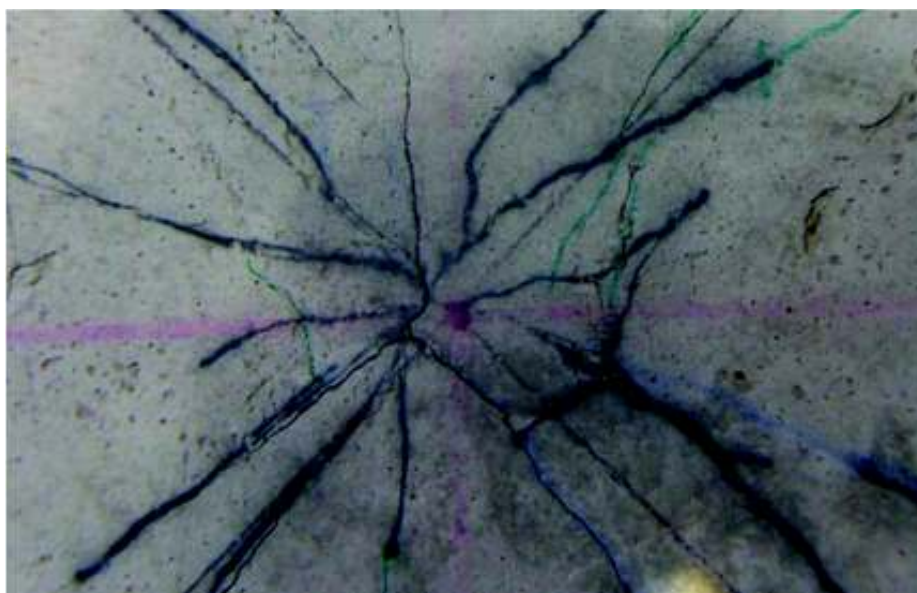
M 4.2 b – 1 x 1.0 m, fața superioară



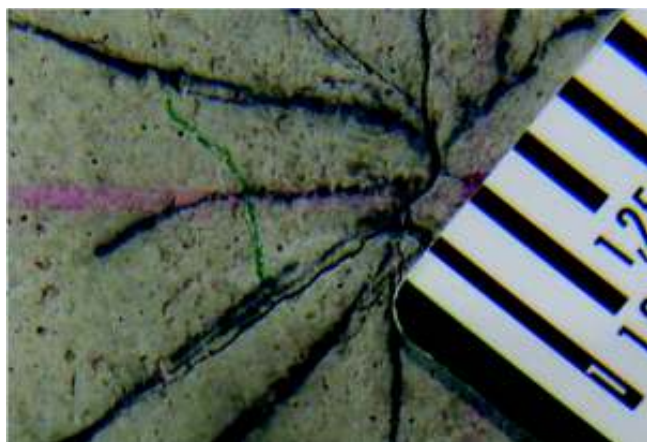
M 4.2 b – 1 x 1.0 m fața inferioară



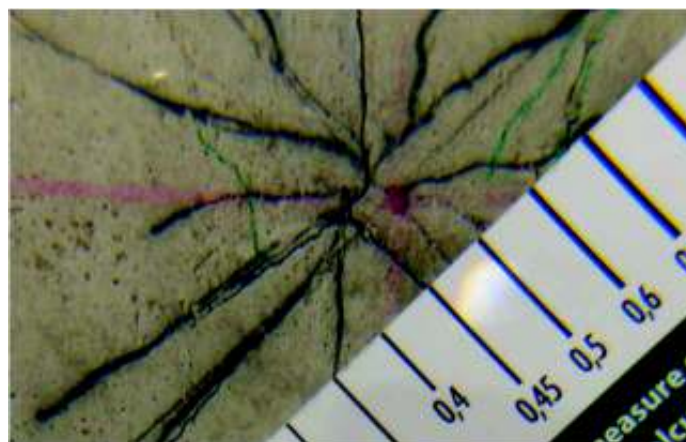
M 4.2 b – 1 x 1.0 m fața inferioară (detaliu)



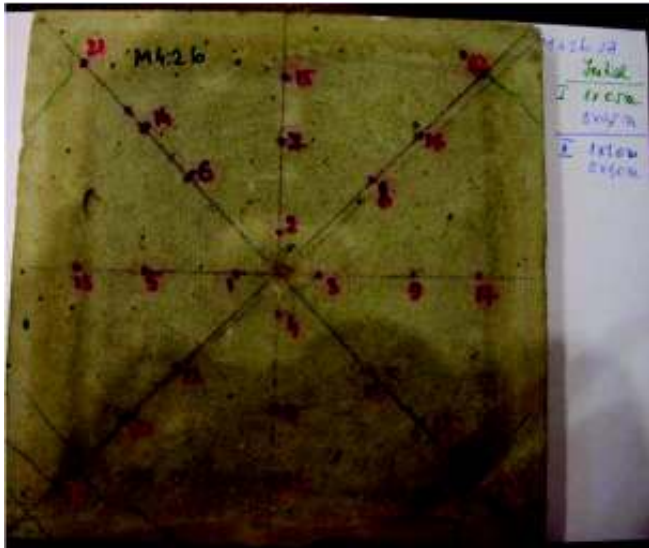
M 4.2 b – 1 x 1.0 m, fața inferioară (detaliu)



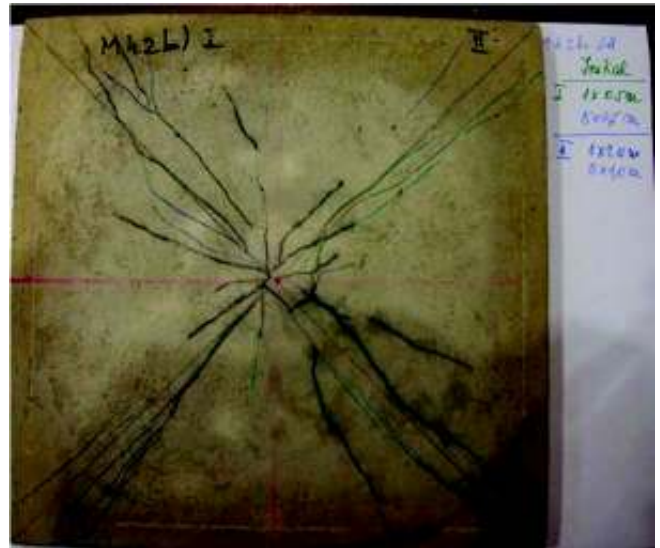
M 4.2 b – 1 x 1.0 m, fața inferioară (detaliu)



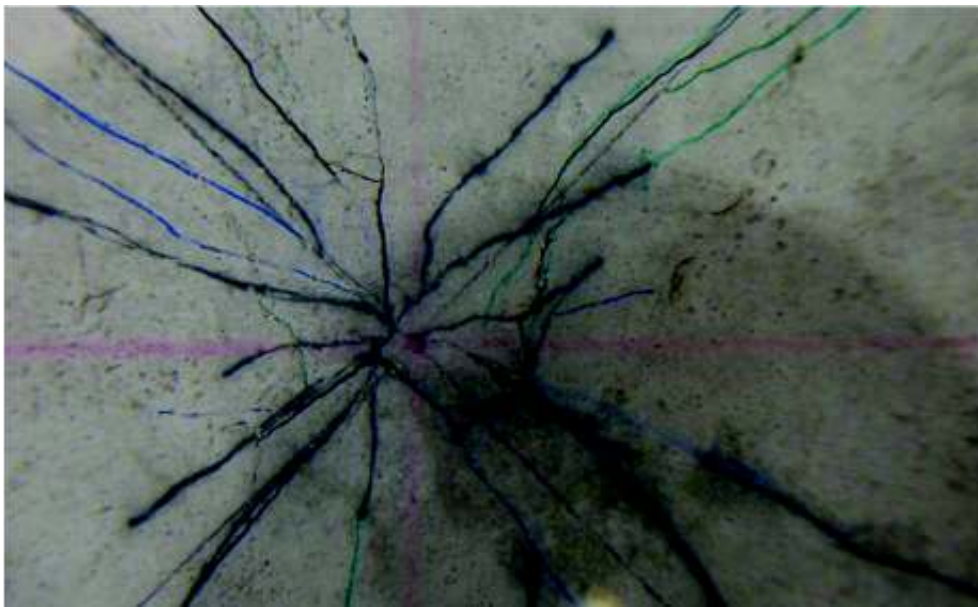
M 4.2 b – 5 x 1.0 m fața superioară



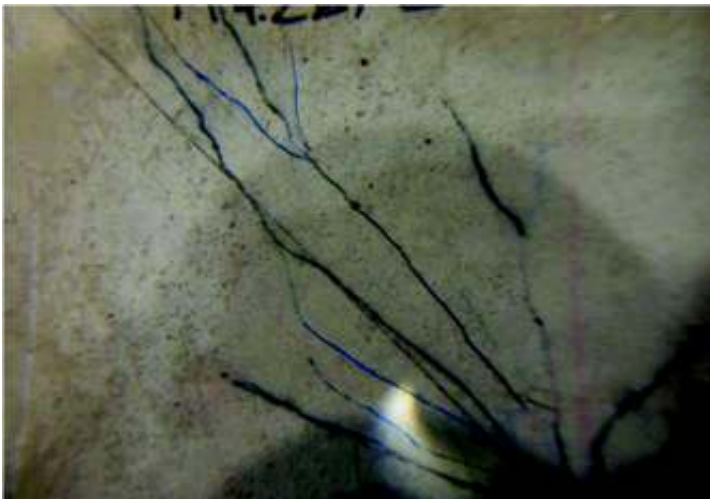
M 4.2 b – 5 x 1.0 m fața inferioară



M 4.2 b – 5 x 1.0m SH fața inferioară (detaliu)



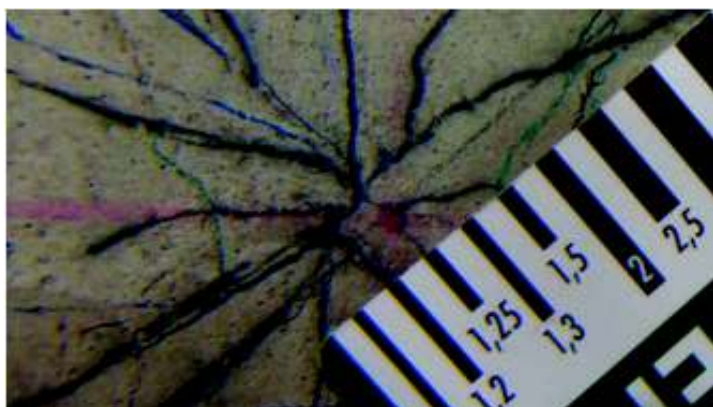
M 4.2 b – 5 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)



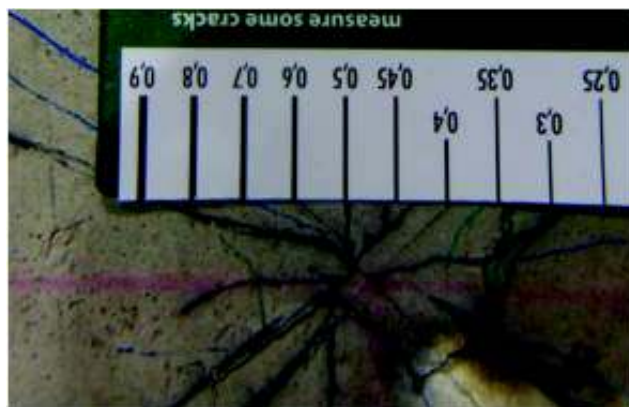
M 4.2 b – 5 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)



M 4.2 b – 5 x 1.0m,fața inferioară (detaliu)

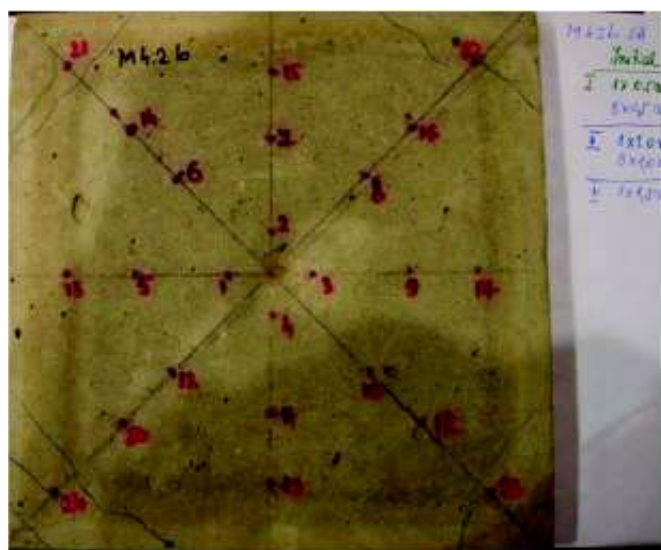


M 4.2 b – 5 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)

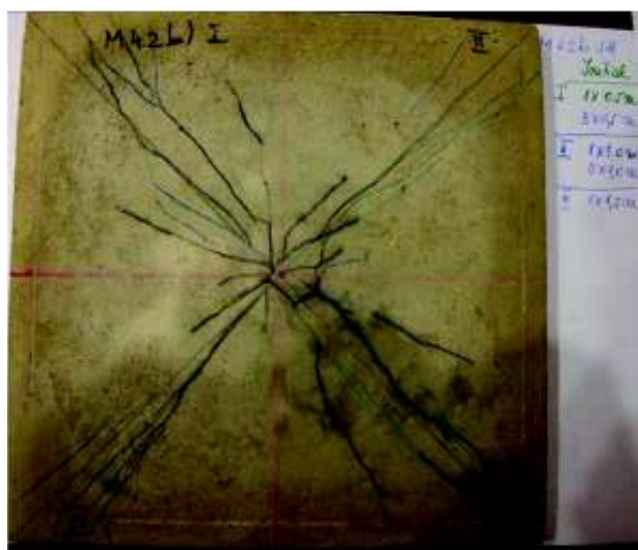


Ciclul II – 5 x 1.0m

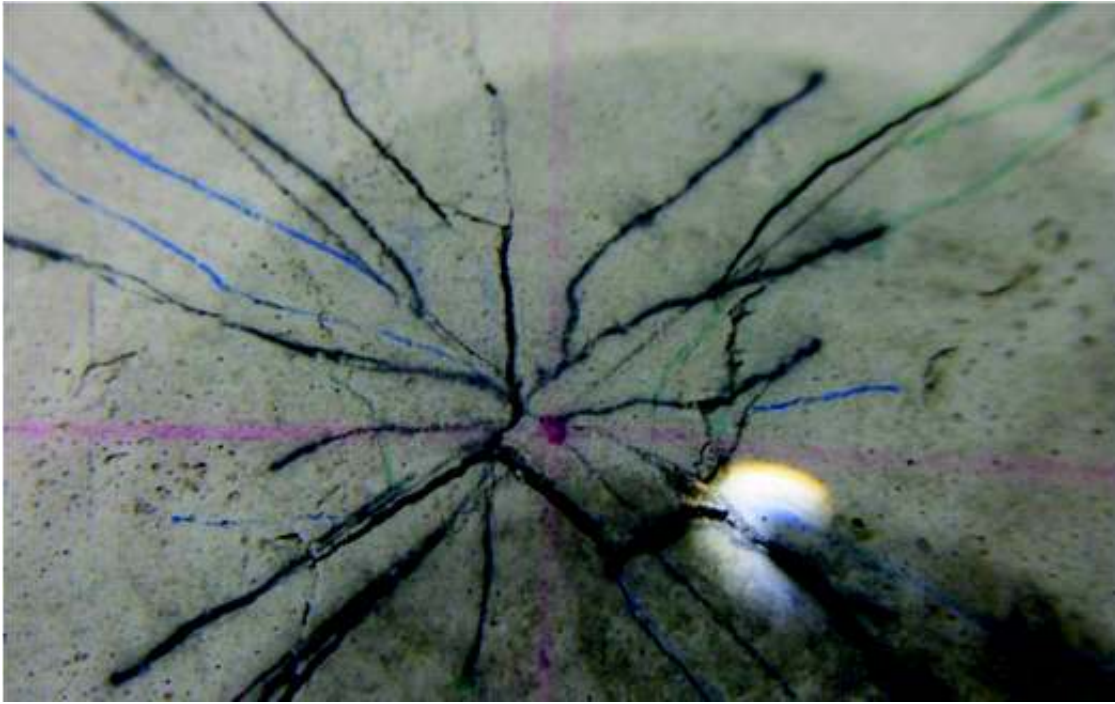
M 4.2 b – 1 x 1.5 m, fața superioară



M 4.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară



M 4.2 b – 1 x 1.5 m fața inferioară (detaliu)

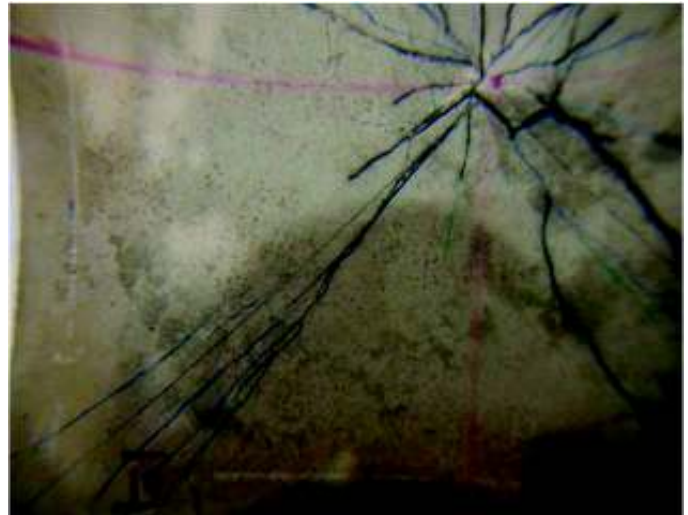


M 4.2 b – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)

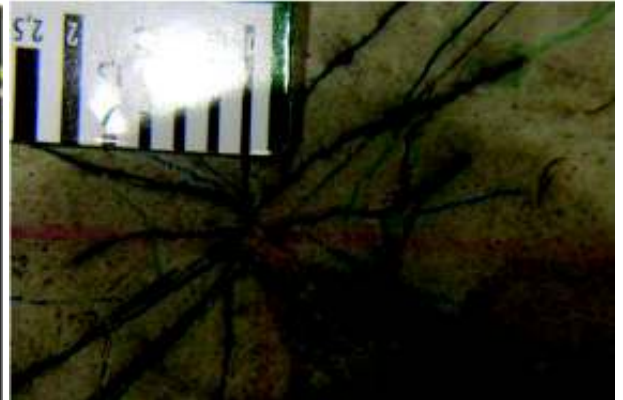
M 4.2 b – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



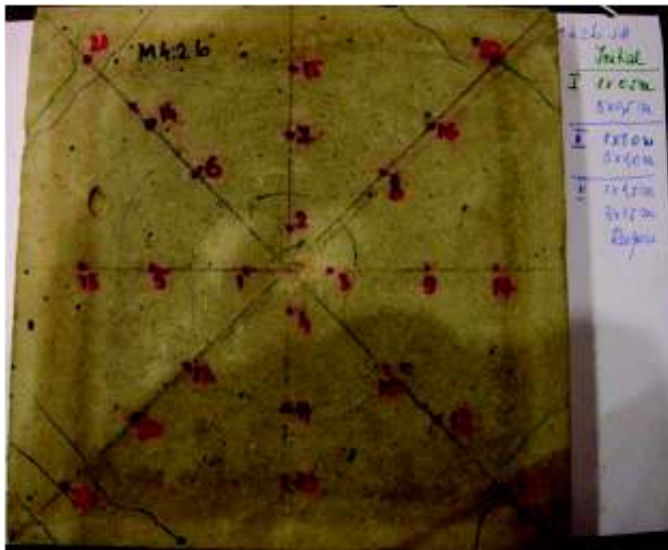
M 4.2 b – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



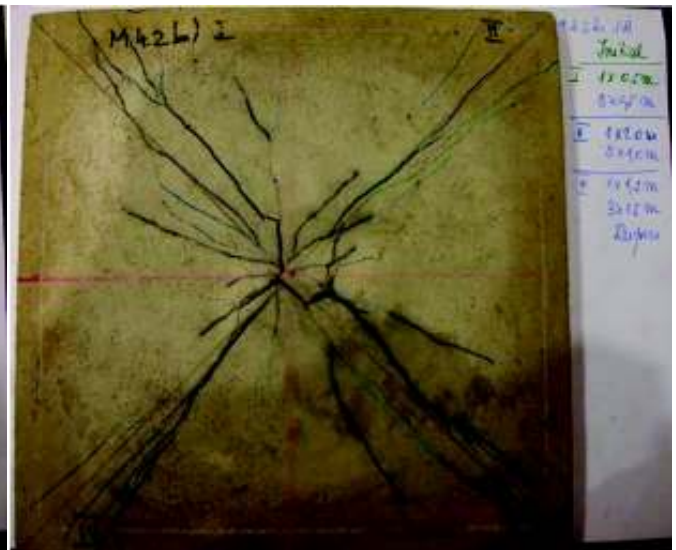
M 4.2 b – 1 x 1.5 m, fața inferioară (detaliu)



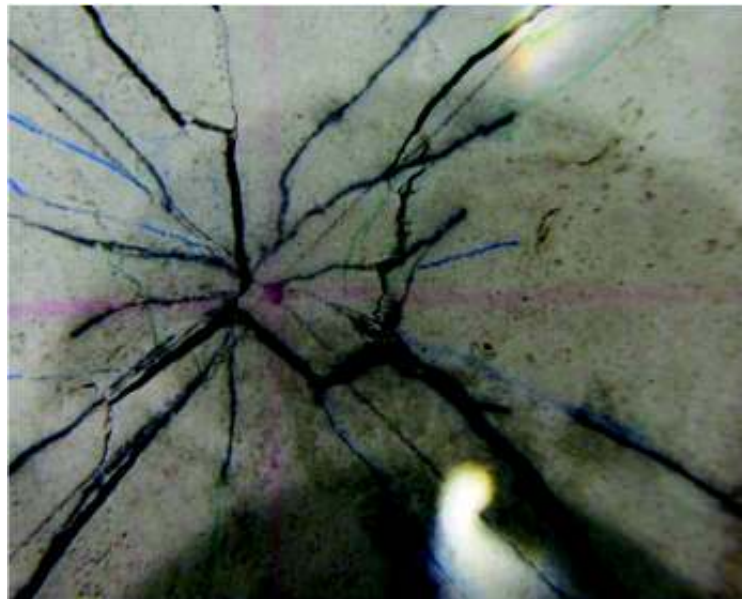
M 4.2 b – 3 x 1.5 m fața superioară



M 4.2 b – 3 x 1.5 m fața inferioară



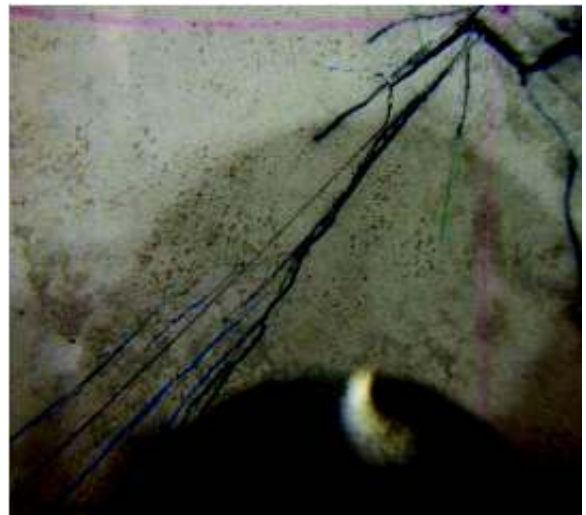
M 4.2 b – 3 x 1.5m, fața inferioară (detaliu)



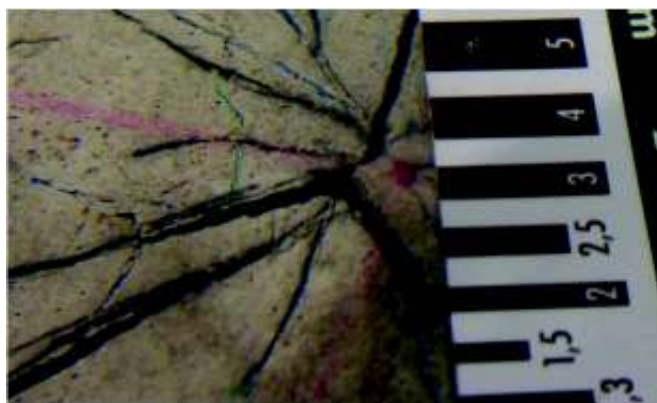
M 4.2 b – 3 x 1.5m, fața inferioară (detaliu)



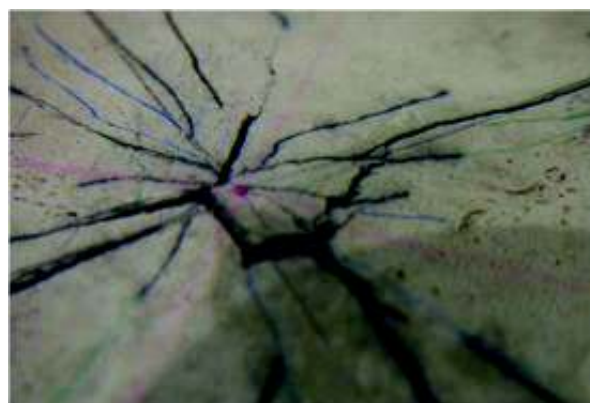
M 4.2 b – 3 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)



M 4.2 b – 3 x 1.5m, fața inferioară (detaliu)



M 4.2 b – 3 x 1.0m, fața inferioară (detaliu)



LISTA LUCRĂRILOR ȘTIINȚIFICE PUBLICATE PE DURATA STAGIULUI DE STUDII DOCTORALE

1. Baeră C, Mircea C., Szilagyi H., (2013) „*Considerations regarding self-healing phenomenon of concrete elements*”, Proceedings of The 9th Central European Congress on Concrete Engineering”CCC 2013, Wroclaw, Polonia, ISBN 978-83-7125-229-7, page 188-191.
2. Cornelia BAERĂ, Henriette SZILAGYI, Mircea PĂSTRĂV, Carmen DICO, Gabriela CĂLĂTAN, „*Self-healing capability of engineered cementitious composites (ECC)*”, A șasea ediție a conferinței de cercetare în construcții, economia construcțiilor, arhitectură, urbanism și dezvoltare teritorială „Vechi și Nou în Urbanism, Arhitectură și Construcții”, 18 octombrie 2013, București, România.
3. Henriette Szilagyi, Cornelia Baeră, Mircea Păstrav, Ofelia Corbu, Attila Puskas, „*Recycled aggregate concrete properties*”, A șasea ediție a conferinței de cercetare în construcții, economia construcțiilor, arhitectură, urbanism și dezvoltare teritorială „Vechi și Nou în Urbanism, Arhitectură și Construcții”, 18 octombrie 2013, București, România.
4. Baeră C, Mircea A., Szilagyi H., (2013) „*Engineered Cementitious Composites (ECC). General aspects*” - Proceedings of international association for shell and spatial structures (IASS) WG 18 International Seminar on Environmentally Compatible structures (ECS), November 7-9, 2013, Cluj Napoca, Romania.
5. Cornelia BAERĂ, Henriette SZILAGYI, Carmen DICO, Attila PUSKAS, Horia CONSTANTINESCU (2014), „*Inovarea – direcție generală în conceptul global al cercetării*”, A Șaptea ediție a conferinței de cercetare în construcții, economia construcțiilor, arhitectură, urbanism și dezvoltare teritorială „Competitivitatea durabilă”, București, 9 mai 2014”, București, România.
6. Cornelia BAERĂ, Mircea PĂSTRĂV, Henriette SZILAGYI, Călin MIRCEA, Corbu, Carmen DICO, Horia CONSTANTINESCU “*Engineered cementitious composites (ECC) – self-healing potential by crack control means*”, Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO - SGEM2014, Albena, Bulgaria, 17.06.2013-26.06.2014), vol. Nano, Bio and Green – Technologies for Sustainable Future, ISBN 978-619-7105-21-6 / ISSN 1314-2704, page129 – 136 (**ISI PROCEEDINGS**).
7. Mircea Păstrav, Cornelia Baeră, Henriette Szilagyi, „*Self managing buildings*” Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO - SGEM2014, Albena, Bulgaria, 17.06.2013-26.06.2014), vol. Nano, Bio and Green – Technologies for Sustainable Future, ISBN 978-619-7105-21-6 / ISSN 1314-2704, page 283-290 (**ISI PROCEEDINGS**).
8. Henriette Szilagyi, Ofelia Corbu, Cornelia Baera,Attila Puskas, Mircea Pastrav „*Opportunities for building materials waste recycling*” –, Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO - SGEM2014, Albena, Bulgaria, 17.06.2013-26.06.2014), vol. Nano, Bio and Green – Technologies for Sustainable Future, ISBN 978-619-7105-21-6 / ISSN 1314-2704, page 251-258 (**ISI PROCEEDINGS**).
9. Cornelia BAERĂ, Henriette SZILAGYI, Andrea MIRCEA, ”*Self-healing behavior of concrete cracks*”, Proceedings of „Concrete Solutions 2014, 5th International Conference on Concrete Repair, 1st-3rd Sept. 2014 - Queen's University, Belfast, UK, ISBN 978-1-138-02708-4, page 47 – 50 (**ISI PROCEEDINGS**).
10. Cornelia BAERĂ, Călin MIRCEA, ”*Self-healing capacity of engineering cementitious materials*”, Book of Abstracts of the 10th International ESEDIMA Conference, 18-19 Sept 2014, Cluj Napoca, Romania, Sustainable Future, ISBN 978-973-606-526-183-9, page 9.
11. Cornelia Baeră, Henriette Szilagyi, Mircea Păstrav, Carmen Dico (2014), „*Materiale cementoase SH – FECM*”, Rezumattele lucrărilor Celei de-a Opta ediție națională cu participare Internațională a Conferinței de Cercetare în Construcții, Economia

- Construcțiilor, Arhitectură, Urbanism și Dezvoltare Teritorială “DEZVOLTAREA DURABILĂ A MEDIULUI CONSTRUIT – DE LA VIZIUNE LA REALITATE”, 3 oct. 2014, București, România, ISSN 2343-7537 pag. 79-81.
12. Mircea Păstrav, Carol Enyedi, Horia Constantinescu, Gheorghe Bărbos Cornelia Baeră (2014), „*Structuri sustenabile de beton armat cu noduri hibride spațiale asamblate prin precomprimare*”, Rezumatlele lucrărilor Celei de-a Opta ediție națională cu participare Internațională a Conferinței de Cercetare în Construcții, Economina Construcțiilor, Arhitectură, Urbanism și Dezvoltare Teritorială “DEZVOLTAREA DURABILĂ A MEDIULUI CONSTRUIT – DE LA VIZIUNE LA REALITATE”, 3 oct. 2014, București, România, ISSN 2343-7537 pag. 77-78.
 13. Corbu O., Puskas A., Szilagyí H., Baeră C., (2014) „*C16/20 Concrete strength class design with recycled aggregates*”, JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES 10, ISSN / ISSN-L. 2247-3769 /e-ISSN 2284-7197, page 13-18.
 14. Păstrav M., Baeră C., Florea D., „*Efficient Moment Frame Structure, Proceedings of ICCSGE 2014*”: XII International Conference on Concrete, Structural and Geotechnical Engineering, December 22-23, 2014, Istanbul, Turkey, page 1183-1188.
 15. Szilagyí H., Ioani A., Corbu O., Baera C. (2015), „*Self-compacting concrete with fine waste powders*”, în: STEF 92 Technology Ltd. (editor) „15th INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SGEM 2015 Nano, Bio and Green – Technologies for a Sustainable Future CONFERENCE PROCEEDINGS Volume II, GREEN BUIDINGS TECHNOLOGIES & MATERIALS, GREEN DESIGN & SUSTAINABLE ARCHITECTURE, 630 pag., ISBN 978-619-7105-43-8 / ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2015B62, [volum indexat în bazele de date Thomson Reuters ISI Web of Knowledge, ELSEVIER products:SCOPUS, CrossRefDatabase, CrossRef Cited By Linking, ProQuest & GeoRef, EBSCO, Mendeley, CiteULike, UlrichsWeb, British library], pag. 281-286.
 16. Constantinescu H., Cazan O. E., Pastrav M., Baera C. (2015), „*Pure shear behavior of high strength concrete elements*”, Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO – SGEM 2015, Albena, Bulgaria, 16-25.06.2015, volumului I, NANO, BIO AND GREEN – TECHNOLOGIES FOR A SUSTAINABLE FUTURE, ISBN 978-619-7105-42-1 / ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2015B61, Secțiunea MICRO AND NANO TECHNOLOGIES: 187-192, [volum indexat în bazele de date Thomson Reuters ISI Web of Knowledge, ELSEVIER products:SCOPUS, CrossRefDatabase, CrossRef Cited By Linking, ProQuest & GeoRef, EBSCO, Mendeley, CiteULike, UlrichsWeb, British library].
 17. Baeră C., Mircea C., Szilagyí H. (2015), „*Cementitious materials with improved self-healing potential*”, in: Transilvania University of Brasov, Faculty of Materials Science and Engineering, 9th International Conference On Materials Science & Engineering - BraMat 2015, Book of Abstract, page 112
 18. Baeră C., Mircea C., Szilagyí H. (2015), „*Analysis of self-healing potential of advanced cementitious composites – preliminary compositions and experimental results*”, in: ICSHM Conference, Durham NC, SUA, 2015, Fifth International Conference on Self – Healing Materials, Abstracts Oral Presentations, page 43 of 91.
 19. Baeră C., Mircea C., Szilagyí H., (2015) „Cementitious materials with improved self-healing potential”, Construcții 1, [clasificarea revistei conform CNCSIS: B+, cod 145, ISSN 1221-2709].
 20. Baeră C., Szilagyí H., Păstrav M., Dico C. (2015), „*Materiale cementoase SH – FECM: Program experimental de îmbunătățire a compozițiilor inițiale*”, în: Conferința de cercetare în construcții, economia construcțiilor, urbanism și amenajarea teritoriului, Rezumate ale lucrărilor, ISSN 2343-7537, pag. 26 [română], pag. 74 [engleză] disponibil la <http://www.incd.ro/wp-content/uploads/2015/04/ATUAC9.pdf>.

21. Cornelia BAERĂ, Mircea PĂSTRĂV, Henriette SZILAGYI (2015), *Cementitious composites with self-healing capacity as beam-column interface material for antiseismic hybrid joint*, în: Sandu A. V. & Sandu I. G., Proceedings of the 7th edition of European Exhibitions of Creativity and Innovation EUROINVENT 2015, ISBN 978-606-13-2474-3, pag. 338.
22. Baeră C., Szilagyi H., Păstrav M., O. German, Dico C. (2015), „**ADVANCED CEMENTITIOUS MATERIALS SH – FECM: PRACTICAL APPLICATION**”, în: 10th edition of the research conference on constructions, economy of buildings, architecture, urban and territorial development INNOVATIVE CONCEPTS AND SOLUTIONS FOR ADAPTING TO CLIMATE CHANGES, Rezumate ale lucrărilor, ISSN 2343-7537, pag. 41 [română], pag. 113 [engleză].
23. Szilagyi H., Baeră C., (2015), „**WASTE POWDERS AS ECO ADDITIONS IN SELF-COMPACTING CONCRETE**”, în: 10th edition of the research conference on constructions, economy of buildings, architecture, urban and territorial development INNOVATIVE CONCEPTS AND SOLUTIONS FOR ADAPTING TO CLIMATE CHANGES, Rezumate ale lucrărilor, ISSN 2343-7537, pag. 47 [română], pag. 119 [engleză].
24. Cornelia BAERĂ, Mircea PĂSTRĂV, Henriette SZILAGYI (2015), *Cementitious composites with self-healing capacity as beam-column interface material for antiseismic hybrid joint*, INFOINVENT 2015, Chisinau, rezumatul disponibil la [<http://www.infoinvent.md/md/catalog.php> - Compartimentul IV Produse și servicii inovative].
25. Baeră C., Szilagyi H., Mircea C., Criel P. & De Belie N., *Concrete structures under impact loading: general aspects*, Urbanism. Architecture. Constructions, ISSN 2069-0509 (print) / 2069-6469 (on-line), Vol. 7-3 (2016), (<http://uac.incd.ro/EN/index.htm>) (**ISI JOURNAL**).
26. Cornelia BAERĂ, Mircea PĂSTRĂV, Henriette SZILAGYI (2016), *Development of advanced fiber reinforced cementitious composites as beam to column interface material for antiseismic hybrid joint*, în: Sandu A. V. & Sandu I. G., Proceedings of the 8th edition of European Exhibitions of Creativity and Innovation EUROINVENT 2016, ISBN 978-606-775-212-0, page 414.
27. Henriette SZILAGYI & Cornelia BAERĂ, (2016), *Volcanic tuff aggregates for lightweight concrete masonry blocks production*, în: Sandu A. V. & Sandu I. G., Proceedings of the 8th edition of European Exhibitions of Creativity and Innovation EUROINVENT 2016, ISBN 978-606-775-212-0, page 429.
28. Baeră C., Szilagyi H., Dico C. (2016), „**Concrete structures subjected to impact loading: general approach**”, in: Book of abstracts of the 11th edition of the research conference on constructions, economy of buildings, architecture, urban and territorial development “INTEGRATED RESEARCH FOR RESILIENT, COMFORTABLE AND SAFE CITIES”, May 13th 2016, ISSN 2343-7537, (<http://www.incd.ro>).
29. Baeră C., Păstrav M., Szilagyi H., German O. & Constantinescu H., *Fibre engineered cementitious materials (FECM) as beam to column monolithic interface within seismic resistant hybrid joint*, Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO – SGEM 2016, Albena, Bulgaria, 28.06.-07.07.2015, vol. I, NANO, BIO AND GREEN – TECHNOLOGIES FOR A SUSTAINABLE FUTURE, 2016, (**ISI PROCEEDINGS**) – **PREMIUL PENTRU CEA MAI BUNĂ PREZENTARE ORALĂ ÎN CADRUL SECȚIUNII GREEN BUILDINGS TECHNOLOGIES AND MATERIALS**.
30. Baeră C., Snoeck D., Szilagyi H., Mircea C. & De Belie N., *Dynamic loading performance of fibre engineered cementitious materials with self-healing capacity (SH-FECM)*, Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO – SGEM 2016, Albena, Bulgaria, 28.06.-07.07.2015, vol. I, NANO, BIO AND GREEN – TECHNOLOGIES FOR A SUSTAINABLE FUTURE, 2016, (**ISI PROCEEDINGS**).

31. Szilagyi H., Baeră C., Corbu O. & Puskás A., ***Research and valorization of volcanic tuff aggregates in lightweight concrete***, Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO – SGEM 2016, Albena, Bulgaria, 28.06.-07.07.2015, vol. I, NANO, BIO AND GREEN – TECHNOLOGIES FOR A SUSTAINABLE FUTURE, 2016, **(ISI PROCEEDINGS)**.
32. Szilagyi H., Baeră C., Lăzărescu A. & Ioani A., ***Geopolymer - the alternative, green building material***, Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO – SGEM 2016, Albena, Bulgaria, 28.06.-07.07.2015, vol. I, NANO, BIO AND GREEN – TECHNOLOGIES FOR A SUSTAINABLE FUTURE, 2016, **(ISI PROCEEDINGS)**.
33. G.R. Mircea, A. Faur, A. Harcsa, M. Mulea & C. Baeră, „Cyclic response of large lightly reinforced concrete walls made of plain and fibre concrete”, Proceedings of „Concrete Solutions 2016, 6th International Conference on Concrete Repair, 20-22 June Sept. 2014 - Thessaloniki, Greece”, ISBN 978-1-138-02708-4, pp. 370 – 377, **(ISI PROCEEDINGS)**.

PREMII OBȚINUTE LA CONCURSURI ȘI EXPOZIȚII INTERNAȚIONALE

- **Ediția a 7-a Expoziției Europene a Creativității și Inovării EUROINVENT (7th EUROPEAN EXHIBITION OF CREATIVITY AND INNOVATION EUROINVENT IASI):**
 - Medalie de aur: *CEMENTITIOUS COMPOSITES WITH SELF-HEALING CAPACITY AS BEAM-COLUMN INTERFACE MATERIAL FOR ANTISEISMIC HYBRID JOINT* – autori: . Baeră, M. Păstrav, H. Szilagyi;
- **Ediția din 2015 a Expoziției Internațională Specializată INFOINVENT, 24-28 noiembrie 2015, Chisinau):**
 - Medalie de bronz: *CEMENTITIOUS COMPOSITES WITH SELF-HEALING CAPACITY AS BEAM-COLUMN INTERFACE MATERIAL FOR ANTISEISMIC HYBRID JOINT* – autori: . Baeră, M. Păstrav, H. Szilagyi.
- **Ediția a 8-a a Expoziției Europene a Creativității și Inovării EUROINVENT 19-21 Mai 2016 (8th EUROPEAN EXHIBITION OF CREATIVITY AND INNOVATION EUROINVENT IASI, 19-21 May 2016):**
 - Medalie de aur: *Development of advanced fiber reinforced cementitious composites as beam to column interface material for antiseismic hybrid joint* – autori: Baeră, M. Păstrav, H. Szilagyi;
 - Medalie de aur: *Volcanic tuff aggregates for lightweight concrete masonry blocks production* – autori: H. Szilagyi & C. Baeră.
- **Premiul pentru cea mai bună prezentare în cadrul sesiunii din 06.07.2016, Secțiunea GREEN BUILDINGS TECHNOLOGIES AND MATERIALS**, pentru lucrarea C. Baeră, M. Păstrav, H. Szilágyi, O. Gherman & H. Constantinescu, (2016), “*Fibre engineered cementitious materials (FECM) as beam to column monolithic interface within seismic resistant hybrid joint*”

CONCRETE STRUCTURES UNDER IMPACT LOADING: GENERAL ASPECTS

Cornelia BAERĂ

Scientific researcher III degree, PhD student, Technical University of Cluj-Napoca, N.I.R.D. URBAN-INCERC Cluj-Napoca Branch, e-mail: cornelia.baera@incerc-cluj.ro

Henriette SZILAGYI

Scientific researcher II degree, PhD, N.I.R.D. URBAN-INCERC Cluj-Napoca Branch, e-mail: henriette.szilagyi@incerc-cluj.ro

Călin MIRCEA

Professor PhD, Technical University of Cluj-Napoca, Civil Engineering Faculty, Structural Department, e-mail: calin.mircea@bmt.utcluj.ro

Pieterjan CRIEL

PhD student, Magnel Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Ghent University, e-mail: Pieterjan.Criel@UGent.be

Nele De BELIE

Professor PhD, Magnel Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Ghent University, e-mail: nele.debelie@UGent.be

Abstract. Dynamic loading conditions distress the structural integrity of a structure differently than the static ones. Such actions transfer high rate strains and instant energy waves to the structure, inducing the possibility of imminent collapse and casualties as a direct consequence. In the latest years, considering the dramatic increase of terrorist threats and global warming, the structural safety criteria imply more than ever the need to withstand this kind of loading (e.g., missiles and blast, projectiles, strong winds, tornados and earthquakes) in addition to the static ones. The aim of this paper is to provide a general overview with regard to impact loading in terms of defining the phenomenon from physical and mechanical perspective, its complex local or global effect on the targeted structure, relevant material characteristics, main research approaches, namely theoretical studies and experimental procedures developed for improving the predictability of the dynamic loads and their effects. New directions in developing superior cementitious composites, with better characteristics in terms of dynamic loading performance are also emphasized.

Key words: dynamic load, concrete, fiber, strain rate, energy absorption

1. Introduction

It is generally known that besides static or quasi-static loads, extreme events (e.g., strong winds, earthquakes, impact hits, blasts and projectile missiles) causing accidental dynamic loading, can brutally affect structural integrity of civil infrastructure, leading to possible sudden collapse and unavoidable casualties. In comparison to the static actions, the predictability of dynamic loads and their effects on the structural elements remain as a real challenge.

Impact represents a severe dynamic load that initially was a major concern within the military research activities. The development of nuclear plants and the risk they unavoidably brought increased the interest for a deeper evaluation in order to determine the effects of this kind of accidental events on reinforced concrete structures and to develop methods and superior materials to counteract them. The latest years increased level of war and terrorism threats induced an imperative need for impact resistant structures and building materials with improved performance. As consequence, a large number of studies were performed: theoretical and/or analytical models were developed and confirmed or improved by adjacent experimental programs.

Additionally, various testing methods, addressing the material or structural performance were calibrated, in a clear attempt to develop impact resistant infrastructure design (Saatci, 2007).

Dynamic loading implies superposition of several physical and mechanical effects which lead to high strain rates and increased energetic peaks that structures have to overcome in a very short time interval. Structural response, local or global, involves a complex interaction of physical and mechanical material properties together with the geometric characteristics of the elements. It synthesizes the structure's capacity/ability to absorb and release the energy immediately after the hit reached the target, in terms of plastic or elastic deformations as absorbed energy and rebound effect which releases energy to the surrounding environment.

2. Impact - general aspects

Impact can be generally defined as a mass (i.e., the impacting mass) striking another mass (i.e., the impacted mass), under certain conditions of velocity, geometry and material properties of the impacting bodies. It represents a single cycle dynamic loading, unlike the earthquakes which are a multicyclic actions (Marchis *et al.*, 2013).

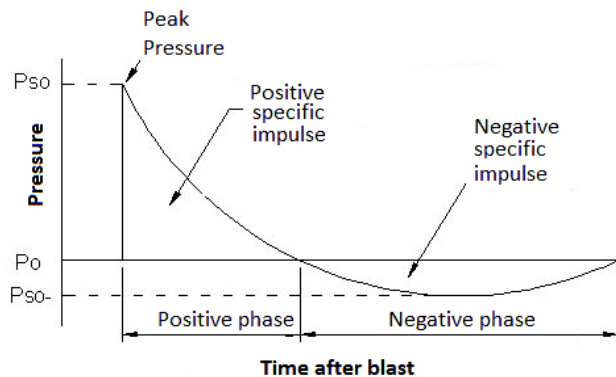


Fig. 1. Typical Blast Load: Pressure history (After Musselman, 2007)

According to Banthia there are two basic categories of impact loadings: single point impact loading (the effect of a missile-like object striking a structural element) and distributed impact loads, e.g., generated by blasts (Banthia, 1987). Further on, the single point impact will be mainly analyzed.

Regarding the second case, structures can be affected by several explosion factors: air blast (the wave of pressure hitting the target as first effect followed by the second one, in terms of the drag load, Fig. 1), primary and secondary fragments, shock of the foundation soil, fire and cratering (Musselman, 2007).

2.1. Impact Physics

There are two basic assumptions concerning the physics of the impact: 1) Conservation of momentum: defined as the product between the mass and velocity of a body, the total momentum of the two objects colliding is kept constant before and after collision:

$$m_1\Delta v_1 + m_2\Delta v_2 = 0 \tag{1}$$

where m_1, m_2 represent the masses of the colliding objects and $\Delta v_1, \Delta v_2$ are their velocities variation during the impact. 2) Conservation of the energy (Fig. 2): kinetic energy (E_k) remains equal to the potential energy (E_p).

Considering the simplified case of a moving object, called impacting body, hitting a standing body called the target with zero velocity in the relative reference system where the couple is placed, it can be stated that the kinetic energy of the striking body will be partially wasted due to the frictional processes (e.g., air or additional contact friction) and partially transferred to the impacted target in the form of stress waves, meaning strain energy and also plastic deformations. The engineering challenge in real structures would then be a proper estimation of their deformability capacity that would ensure their strength in case of accidental loading: the overall structure response has to range in the elastic interval, while still local inelastic deformation can be acceptable.

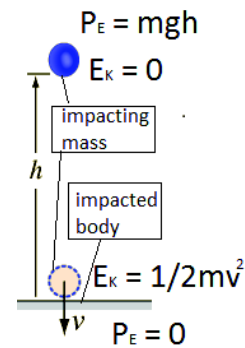


Fig. 2. Typical Impact Load – drop-weight: Conservation of Energy

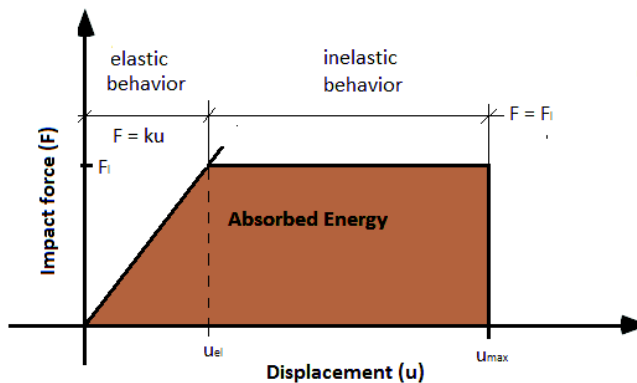


Fig. 3. The ideal elasto-plastic diagram of a body under impact

The ideal elastic model assumes a perfect elastic response of the target, ignoring all friction, damping and plastic deformation, considering only the resulting strain energy of the impact. On the contrary, in reality it will be impossible to avoid inelastic deformations of the impacted body, which can be used as damping solution of the system. From an economical point of view, repair of local damage is preferable to over-dimensioning the structural elements in order to achieve elastic behavior. Fig. 3 presents the perfect elasto-plastic response of an impacted structure.

The initial elastic interval assumes a linear variation of the impact load $F=ku$, where k and u represent the elastic constant, characterizing the ability of the impacted body to respond to the load, respectively the corresponding deformation. The linear variation stops where yielding starts (no further increase of the loading is possible, $F=F_l$, elastic limit load); the maximum elastic deformation (u_{el}) can be expressed as the F_l/k ratio. The maximum allowed displacement, u_{max} , can be in practice imposed to the value that still ensures the global overall stability of the structure, namely the maximum plastic energy absorption capacity before collapse. The ductility factor μ can be defined as the ratio between the total allowed deformation to the elastic one $\mu=u_{max}/u_{el}$ and it characterizes the energy adsorption capacity of the structure.

The marked area in the diagram (Fig. 3) represents the energy absorbed by the structure when yielding also occurs and the displacement continues without a force increase. The energy conservation principle allows the equality between the energy absorbed by the structure and the

work performed by the impact load acting on it:

$$Fu_{max} = \frac{1}{2}F_l u_{el} + F_l(u_{max} - u_{el}) \quad (2)$$

or

$$\frac{F_l}{F} = \frac{2\mu}{2\mu - 1} \quad (3)$$

Considering the allowed damage to the structure and assuming an expected impact load, from relations (2) or (3) results the required elastic deformation capacity under an accidental impact.

2.2. Possible Impact

When analyzing a collision situation, the ratio of the colliding masses is considered crucial (Banthia, 1887). Three distinct situations can be identified: 1) The mass of the impacting body (m_1) is substantially larger than the target mass (m_2); 2) The ratio m_1/m_2 is approximately equal to 1; 3) m_1 is substantially smaller than the target mass m_2 . The first case is quite rarely met in real structural collisions; the second case involves a global effect on the target (see Fig. 4) and the third one implies only a local effect on the target (Fig. 5).

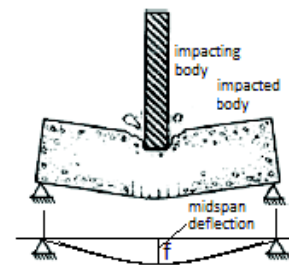


Fig. 4. Global effect of target after missile impact (after Kennedy, 1976)

Local damage can include penetration associated with spalling particles (Fig. 5, a), scabbing as a more severe step (Fig. 5, b), and also complete perforation (Fig. 5, c).

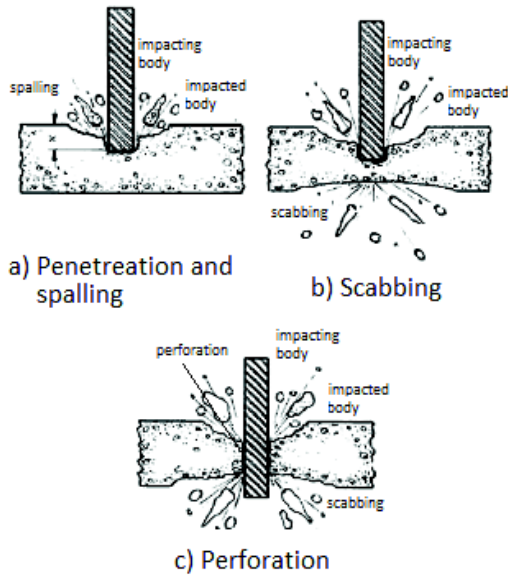


Fig. 5. Local effect of target after missile impact (after Kennedy, 1976)

The impact effect on the target depends also on several other factors, like the toughness ratio of the two colliding bodies and the impact velocity. In the same time, the impacted body might suffer a combination of both, local and global effects (Saatci, 2007).

Taking into account the striking velocity of an impacting body there are two major categories of impact events: high speed impact, ranging from 150 m/s to 1000 m/s (e.g., the case of blast or projectiles) or low speed impact (drop-weight), around just a few m/s.

Hard impact is when the striking object undergoes insignificant deformations in comparison to the target, and soft impact when the striking object develops important damage (Saatci, 2007; Ong *et al.*, 1999).

2.3. Impact mechanics

When a dynamic load is acting, large amounts of stress will be transmitted in short duration to the structural elements, which would have to be able to prove

increased deformation capacity for sudden collapse avoidance. Consequently, the structure and the material within would have to possess both strength (for spalling and perforation prevention) and ductility (in terms of energy absorption by the means of strain capacity) (Zhang *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007).

The way impact affects the target has a complex nature: despite that initially a compressive wave is generated on the impacted side, as soon as it hits the distal (i.e., boundary free) side of target, it is reflected as tensile stress (Yang and Li, 2012). Fig. 6 shows the stress conversion from compression (blue color) to tensile stress wave (red color) along four distinct, chronological steps.

The stress state generated in the impacted structure undergoes also crushing shear and tensile fracturing (Ramesh *et al.*, 2013), involving interference of material mechanical properties: compressive and tensile strength, toughness, capacity of energy absorbing and dissipation in an extreme short duration, ductility and deformation ability; except from that, ability to withstand spalling and scabbing effects (see Fig. 4 and Fig. 5) and resistance to multiple-impact actions are also essential material and structural characteristics, together with increased *strain rate performance*.

3. Concrete behavior under impact

As previously mentioned, tensile stress is a direct and important effect of the impact loading. The tensile and flexural strength of cement-based composites is significantly lower in comparison with their compressive performance. The concrete fracture toughness, relevant for the intrinsic material capacity to withstand brittle failure, is also quite

reduced (around $0.01\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), this affecting concrete structures ability to preserve their integrity under impact. Toughness is introduced as a measure for energy absorbing capacity in the inelastic state, namely resisting fracture when the cracked stage is already induced (Al-Oraimi *et al.*, 1995; Marar *et al.*, 2001).

3.1. Strain rate effect

Dynamic loads imply large amounts of stress transmitted almost instantly (single-cycled loads) to the structural concrete elements of the target, which would have to be able to prove increased deformation capacity for failure prevention. This aspect must be correlated with the strain rate sensitivity of the material, as key for a proper structural design, considering also the loading and boundary conditions of the system. In addition, increasing the complexity of the problem, cementitious composites properties are found to present consistent variations not only at different strain/stress loading rates, but also when different loading and supporting systems are used (Banthia, 1987).

Concrete properties, determined under static or quasi-static loading conditions, are not relevant for an accurate prediction of its performances under high stress rates type of loading, typically for dynamic loads, including impact (Banthia *et al.*, 1989). Several factors, like concrete heterogeneity, inelastic behavior and cement to aggregate variable bonding interface, make it really difficult to establish a general law to map the statically determined characteristics to the dynamic ones.

Cracking, cracking propagation under loading, speed of crack widening, their branching-type propagation pattern in the concrete mass, etc., are examples of mechanical processes that determine the concrete structural failure. In the same context, cracking features of the cementitious composites are crucial for the energy absorbing capacity (e.g., resilience and fracture toughness) and stress/strain rate sensitivity (Suaris and Shah, 1985; Maalej *et al.*, 2005).

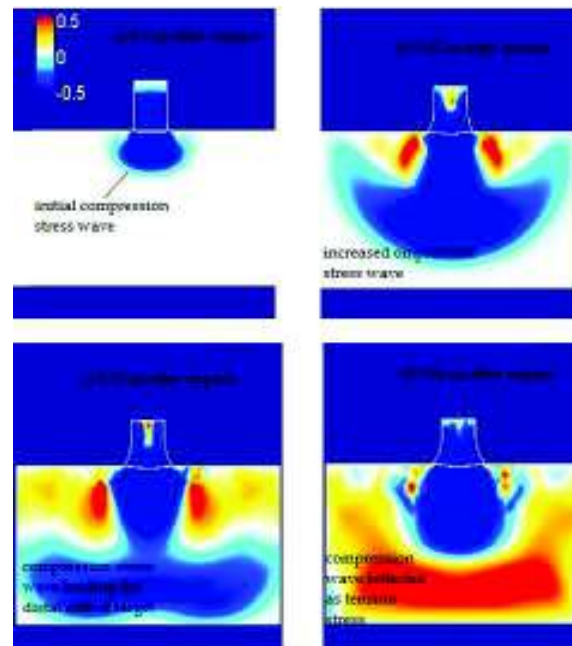


Fig. 6. Stress state under impact: numerical simulation (after Yang and Li, 2012; Shinozuka and Obikawa, 2007)

Dynamic loading and implicitly impact are associated to high strain rates. Some characteristic strain rates related to the loading type are mentioned by Musselman: static and quasi-static loading (e.g., creep) ranges from 10^{-7} to 10^{-6} m/m s⁻¹ (strain units per second); multi-cyclic dynamic, seismic type loading ranging from 10^{-3} to 10^{-2} m/m s⁻¹; hard impact, single-cycle load ranges from 10 to 1 m/m s⁻¹; and blast ranges from 10^2 to 10^3 m/m s⁻¹ (Musselman, 2007; Bischoff, and Perry, 1991).

The first attempts to identify and understand the causes of the strain/stress/loading rates sensitivity phenomenon started one hundred years ago when Abrams tested concrete cylinders in compression and noticed a significant increase of compressive strength when high loading rate was induced in the specimens (i.e., from impact testing) in comparison with the static test (Abrams, 1917). Other research showed that the general loading rate affects the ultimate compressive strength of concrete only along the second half of the loading interval (Banthia, 1987). Further research in the topic of compression strength under different strain rates

were performed by Watstein and also Green, leading to a basically similar conclusion, of an obvious strength increase depending on the loading rate (Watstein, 1953; Green, 1964).

Studies regarding the flexural strength variation of cement-based materials were performed (Zech and Wittmann, 1980), confirming the theoretical relation developed by Mihashi and Izumi, between the static and dynamic strength, as a function of the loading rate and a material parameter β (see Eq. 4), related to the general strength of concrete (Mihashi and Izumi, 1977).

$$\frac{f_d}{f_s} = (\frac{\sigma_d^*}{\sigma_s^*})^{1/(1+\beta)} \quad (4)$$

where f_d and f_s represent the dynamic and static strengths, σ_d^* and σ_s^* are the dynamic and static stress rates and β is a material parameter, which was found to increase as the material strengths increase (Zech and Wittmann, 1980).

Malvar and Ross reported a significant increase of the apparent strength at high strain rates ranging from 1 to 10 m/m s⁻¹: 50% for reinforcing steel, 100% for concrete in compression and over 600% for concrete in tension (Malvaar and Ross, 1998).

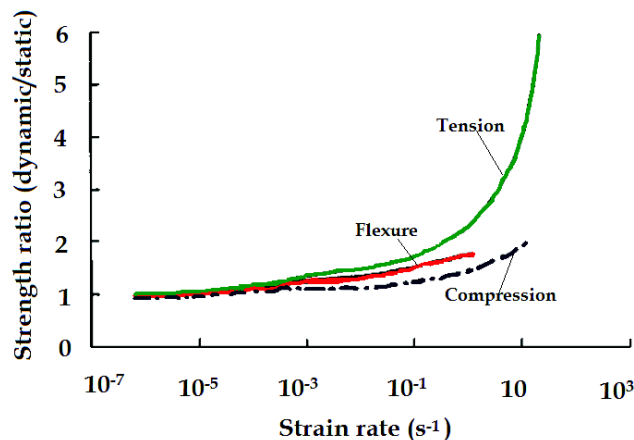


Fig. 7. Plain concrete strain rate effect sensitivity (after Suaris and Shah, 1982; Maalej *et al.*, 2005)

The ultimate strength gain of concrete as a function of the loading rate is considered to derive from two distinct inertial resistance related reasons. The first one is due to lack of time for the crack to find the weakest zone to propagate; instead it might progress through more resistant areas. In the same time, failure will require supplementary cracking events due to the discontinuity of the process (Bischoff and Perry, 1991).

Generally, it has been observed that tension and flexural stress in cement-based composites present higher strain rate sensitivity than the compressive stress, as shown in Fig. 7 (Suaris and Shah, 1982; Maalej *et al.*, 2005). The variation function of the ultimate strain related to the loading rate was found to be rather inconsistent (Fu *et al.*, 1991) in comparison with compressive strength and elastic modulus.

4. Fiber reinforced concrete behavior under impact

The addition of disperse fibers in the cementitious matrices proved to have

multiple benefits regarding the overall performance of concrete (Cazan *et al.*, 2014; Văgîi *et al.*, 2012). Starting with the second half of the last century, intensive research has been performed regarding the behavior of the new materials developed using several types of fibers: steel, glass, synthetic (e.g., Kevlar, polymeric fibers like PE, PP and PVA), even natural fibers, like flax or cotton. Apart from increase of the mechanical strength, mainly in tension and bending (Romualdi and Mandel, 1964), the failure pattern was improved by the reduction of brittleness under loading: the crack pattern involves multiple cracking (Fig. 8) and the crack control was modified in such manner that the so called “ductility” of concrete could be achieved, improving the energy absorption and toughness indices as well (Bhargava and Rehnström, 1977).

A problem is still in debate with regard to the compressive strength of concrete, as the fiber addition reduces the tightness of the matrix and some reduction of the compressive strengths have been noticed.

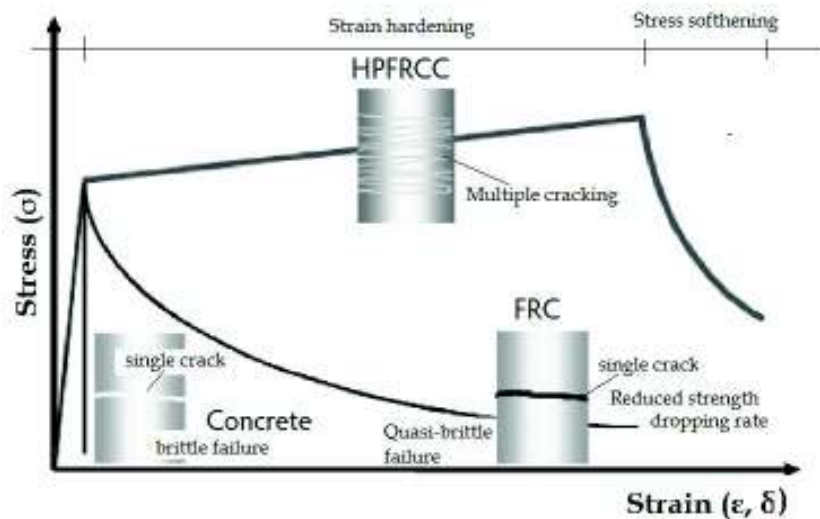


Fig. 8. Stress-strain diagram under uniaxial tension for plain concrete, FRC (Fiber Reinforced Concrete and HPRCC (after Li, 2008)

It has to be emphasized that fiber addition in the concrete induces an obvious improvement regarding spalling and scabbing, fragmentation, perforation and penetration, as usual phenomena when impact occurs. Fibers keep the matrix particles connected, preventing that spalling pieces would be transformed into dangerous flying projectiles, causing casualties.

There are several factors, fiber-type related, influencing the properties of the cement-based composites: the fiber material (e.g., steel, polymeric, glass, hybrid) and their basic characteristics, geometrical properties and orientation. The mixing and casting techniques are of critical importance too.

4.1. ACI Committee 544; Impact loading

Starting with the 70^{ties}, the ACI 544 Committee was formed in order to study and evaluate the use of fibers as disperse reinforcement in the cement-based composites. The original State-of-the-Art Report regarding design with Fiber Reinforced Concrete (FRC), first published in 1973 and revised in December 1983, was followed by “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete” ACI 544, 2R-89 (ACI Committee 544, 1989), first published in 1978, revised in 1893 and 1988 and reapproved in 2009. This latter report specifies several aspects related to the impact resistance of FRC, including some recommended testing methods to assess their performance. It is also stated that evaluating the impact resistance could involve: 1) Determination of energy necessary to induce fracture; 2) The number of blows in case of a multi-impact test; 3) The size and visual evaluation of the damage produced by impact.

The report includes seven potential testing methods: 1) Weighted pendulum

(Charpy) impact test, a method that initially was introduced for metal evaluation and then adjusted to the cement based energy absorption capacity; 2) Drop-weight test, for low velocity impact; 3) The constant strain-rate test; 4) The projectile impact test for high velocity impact; 5) The split-Hopkinson bar test for high strain rate in uniaxial tension and compression; 6) The explosive test; 7) Instrumented pendulum test (ACI Committee 544, 1989).

4.2. Engineered Cementitious Composites (ECC) under Impact

A special type of HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) is represented by ECC (Engineered Cementitious Composites), developed initially by Li. With the addition of a volumetric 2% content of fibers, a metal-like behavior, characterized by the strain hardening interval under loading, can be achieved, leading to a high strain effect and superior potential of energy absorption (Li, 1998, 2008). Superior toughness is reached too, as an intrinsic ability to develop bearing capacity after the cracked stage was reached (Maalej *et al.*, 1995; Li and Maalej, 1996). Furthermore, an improved impact resistance of the material is to be expected (Maalej *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007).

Regarding the loading rate sensitivity of HPFRC^s and particularly ECC^s, some studies confirmed that their strength increase can be more substantial than in the case of plain concrete, when high strain rates are applied. The strain capacity under loading seems to remain constant, independent of the stress rate (Maalej and Zhang, 2005; Habel and Gauvreau, 2005). As expected, the hybrid steel and PE fibers mix, showed improved resistance to fragmentation,

deformability capacity and high energy dissipation. All these characteristics were attributed to the typical microcracking behavior. In the same time Yang and Li (2012) obtained contradictory results: uniaxial tests were conducted using different strain rates, ranging from 10^{-5} m/m s⁻¹ (corresponding to quasi-static loading) to 10^{-1} m/m s⁻¹ (relevant for low-speed impact), on the most used PVA-ECC, namely ECC M45. They reached the conclusion of approximately 40 %, drop of the tensile strength in the case of high rate loading and also a dramatic loss of the apparent ductility; from 3.2 % (quasi-static) to a disappointing 0.8 % (high strain rate), in uniaxial tension. As a potential solution to counteract this inconvenience, a substantial increase of the fly-ash content of the matrix is proposed.

The lack of coarse aggregate in the ECC matrix makes this micro-material vulnerable to ballistic penetration, which induces a strong local effect: due to the high velocity of the impacting body and its reduced mass in comparison to the target's mass, there is a predominant local effect. In terms of blast, the energy absorption capacity of the material provides a general overall resistance, superior to the conventional concrete (Maalej and Zhang, 2005).

5. Conclusions

Dynamic loads are complex actions with complex effects on the structures: huge energetic waves converted instantly into high rate stresses that have to be endured by the structural members. The structural performance is depending on the geometry, boundary conditions and material characteristics. Optimum results imply the finding of a balance between the strength (e.g., for penetration and spalling prevention) and deformation

capacity (e.g., for energy absorption necessities) in terms of local or global effects.

The current strive for improved structural performance under all types of impact actions (soft and hard, high speed or low speed, etc.) determine the demand for better knowledge on this topic: generous databases regarding the testing methods and material and structural performance under impact, continuous development of design technics and new building materials, that can ensure safety when accidental loading occurs.

The addition of fibers in the concrete matrix proved to provide real benefits for the accidental loading. At the same time, further research is considered necessary, for extending the data base and establishing general and precise testing methodology, which could provide important data and essential characteristics for both, material and structure design criteria.

Acknowledgements

„ACKNOWLEDGEMENT: This paper is supported by the Sectorial Operational Programme Human Resources Development POSDRU/159/1.5/S/137516 financed from the European Social Fund and by the Romanian Government”.

REFERENCES

- Abrams D. A. (1917), *Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete*, ASTM J **17(2)**:70-78.
- ACI Committee 544. (1989), *Measurement of properties of fiber reinforced concrete*, ACI Materials Journal 583-593.
- Al-Oraimi S. K., Seibi A. C. (1995), *Mechanical characterisation and impact behaviour of concrete reinforced with natural fibres*, Composite Structures **32(1)**:165-171.

- Banthia N. P. (1987), *Impact resistance of concrete*, Doctoral Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Banthia N., Mindess S., Bentur A., Pigeon M. (1989), *Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine*, *Experimental Mechanics* **29**(1):63-69.
- Bhargava J., Rehnström Å. (1977), *Dynamic strength of polymer modified and fiber-reinforced concretes*, *Cement and Concrete Research* **7**(2):199-207.
- Bischoff P. H., Perry S. H. (1991), *Compressive behaviour of concrete at high strain rates*, *Materials and structures* **24**(6):425-450.
- Cazan O. E., Gherman M. C., Boldor R. P., Brata T. M. (2014), *Hybrid fiber reinforced HPC at elevated temperatures*, *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* **57**(2): 197-202.
- Fu H. C., Erki M. A., Seckin M. (1991), *Review of effects of loading rate on reinforced concrete*, *Journal of structural engineering* **117**(12):3660-3679.
- Green H. (1964), *Impact strength of concrete*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* **28**(3):383-396.
- Habel K., Gauvreau P. (2008), *Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPC) to impact and static loading*, *Cement and Concrete Composites* **30**(104):938-946.
- Kennedy R. P. (1976), *A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects*, *Nuclear Engineering and Design* **37**(2):183-203.
- Li V. C., Maalej M. (1996), *Toughening in cement based composites. Part II: Fiber reinforced cementitious composites*, *Cement and Concrete Composites* **18**(4):239-249.
- Li V. C. (1998), *Engineered Cementitious Composites - Tailored Composites Through Micromechanical Modeling*, in: Banthia N., Bentur A., Mufti A., *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, pp. 64-97.
- Li V. C. (2008), *Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance*, in: Nawy E., *Concrete Construction Engineering Handbook*, Chapter 24, CRC Press.
- Maalej M., Hashida T., Li V. C. (1995), *Effect of Fiber Volume Fraction on the Off-Crack-Plane Fracture Energy in Strain-Hardening Engineered Cementitious Composites*, *Journal of the American Ceramic Society* **78**(12):3369-3375.
- Maalej M., Quek S. T., Zhang J. (2005), *Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact*, *Journal of Materials in Civil Engineering* **17**(2):143-152.
- Malvar L. J., Ross C. A. (1998), *Review of strain rate effects for concrete in tension*, *Materials Journal* **95**(6):735-739.
- Marar K., Eren Ö., Celik T. (2001), *Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete*, *Materials letters* **47**(4):297-304.
- Marchis A. G., Moldovan T. S., Ioani A. M. (2013), *The influence of the seismic design on the progressive collapse resistance of mid-rise RC framed structures*, *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* **55**(2): 222-234.
- Mihashi H., Izumi M. (1977), *A stochastic theory for concrete fracture*, *Cement and Concrete Research* **7**(4):411-421.
- Musselman E. (2007), *Characterizing blast and impact resistance of long carbon fiber reinforced concrete*, Doctoral Thesis, Pennsylvania State University, USA.
- Ong K. C. G., Basheerkhan M., Paramasivam P. (1999), *Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact*, *Cement and Concrete Composites*, **21**(5):391-401.
- Ramesh K., Arunachalam K., Chakravarthy S. R. (2013), *Experimental Investigation on Impact Resistance of Flyash Concrete and Flyash Fiber Reinforced Concrete*, *International Journal of Engineering Research and Applications* **3**(2):990-999.
- Romualdi J. P., Mandel J. A. (1964), *Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement*, *Journal Proceedings* **61**(6):657-671.
- Saatci S. (2007), *Behaviour and modelling of reinforced concrete structures subjected to impact loads*, Doctoral Thesis, University of Toronto, Toronto, Canada
- Shinozuka J., Obikawa T. (2007), *High levels of hydrostatic stress at shear zone induced by plastic shock waves under ultra high-speed cutting conditions*, in: *Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*, pp. 357-364.
- Suaris W., Shah S. P. (1982), *Strain-rate effects in fibre-reinforced concrete subjected to impact and impulsive loading*, *Composites* **13**(2):153-159.

- Suaris W., Shah S. P. (1985), *Constitutive model for dynamic loading of concrete*, Journal of Structural Engineering, **111(3)**:563-576.
- Văgii V., Măgureanu C., Țibea C. (2012), *Ultra-high performance fiber reinforced concrete: "I" beams and prisms subjected to bending*, Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture **55(2)**: 114-120.
- Watstein D. (1953), *Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete*, Journal Proceedings **49(4)**:729-744.
- Yang E. H., Li V. C. (2012), *Tailoring engineered cementitious composites for impact resistance*, Cement and Concrete Research **42(8)**:1066-1071.
- Zech B., Wittmann F. H. (1980), *Variability and mean value of strength of concrete as function of load*, ACI Journal **77(5)**:358-362.
- Zhang J., Maalej M., Quek S. T. (2007), *Performance of hybrid-fiber ECC blast/shelter panels subjected to drop weight impact*, Journal of Materials in Civil Engineering **19(10)**:855-863.
- Zhang J., Maalej M., Quek S. T., Teo Y. Y (2005), *Drop weight impact on hybrid-fiber ECC blast/shelter panels*, Proceedings of third international conference on construction materials: performance, innovation and structural applications, Vancouver, Canada.

Received: 14 February 2016 • **Revised:** 24 March 2016 • **Accepted:** 25 March 2016

Article distributed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (CC BY-NC-ND)



**DYNAMIC LOADING PERFORMANCE OF FIBRE ENGINEERED
CEMENTITIOUS MATERIALS WITH SELF-HEALING CAPACITY (SH-
FECM)**

Senior Researcher Cornelia BAERĂ¹

PhD Didier SNOECK²

PhD Henriette SZILAGYI¹

PhD Călin MIRCEA³

Prof. Nele DE BELIE²

¹ NIRD “URBAN-INCERC” Cluj-Napoca Branch, **Romania**

² Magnel Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Ghent University, **Belgium**

³ Technical University of Cluj-Napoca, Civil Engineering Faculty, Structural Department, **Romania**

ABSTRACT

Structural performance under dynamic actions, apart from geometric characteristics, supports loading conditions, design methods, etc., is mainly related to the intrinsic material properties of the structural elements. Earthquake events, as typical examples of accidental dynamic loading, involve strong stress waves, induced in the structure in very short time intervals. Increased loading rates, difficult to withstand, are generated. Therefore, superior complementary characteristics, namely strength and ductility, are required in order to avoid sudden failure and, as direct consequence, casualties and economic losses.

Engineered Cementitious Composite (ECC), a unique type of mortar framed in the category of high-performance fibre-reinforced cementitious composites (HPFRCC), is defined by metal-like behaviour due to the multiple cracking patterns developed under applied loads. ECC proves an increased deformability potential and, as consequence ductility, which indicate a superior performance when subjected to dynamic actions. The multiple microcracking property of the composite, together with some specific matrix attributes and environmental conditions, also ensures an already proved self-healing potential [1], [2]. All these intrinsic material characteristics induce increased durability, considerable material and manpower reduction, improved structural performance and reduced repair and maintenance costs. Consequently, ECC is a valuable building material alternative and it is obvious that will bring a major to future sustainable development.

This paper presents the incipient evaluation of the dynamic performance of Fibre Engineered Cementitious Materials with Self-Healing potential (SH-FECM), developed using the ECC theoretical and applied design principles, in the terms of the strain rate sensitivity, which proves to be an essential and difficult to control parameter.

Keywords: microcracks, Engineered Cementitious Composites (ECC), crack control, self-healing capacity; loading rate sensitivity.

INTRODUCTION

It is generally accepted that dynamic loads act fundamentally different upon structures compared to the static or quasi static ones: there are increased energetic waves transmitted to the structure in relatively short time duration, implying raised loading/displacements, which become an important feature of the dynamic actions. Sudden collapse can occur, leading to life losses and important structural damage.

An earthquake is a complex dynamic loading with increased worldwide occurrence. Counteracting its fatal consequences can be seen as a general research and design challenge. The Cluj-Napoca Branch of the „URBAN-INCERC” National Research Institute for Construction Development in Romania focused since 2009 to develop an innovative concept in seismic design by post-tensioning hybrid precast frame structures. The critical spots of the tested models were identified as the narrow slots at the beam to column interface subjected to high local stresses, induced at raised strain rates. Therefore, it was decided to replace the filling grout with an advanced cement-based composite, with superior physical and mechanical characteristics. The general features of ECCs recommend them as a seismic performing material and a starting point for the development of SH-FECM by using local raw materials. Initial mix designs proved superior potential as intrinsic material characteristics and behaved properly during the full scale tests [3], [4] and [5].

Considering all above aspects, the evaluation of the ECC similar mixes by subjecting samples to dynamic loading was considered necessary to the overall evaluation of this kind of material. Next, first results of the theoretical and experimental program developed to investigate the dynamic performance of ECC are presented. Complementary, their self-healing potential is also assessed.

CONTEXT - SEISMIC RESISTANT HYBRID CONNECTION

Starting with 2009 two models of the hybrid seismic resistant joints were developed: first, the planar model and, starting with 2014, a new spatial model (Fig. 1).



Figure 1 Hybrid joints; critical interface zones: (1) Planar model; (2) Spatial model

SELF-HEALING FIBER ENGINEERED CEMENTITIOUS MATERIALS (SH-FECM)

The critical areas at the beam-column contact interface require a superior filling material, with adequate workability and ability to fill narrow slots. Moreover, a good behaviour with regard to high-rate compressive and tensile stresses is needed, by ensuring deformability capacity for energy absorption [6], [7].

The first mixes proved good performance when tested to quasi-static loading, like tensile and compression tests done in accordance to EN 196-1 procedures. The same adequate behaviour was noticed during quasi-static alternant loading (see Fig. 2). The tensile strength determined at the age of 20 days (when the first element was tested) using the 3-Point-Bending (3PB) loading scheme, was 5.0 MPa and the compressive strength, 60 MPa. The composite showed good bond strength to the support layer, more than 5 MPa as the rupture took place in the support, namely the concrete beam/column of the element. Figure 2 shows the important degradation signs induced in the concrete structural elements, like large visible cracks and material spalling but impressive behaviour of SH-FECM as interface material [8].

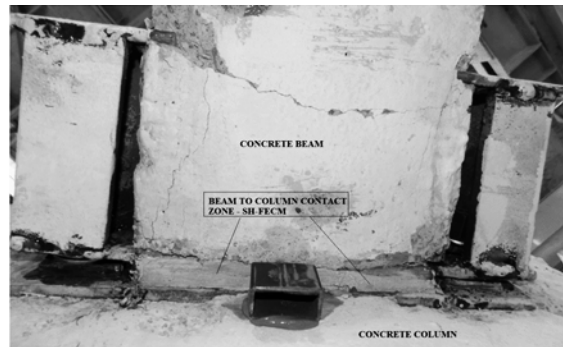


Figure 2 Hybrid spatial joint model after testing - critical interface zone, bottom view: good performance of SH-FECM, no spalling or large visible cracks

The Self-Healing potential of the composite was evaluated after 50 wet and dry curing cycles, considering both complementary directions [8]: (1) Self-Sealing – the prismatic specimens showed partial crack-closing under visual analyses (Fig. 3, a);

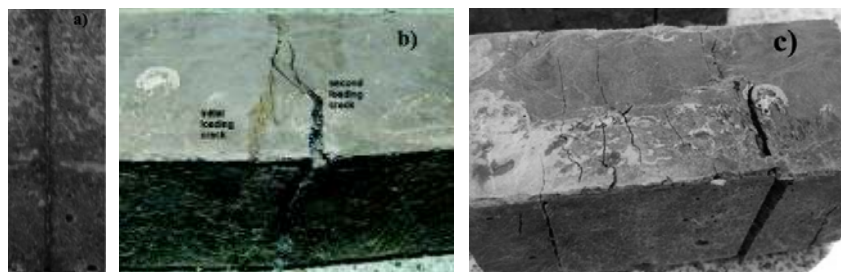


Figure 3 Self-Healing of SH-FECM specimens: a) Self-Sealing of cracks; b) Self-Repairing (distinct failure path when retesting); c) Micro-cracking under compression

(2) Self-Repairing – the prismatic specimens, initially loaded in 3PB until reaching the 90% of the bearing capacity were re-tested in the same condition after exposure to the curing cycles, showing tensile recovery ranging from 85 up to 100%, with respect to the strength determined at the age of 20 days. Supplementary, the healing products

developed in the cracks were strongly enough so the re-testing of one specimen produced a different crack as failure pattern, distinct from the initial one (Fig. 3, b). The compressive resistance, determined on the half prisms after the tensile re-testing, is of 72.0 MPa (Fig. 3, c) [8].

DYNAMIC PERFORMANCE OF FECM

The first testing procedures for the initial SH-FECM mix designs were performed under quasi-static loading, as previously mentioned; for a more complex material evaluation dynamic characteristics should be analysed. Load (-strain) rate sensitivity is identified as a crucial parameter for the material capacity of undertaking increased stress waves developed when subjected to accidental, dynamic loadings like blast, impact or seism [6], [7]. Loading rate sensitivity of Fibre Engineered Cementitious Materials was evaluated at Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University, Belgium by the means of studying several mixtures of cement-based composites with polymeric fibres as dispersed reinforcement, subjected to specific tensile tests using different loading rates.

1. Materials

The raw materials provided by Magnel Laboratory, are typical for an ECC mix: the binding system (B) is a 1 to 1 combination of Portland Cement (C), namely CEM I 52.5 N and class F Fly-Ash (FA); Silica Sand (S) as aggregate with maximum grain size 250 μm ; the High-Range Water Reducer (HRWR) polycarboxylate admixture is the BASF Glenium 51, (concentration 35%). A Belgium bicore Polypropylene (PP) was used as synthetic fibre, with a 6 mm length and 2% (by volume) content, as dispersed reinforcement of the mix. The essential characteristics of the raw materials are fully specified [9].

2. Mix Design

The analysed composite PP-M1.5 was designed taking into consideration as basic points: the classic ECC M45 [2], the initial SH-FECM previously studied [8] and also the specific mix designs previously developed at Magnel Laboratory, including the mixing sequences, that involve shorter, more efficient mixing stages, adapted for small experimental batches [9]. The FA/C ratio was selected 1.0, distinct from the 1.2 ratio previously used. The BASF Glenium 51 HRWR reduces significantly the specific ratios W/B or L/B. Table 1 presents the relevant mix proportions.

Table 1 Mix proportion: ECC M 45 and SH-FECM

C	FA	C+FA	S	W	HRWR	L	PP	W/C	W/B	L/C	L/B
ECC M45											
1.0	1.2	2.2	0.8	0.79	0.01	0.8	0.2	0.58	0.26	0.59	0.27
SH – FECM											
1.0	1.2	2.2	0.8	0.82	0.04	0.8	0.2%	0.83	0.38	0.88	0.40
PP – M1.5											
1.0	1.0	2.2	0.7	0.6	0.023	0.62	0.2%	0.60	0.30	0.62	0.31

3. Testing method

3.1 Dynamic Performance

Prismatic specimens 40 x 10 x 160 mm (Fig. 4) were subjected to the specific ECC tensile tests, namely Four-Point Bending (4PB) using 4 different loading rates induced

in the terms of vertical displacement, converted into strain rates by considering the geometrical and the loading characteristics.

The loading/strain rates used for 4PB tests of the PP - M1.5 specimens:

- I. 0.0011 mm/s converted into the strain rate of $5.00 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$;
- II. 0.0055 mm/s converted into the strain rate of $2.50 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;
- III. 0.0276 mm/s converted into the strain rate of $1.25 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$;
- IV. 0.1200 mm/s converted into the strain rate of $0.55 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$;

The first strain rates are corresponding to quasi-static loading regime, the last two being relevant to the dynamic type: III - multi-cycle, seismic actions; IV – impact [8].

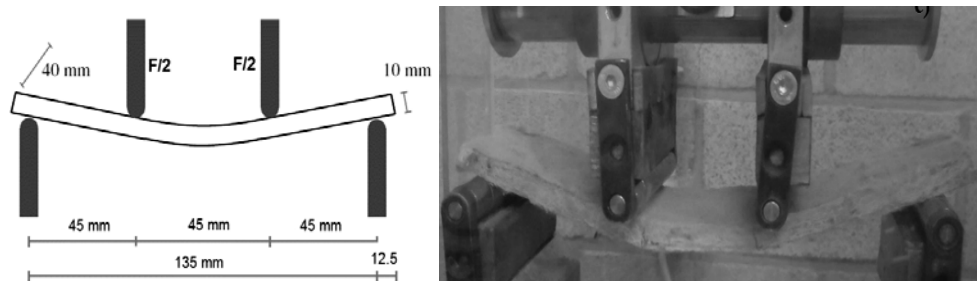


Figure 4 4PB test on PP-M1.5: a) 4PB loading scheme; b) Specimen during 4PB test

The characteristic stress-strain (σ - ε) diagrams were plotted and compared. The relevant mechanical parameters considered for the parallel evaluation are [9]:

- *Tensile strength (MPa)*: (1) the peak strength under loading (σ_{cu}); (2) the first-cracking-strength (σ_{fc}), namely the strength corresponding to the first force drop, producing the first crack in the specimen; (3) Tangent Modulus of elasticity (E), namely the slope of stress-strain curve
- *Ductility, in terms of strain (%) evaluated at the bottom part of the coupon specimens*: the total strain (ε_{max}), recorded from the beginning of loading and till the failure is considered to take place, usually when the force drops below the first crack force value; multiple cracking interval (MC) – recorded as the difference between the total strain (ε_{max}) and the strain corresponding to the first crack (ε_{fc}); multiple cracking interval (MC*) – recorded as the difference between the strain corresponding to the peak strength (ε_{cu}) and the strain corresponding to the first crack (ε_{fc});

3.1 Self-Healing Capacity

The PP – M1.5 coupon specimens were divided into two categories: (1) *Rupture specimens (R)*, loaded until failure at the age of 28 days; (2) *Self-healing specimens (SH)*, preloaded (age of 28 days) to an imposed vertical displacement of 1.5 mm, corresponding to an approximate strain of 1%, cured by exposure to 28 wet and dry alternating cycles and then retested until failure in similar conditions.

The PP – M1.5 Self-Healing performance was evaluated considering [10], [11], [12]: Self-Sealing (evaluation of crack closing efficiency) and Self-Repairing (evaluation of mechanical regain when retesting of the specimens, with respect to the initial preloading and also with the R type samples).

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. Fresh State Mix

The fresh state of PP – M1.5 is plastic, with creamy texture and good workability. The PP fibres prove to have an expected tendency of balling which can be counteracted by careful mixing sequences, especially after fibres addition. It was noticed that the mix required a 1-2 min resting interval after mixing, to reduce the initial stiff aspect and became more fluid and proper for casting.

2. Typical Material Characteristics

The tensile and compressive resistances of the PP – M1.5 mix were determined using the EN 196-1 (cement) and EN 1015 (mortar) standard methods, at the age of 28 days and 60 days, respectively. The tensile strength was determined using the 3-Point Bending (3PB) method. Supplementary, the dry bulk density of hardened mortar was determined in accordance to EN 1015-10. Table 2 presents the typical physical and mechanical characteristics with the increase from 28 to 60 days (the retesting age of the SH specimens). The 17% increase in compression and 12% increase in tension are according to the expectation, considering the considerable amount of FA in the mix, with slower pozzolanic reaction and developing later hydration products than the pure cement-based composites [13]. A similar tendency can be observed during the 4PB retesting the SH specimens.

Table 2 Physical and mechanical characteristics of PP – M1.5 mix

Dry bulk density (Kg/m ³)	Compressive resistance (MPa)			3PB Tensile resistance (MPa)		
	28 days	60 days	Increase (%)	28 days	60 days	Increase (%)
2160	56.8	66.4	16.9	9.7	10.9	12.2

3. 4PB tensile tests under different strain rates

The 4PB tests were performed as previously described, using four different loading rates. The testing age was 28 days and the obtained results are reported in Table 3.

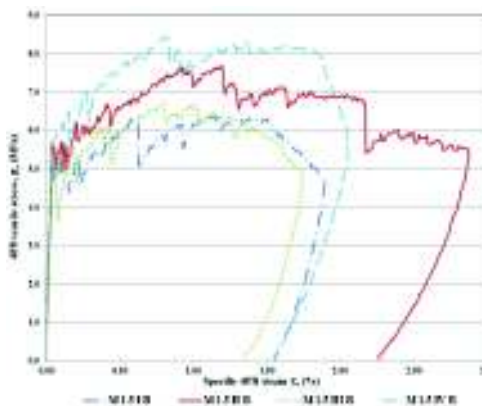


Figure 5 4PB test with 4 different strain rates

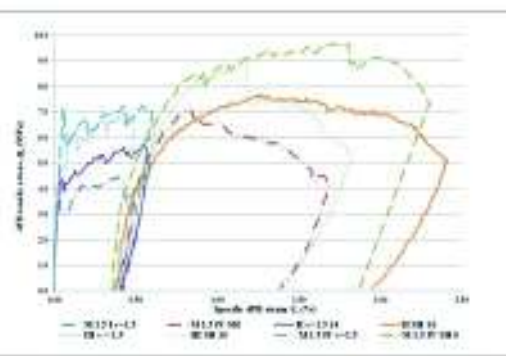


Figure 6 SH capacity: Self-Repairing, preloading and retesting

The results show a small strain rate sensitivity of the material, which is able to maintain approximate constant performance when subjected to slow and also fast loading rates. The IInd loading rate shows the best results in terms of balance strength / ductility.

Table 3 4PB test using different strain rates

Loading rate	Strength / Elastic modulus			Ductility		
	σ_{fc} (MPa)	σ_{cu} (MPa)	E (GPa)	ϵ_{max} (%)	MC (%)	MC* (%)
I	5.35	6.37	37.7	1.90	1.85	1.08
II	5.68	7.68	30.8	2.88	2.84	1.16
III	5.43	6.70	29.3	1.74	1.69	0.74
IV	6.15	8.44	31.3	2.05	1.95	0.70

4. Self-Healing Capacity Evaluation

The evaluation Self-Healing capacity of the material is still an on-going data analysis. Regarding the *Self-Sealing potential* of the material, the initial microscopic analysis shows complete closing of small microcracks (width less than 20 μ m) and partial sealing of larger cracks (Fig. 7). The *Self-Repairing potential* is evaluated by the means of 4PB retesting of SH specimens. As expected, there is an increase of maximum peak strength and a small drop in the ductility of material when increasing the loading rate (Fig. 6). Also, there is a clear regain in first-cracking-strength. So, the visual closure of the crack points to the regain in mechanical properties as well. Further evaluation of the results will be performed.

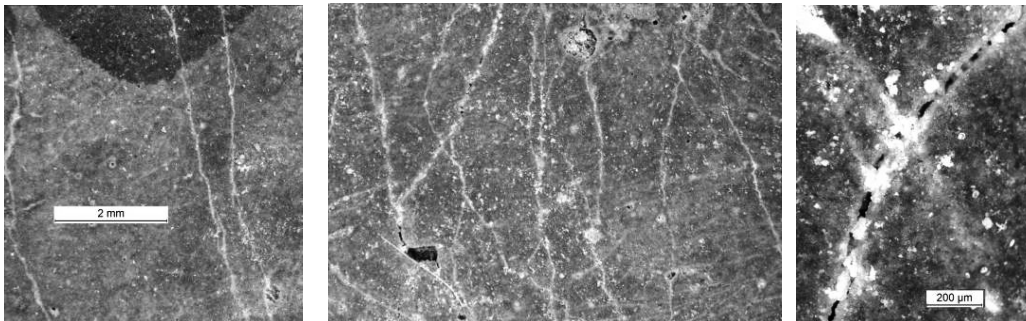


Figure 7 SH capacity: Self-Sealing - partial / complete crack closing

CONCLUSIONS

The theoretical and experimental study regarding the dynamic performance of the strain hardening cement composites (SHCC) proves encouraging results and, as consequence, recommends these materials for structural seismic resistant elements. Their low strain rate sensitivity proves high energy absorption capacity even in case of seismic action or impact, no brittle failure and prevention of sudden collapse threat.

The Self-Healing capacity also proves the effectiveness of autogenous healing, both in terms of visual crack closing (even complete in case of very small microcracks) and good mechanical recovery when retesting the specimens after exposure to 28 wet and dry curing cycles.

Further data analysis and supplementary experimental procedures, involving different types of mixes and testing methods are necessary for better understanding of dynamic potential of SHCC.

REFERENCES

- [1] Kan L.L., Shi H.S., Sakulich A.R. & Li V.C., Self-Healing Characterization of Engineered Cementitious Composite Materials, *ACI Materials Journal*, 107(6) 2010, pp. 617-624.
- [2] Li V.C., Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance, Nawy E., *Concrete Construction Engineering Handbook*, Chapter 24, CRC Press, 2008.
- [3] Pastrav M.I., Baera C. & Dinu F., Efficient Moment Frame Structure. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8(12), 2014, pp. 1202-1207.
- [4] Pastrav M.I. & Enyedi C., Hybrid Moment Frame Joints Subjected to Seismic Type Loading. *Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering, Portugal, 2012*, paper (No. 1343).
- [5] Faur A., Mircea C. & Păstrav M., A Modeling Technique for Precast Concrete Frames with Hybrid Connections, *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, 2012, Vol. 55, No. 3.
- [6] Baeră C., Szilagyı H., Mircea C., Criel P. & De Belie N., Concrete structures under impact loading: general aspects, *Urbanism. Architecture. Constructions*, ISSN 2069-0509 (print) / 2069-6469 (on-line), 2016, (accepted for publishing, <http://uac.incd.ro/EN/index.htm>).
- [7] Yang E.H., & Li V.C., Tailoring engineered cementitious composites for impact resistance, *Cement and Concrete Research*, 42(8) 2012, pp. 1066-1071.
- [8] Baeră C., Mircea C. & Szilagyı H. (2015), Analysis of self-healing potential of advanced cementitious composites – preliminary compositions and experimental results, *Proceedings of the 5th International International Conference on Self – Healing Materials*, Durham NC, SUA, 2015, pp. 43.
- [9] Snoeck D., Self-healing and microstructure of cementitious materials with microfibres and superabsorbent polymers, PhD Thesis, Ghent University, 2015.
- [10] De Rooij M.R. & Schlangen E., Self-healing phenomena in cement-based materials, Draft of State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee, 2011.
- [11] Van Tittelboom K. & De Belie N., Self-healing in cementitious materials—A review, *Materials* 6.6, 2013, pp. 2182-2217.
- [12] Snoeck D. & De Belie N., Mechanical and self-healing properties of cementitious composites reinforced with flax and cottonised flax, and compared with polyvinyl alcohol fibres, *biosystems engineering*, 2012, 111(4), pp. 325-335.
- [13] Van den Heede P., Gruyaert E., & De Belie N., Transport properties of high-volume fly ash concrete: capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability, *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(10), pp. 749-756.