

**Tudor Panfil TOADER**

# **Beton cu proprietăți de auto-vindecare utilizat în infrastructura de transport**

*Teză de doctorat*



**UTPRESS**

**Cluj-Napoca, 2023**

**ISBN 978-606-737-648-7**

**Tudor Panfil TOADER**

**BETON CU PROPRIETĂȚI DE AUTO-VINDECARE UTILIZAT  
ÎN INFRASTRUCTURA DE TRANSPORT**

**TEZĂ DE DOCTORAT**



**UTPRESS**

**Cluj - Napoca, 2023**

**ISBN 978-606-737-648-7**



Editura UTPRESS  
Str. Observatorului nr. 34  
400775 Cluj-Napoca  
Tel.: 0264-401.999  
e-mail: [utpress@biblio.utcluj.ro](mailto:utpress@biblio.utcluj.ro)  
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Director: ing. Dan Colțea

**Comisia de evaluare a tezei de doctorat:**

Președinte: Prof.dr.ing. Zoltan Kiss- Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Conducător științific: Prof.dr.ing. Călin Grigore Radu Mircea - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Referenți:

Prof.dr.ing. Dan Georgescu - Universitatea Tehnică de Construcții din București

Conf.dr. Nicolae Har- Universitatea Babeș Bolyai din Cluj-Napoca

Conf.dr.ing. Attila Puskás- Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Pregătire format electronic on-line: Gabriela Groza

Copyright © 2023 Editura UTPRESS

Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii UTPRESS.

ISBN 978-606-737-648-7

Bun de tipar: 12.06.2023

## MULȚUMIRI

Prezenta teză de doctorat, intitulată „*Beton cu proprietăți de auto-vindecare utilizat în infrastructura de transport*” a fost elaborată în decursul a 3 (trei) ani de zile și anume 2019-2022 în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, Departamentul de Inginerie Civilă și Instalații.

Studiul teoretic și experimental din cadrul tezei de doctorat, respectiv elaborarea tezei de doctorat a fost efectuată sub coordonarea domnului **prof.dr.ing. Mircea Călin Grigore Radu**, căruia îi mulțumesc pentru sprijinul acordat. De asemenea aș dori să le mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare **conf. dr.ing. Pușkaș Attila, șef de lucrări dr. ing. Faur Andrei, CSIII dr. Ing. Hegyi Andreea** și regretatei doamnei **CSII. dr.ing. Szilagyi Henriette** pentru susținerea acordată pe perioada desfășurării cercetărilor din cadrul tezei de doctorat.

Aș dori să îi mulțumesc domnului **conf.dr. Har Nicolae** din cadrul Universității Babeș-Bolyai din Cluj Napoca, Facultatea de Biologie și Geologie, Departamentul de Geologie pentru ajutorul acordat în realizarea analizei compoziționale a materiilor prime componente ale microbetonului și ale compozițiilor de microbeton cu ajutorul difracțiilor de raze X (XRD).

Le mulțumesc colegilor din cadrul Sucursalei Cluj-Napoca a INCD URBAN INCERC pentru colaborare și susținere.

Nu în ultimul rând doresc să mulțumesc mamei, surorii și a nepotului pentru suportul moral pe perioada desfășurării activității de elaborare a tezei de doctorat.

Cluj-Napoca  
2022

ing. Toader Tudor Panfil





## CUPRINS

ABREVIERI.....	7
INTRODUCERE.....	9
STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII.....	11
1. Motivarea alegerii temei de cercetare.....	11
1.1. Infrastructura rutieră.....	11
1.2. Infrastructura feroviară.....	16
2. Studiul bibliografic și sinteza rezultatelor cercetărilor anterioare în domeniu (State-of-the-Art).....	17
2.1. Evaluarea capacității mecanismului de auto - vindecare .....	20
2.2. Betonul cu mecanismul de auto-vindecare autogenă .....	22
2.3. Betonul cu mecanismul de auto - vindecare autonomă. ....	26
2.3.1. Betonul cu mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat cu adaosuri hidroizolante cristaline.. ....	26
2.3.2. Betonul cu mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat cu polimeri superabsorbanți.....	35
2.3.3. Betonul cu mecanismul de auto - vindecare autonomă realizat cu bacterii.....	39
2.3.4. Betonul cu mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizată cu agenți de vindecare încorporați în capsule.....	41
2.3.5. Betonul cu mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat prin utilizarea tuburilor.....	44
CONTRIBUȚIA PERSONALĂ.....	48
3. Ipoteza de lucru/obiective .....	48
4. Metodologie generală .....	49
4.1. Proiectarea compozițiilor preliminarea ale microbetonului cu capacitate de auto-vindecare.....	49
4.2. Analiza și caracterizarea materiilor prime componente ale micro-betonului .....	50
4.2.1. Cimentul.....	55
4.2.2. Agregatele .....	57
4.2.3. Cenușa zburătoare (de termocentrală). ....	61
4.2.4. Adaos de impermeabilizare prin cristalizare (MasterLife WP 1000).....	64
4.2.5. Fibrele sintetice din alcool polivinilic (PVA) .....	65
4.2.6. Șlamul de calcar .....	66

4.2.7. Superplastifiant tip Master Glenium 51, BASF .....	68
4.3. Determinarea consistenței standard a pastei formată din ciment și cenușă de termocentrală și a timpului de priză.....	68
5. Realizarea compozițiilor preliminare de microbeton .....	72
6. Realizare stand experimental (Echipamentele utilizate în evaluarea capacității de auto - vindecare al fisurilor induse microbetonului) ...	77
7. Caracterizarea performanțelor compozițiilor preliminare propuse pentru realizarea microbetonului.....	78
7.1. Determinarea densității.....	78
7.2. Determinarea absorbției de apă.....	78
7.3. Determinarea caracteristicilor mecanice .....	79
7.3.1. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere ...	80
7.3.2. Determinarea rezistenței la compresiune.....	82
7.4. Evaluarea capacității de auto - vindecare a microbetonului.....	83
7.5. Determinarea structurii cristaline ale microbetonului cu ajutorul difracțiilor de raze X (XRD) .....	194
8. Concluzii finale.....	199
8.1. Concluzii generale.....	199
8.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei.....	202
8.3. Direcții viitoare de cercetare.....	203
REFERINȚE.....	205
LISTA FIGURILOR .....	227
LISTA TABELELOR .....	235
LISTĂ DE PUBLICAȚII .....	239

## ABREVIERI

PVA	Fibre sintetice din alcool polivinilic
INS	Institutul Național de Statistică
CO <sub>2</sub>	Dioxid de Carbon
CaCO <sub>3</sub>	Carbonatul de Calciu
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidroxidul de Calciu
CSH	Silicat de Calciu Hidrat
ICW	Aditivi minerali impermeabilizanți de cristalizare
ACI	Institutul American al Betonului
C <sub>3</sub> S	Silicatul tricalcic (alitul)
CSH	Hidrură de Cesium
CA	Aditiv cristalin
CSA	Sulfoaluminat de Calciu
FA	Cenușă zburătoare
MgO	Oxid de Magneziu
MgCO <sub>3</sub>	Carbonat de Magneziu
SiO <sub>2</sub>	Dioxid de Siliciu
MICP	precipitarea carbonatului de calciu indusă microbial
FTIR	Spectroscopiei în Infraroșu cu Transformarea Fourier
XRD	Difracția de raze X
EDS	Spectroscopie cu raze X cu dispersie de energie.
SEM	Microscopie prin scanare electronica
pH	Potențialul de hidrogen
SAP	Polimeri superabsorbantți



# INTRODUCERE

Proiectul de cercetare realizat în cadrul tezei de doctorat cu titlul „Beton cu proprietăți de auto-vindecare utilizat în infrastructura de transport” își propune să dezvolte o cunoaștere mai bună asupra proprietăților de auto-vindecare autonomă a unor compoziții de microbeton, aducând contribuții originale prin utilizarea la prepararea acestuia a unor materiale componente autohtone.

## **I. Scopul proiectului de cercetare din cadrul tezei de doctorat**

Scopul proiectului de cercetare efectuat în cadrul tezei de doctorat a fost acela de a analiza posibilitatea și dezvoltarea unui beton inovativ cu performanțe demonstrate ale rezistențelor mecanice, respectiv al performanțelor de durabilitate și mai ales al capacității de auto-vindecare, concomitent cu analiza posibilității de transfer tehnologic, contribuind astfel la crearea cadrului favorabil pentru implementarea conceptului de dezvoltare durabilă.

Proiectarea și producerea acestui tip de microbeton cu proprietatea de auto-vindecare, propus a fi utilizat la realizarea elementelor componente ale infrastructurilor/suprastructurilor de transport, presupune un cost mai ridicat de producție, raportat la betoanele clasice, deoarece în compoziția acestuia pe lângă materialele clasice componente se mai adaugă costul altor materiale, precum:

- adaos impermeabilizant integral prin cristalizare în masă a microbetonului,
- cenușa de termocentrală,
- fibre sintetice din alcool polivinilic (PVA).

Amortizarea costurilor suplimentare se realizează în timp, deoarece prin utilizarea acestui tip de microbeton se realizează o creștere a intervalului de timp la care sunt realizate lucrări de reparații respectiv întreținere, ducând și la creșterea perioadei de utilizare a infrastructurii/suprastructurii de transport. Lucrările de reparații sau mentenanță, conduc la costuri suplimentare pentru autoritățile care le au în întreținere și la pierderi pentru utilizatorii infrastructurilor respective.

## **II. Obiectivele proiectului de cercetare**

**Obiectivul general** al proiectului de cercetare a fost acela de a proiecta, realiza și analiza un microbeton inovativ care are în compoziția sa, pe lângă materiile prime clasice de origine autohtonă, un aditiv de cristalizare în masa matricei cementoase. Ca urmare a acestei specificități compoziționale se crează cadrul favorabil ce permite îmbunătățirea capacității de auto-vindecare a compozițiilor cementoase proiectate.

### **b) Obiectivele specifice** au fost:

- Identificarea mecanismului de auto-vindecare al microbetonului, relevant și stabilirea modului de realizare al cercetării;
- Analiza rezultatelor obținute din cercetările experimentale până în prezent;
- Analiza și stabilirea materiilor prime utilizate la prepararea microbetonului;
- Studiarea și elaborarea tehnologiei de preparare;
- Analiza fizico-mecanică și chimică a materialelor componente ale microbetonului;
- Optimizarea compoziției prin stabilirea cantitativă a materiilor prime care dau proprietatea de auto-vindecare a microbetonului.

# STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII

## 1. Motivarea alegerii temei de cercetare

Betonul este un material poros, predispus la fisurare timpurie, iar prin intermediul fisurilor se formează căi de acces ale factorilor agresivi din mediul exterior, în masa betonului, spre armătura înglobată în acesta. Armătura în contact cu agenții exteriori agresivi se degradează, iar în timp își poate pierde capacitatea portantă. Fără a interveni asupra închiderii acestor fisurii se poate ajunge la pierderea capacității portante a structurii, inclusiv la cedarea acesteia [1-10].

Fundamentarea teoretică a studiului a avut la bază raportul Institutului Național de Statistică, intitulat „Lungimea cailor de transport la sfârșitul anului 2018”, publicat în aprilie 2019, unde se face evaluarea infrastructurii de transport și anume a căilor ferate și a drumurilor publice din România [11]. Studiul este structurat pe tipuri de infrastructuri din care s-au sintetizat următoarele:

### 1.1. Infrastructura rutieră

Situația drumurilor publice din România, conform raportului realizat de Institutul Național de Statistică (INS) [11] este analizată și reprezentată în Fig. 1.1.

La sfârșitul lunii decembrie 2018, conform Raportului INS [11], lungimea diferitelor tipuri de drumuri, cu importanță deosebită, raportată la lungimea drumurile publice totalizau 86234 km, conform Fig. 1.2..

Din punct de vedere al densității drumurilor publice raportate la suprafața de 100km<sup>2</sup> sunt raportate următoarele densități în funcție de regiunea geografică și anume:

- București-Ilfov 49,8 km
- Nord-Est 40,4 km
- Sud-Vest Oltenia 38,7 km



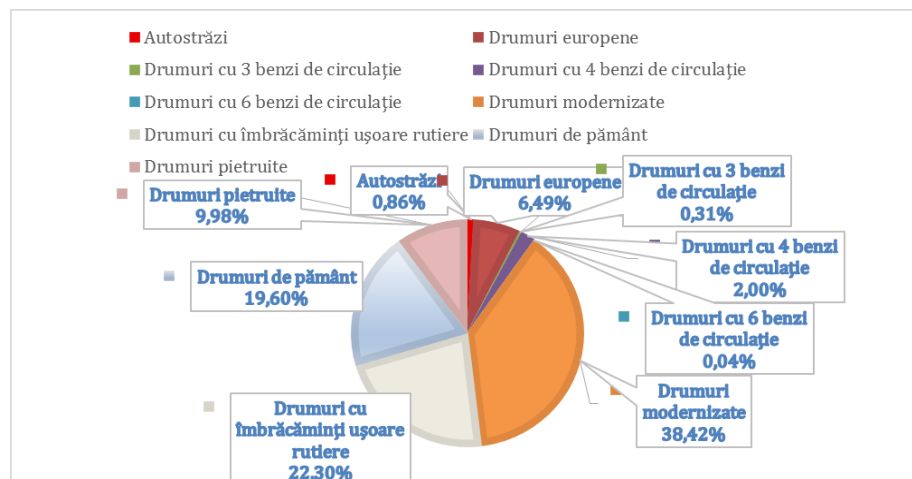


Fig. 1.1. Situația drumurilor publice din România (prelucrare după INS) [11]

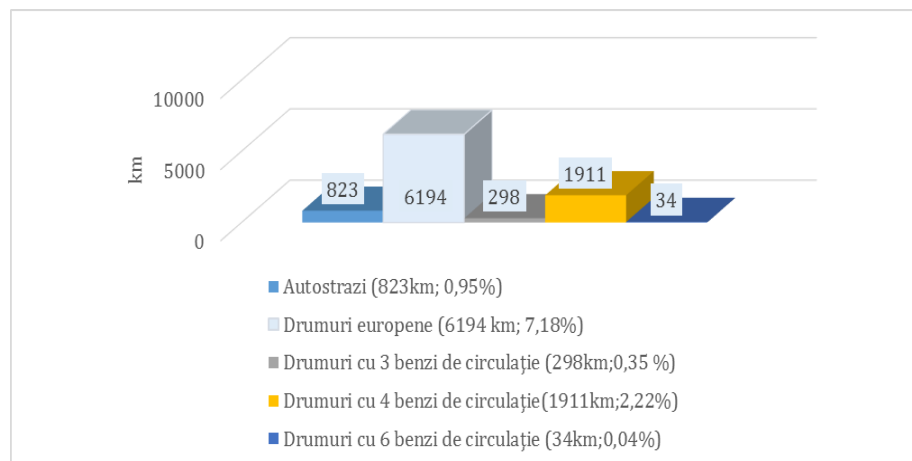


Fig. 1.2. Lungimea diferitelor tipuri de drumuri, cu importanță deosebită (prelucrare după INS) [11]

În consecință, se poate spune că bugetul actual al drumurilor de importanță deosebită reprezintă o mică parte din nevoile naționale în ceea ce privește infrastructura rutieră.

Din punctul de vedere al sistemului rutier, al drumurilor publice, la sfarsitul lunii decembrie 2018, rețeaua acestora este reprezentată în Fig. 1.3..

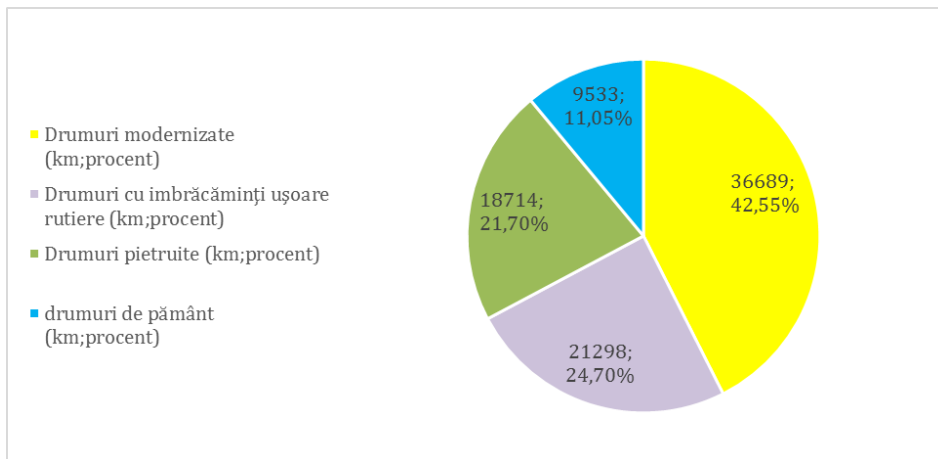


Fig. 1.3. Rețeaua de drumuri publice din punct de vedere al tipului de acoperământ (prelucrare după INS) [11]

Din totalul drumurilor modernizate, 92,4% reprezintă drumuri cu sistem rutier din asfalt de tip greu și mijlociu, conform Fig. 1.4 și anume:

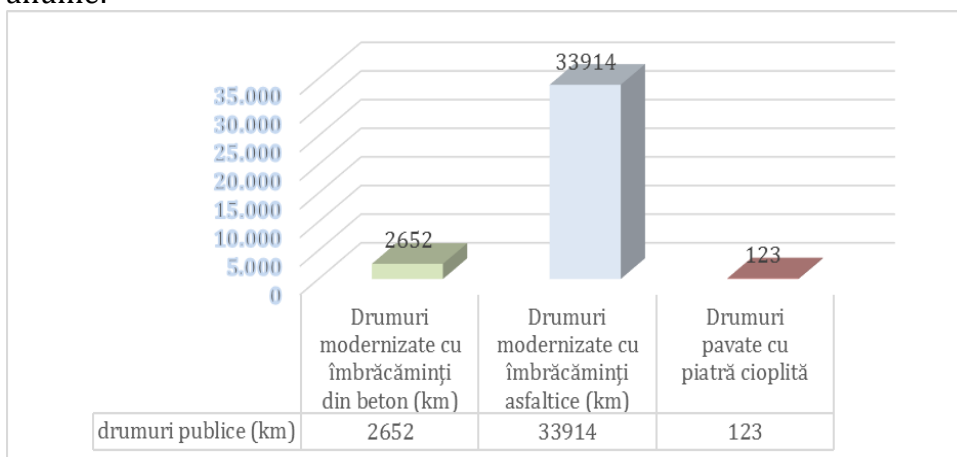


Fig. 1.4. Sistemul rutier al drumurilor publice cu îmbrăcămiși asfaltice de tip greu și mijlociu (prelucrare după INS) [11]

Din punct de vedere al stării tehnice a drumurilor publice, modernizate, raportate la perioada de serviciu în România, exprimate în kilometri sunt reprezentate în Fig. 1.5..



Fig. 1.5. Starea tehnică a drumurilor publice, modernizate (prelucrare după INS) [11]

În România din totalul drumurilor naționale, drumurile europene sunt în lungime de 6194 km (34,9%) și autostrăzi 823 km (4,6%).

Drumurile naționale de importanță deosebită, în funcție de numărul de benzi de circulație, se clasifică în 5 (cinci) tipuri de drumuri reprezentate în Fig. 1.6..

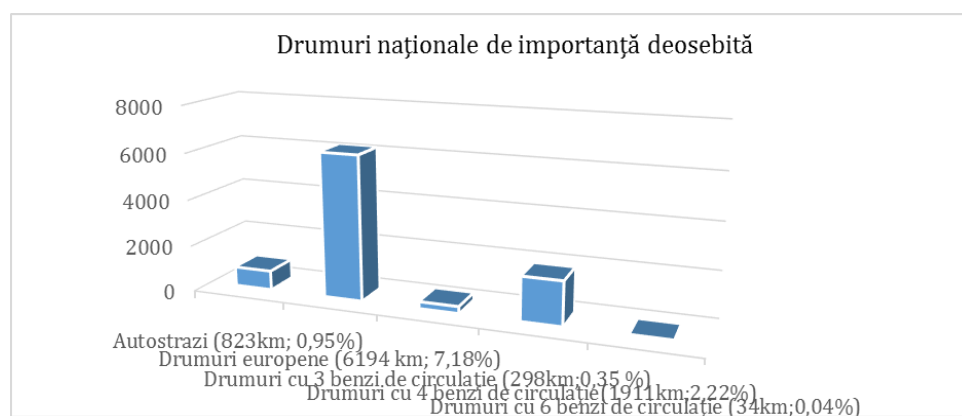


Fig. 1.6. Drumurile naționale de importanță deosebită - numărul de benzi de circulație (prelucrare după INS) [11]

Sub aspectul perioadei de serviciu a drumurilor naționale modernizate, conform reprezentării grafice din Fig. 1.7. respectiv reparația tipurilor de îmbrăcăminte rutiere existente pe drumurile naționale modernizate sunt prezentate grafic în Fig. 1.8..

Din punct de vedere al stratului rutier al drumurilor modernizate de importanță județeană erau în proporție de 40,4%, iar drumurile comunale pietruite erau în proporție de 38,2%.

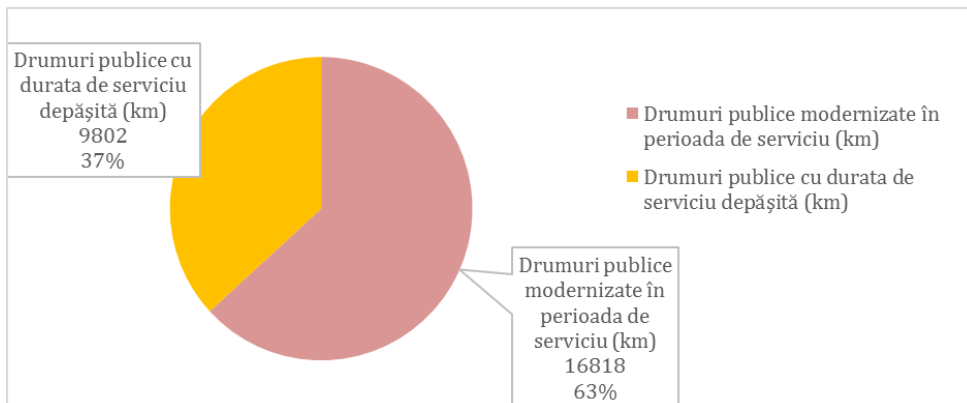


Fig. 1.7. Perioada de serviciu a drumurilor naționale modernizate (km) (prelucrare după INS) [11]

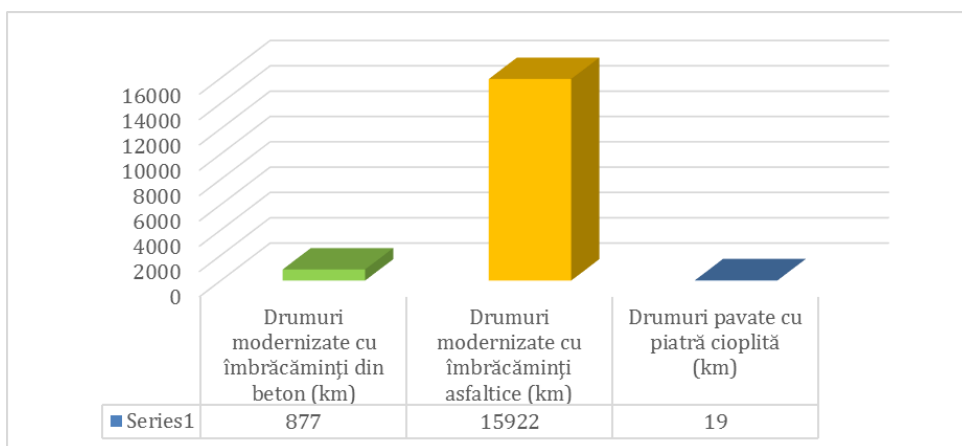


Fig. 1.8. Repartizarea tipurilor de îmbrăcăminți rutiere existente pe drumurile naționale modernizate (km) (prelucrare după INS) [11]

## 1.2. Infrastructura feroviară

Liniile de cale ferată prezentate de INS [11] aflate în exploatare, de utilitate publică sunt reprezentate grafic în Fig. 1.9., respectiv densitatea acestora pe regiuni geografice ale României este reprezentată în Fig. 1.10.

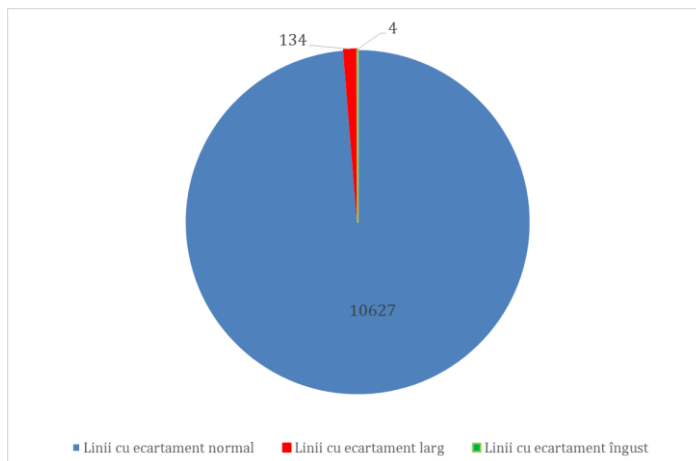


Fig. 1.9. Repartizarea tipurilor de ecartamente de linii ferate (km) (prelucrare după INS) [11]

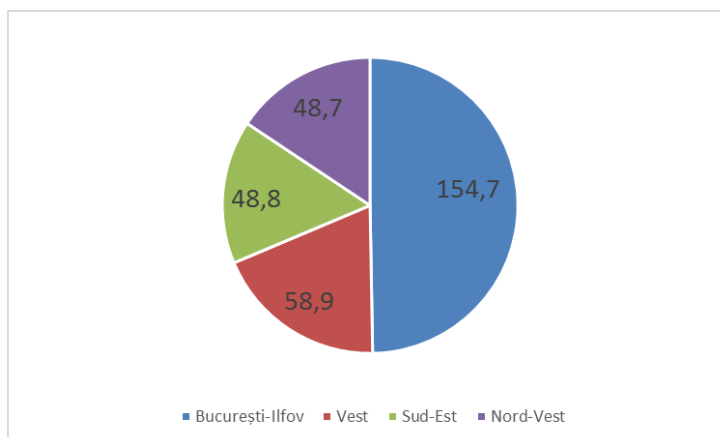


Fig. 1.9. Densitatea liniilor ferate pe regiuni geografice ale României (%) (prelucrare după INS) [11]

Lungimea liniilor de cale ferată, simplă, aflată în exploatare electrificate reprezenta 4029 km, respectiv 37,4 % din totalul rețelelor

de cale ferată aflate în exploatare și anume 5990 km de căi principale din care 5956 reprezintă linii de cale ferată cu ecartament normal. [11]

În urma acestor studii rezultă necesitatea utilizării în viitor pentru realizarea infrastructurilor a unor materiale cu proprietăți superioare celor actuale, cu o durată de exploatare mai mare față de cele realizate în prezent, prin utilizarea unor betoane (materiale compozite cementoase) cu proprietatea de auto - vindecare.

## **2. Studiul bibliografic și sinteza rezultatelor cercetărilor anterioare în domeniu (State-of-the-Art)**

Mecanismul de auto-vindecarea poate fi definit ca o capacitate a unui materialului de a simți și repara deteriorările din interiorul său fără a fi necesară o intervenție din exterior.

Urmărirea naturii a fost întotdeauna o sursă de inspirație pentru dezvoltarea de noi materiale. În special, auto-repararea țesuturilor și a oaselor este considerat ca un concept extrem de fascinant. Sistemele biologice pot servi ca exemplu pentru materialele artificiale (Fig. 2.1). În ambele cazuri, inițierea mecanismului este legată de apariția „rănirii”. Sistemul biologic inițiază un răspuns inflamator, urmat de proliferarea celulară și, în final, remodelarea matricei. Este un proces consumator de timp, totuși, rata de vindecare poate fi ajustată printr-un design adecvat al materialului [12], [13].

Betonul este cel mai utilizat materialul care intră în componența elementelor structurale. Liantul folosit în procesul de realizare al betonului este ciment Portland obișnuit, producția acestuia fiind în continuă expansiune.

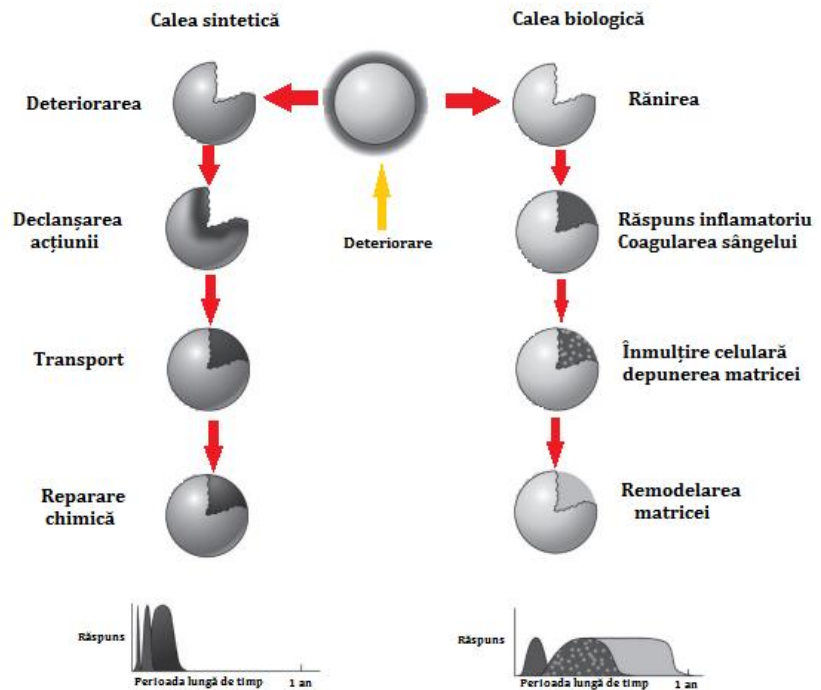


Fig. 2.1. Calea sintetică și biologică de autovindecare[12], [13].

În același timp, s-a estimat că producția mondială de ciment Portland obișnuit este direct proporțională cu emisiile de dioxid de carbon ( $\text{CO}_2$ )[14], prin urmare, proiectarea unui beton ecologic este necesară.

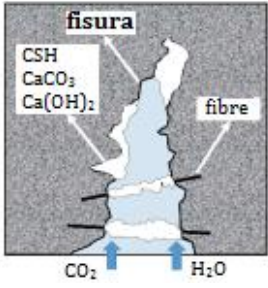
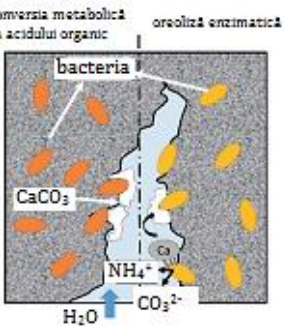
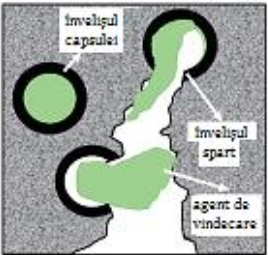
În literatura de specialitate se găsesc betoane cu caracteristici diferite față de cele clasice și anume betoanele cu diferite mecanisme de auto-vindecare [15]. În funcție de mecanismele de realizare al auto-vindecării betonului, reprezentate schematic în Fig.2.1. și clasificate în :

- *betoane cu mecanismul de auto-vindecare autogenă* (mecanism intrinsec) nu necesită utilizarea altor adosuri în matricea cementoasă și se produce datorită reacției de hidratare ulterioară a particulelor de ciment rămase nehidratate din masa betonului sau din precipitarea carbonatului de calciu ( $\text{CaCO}_3$ ) [16-18];
- *betoane cu mecanismul de auto-vindecare autonomă* (mecanism extrinsec). Mecanismul de auto-vindecare autonomă este produs în urma unor reacții chimice ale unui agent de autovindecare înglobat direct, încorporat în capsule sau introdus prin rețele vasculare la proiectarea și realizarea amestecului de beton. Dintre

cele mai utilizate sisteme se realizează cu ajutorul polimerilor superabsorbanti [19-22], amestecuri cristaline [23-25], silicat de sodiu microîncapsulat [26], [27], tuburi cu adezivi [28-30] și bacterii [9], [31-39].

Rajczakowska et al. 2019 [13] a evidențiat în cercetarea făcută moduri de abordare utilizate pentru auto-vindecarea betonului și reprezentate în Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Abordări utilizate pentru autovindecarea betonului [13]

Nr. crt.	Reprezentare grafică a mecanismului de auto-vindecare	Mecanismul de auto - vindecare
1		Autogen
2		Autonom- bazat pe bacterii (stânga – conversie metabolică mecanism, dreapta – ureoliză enzimatică).
3		Autonom pe bază de capsule



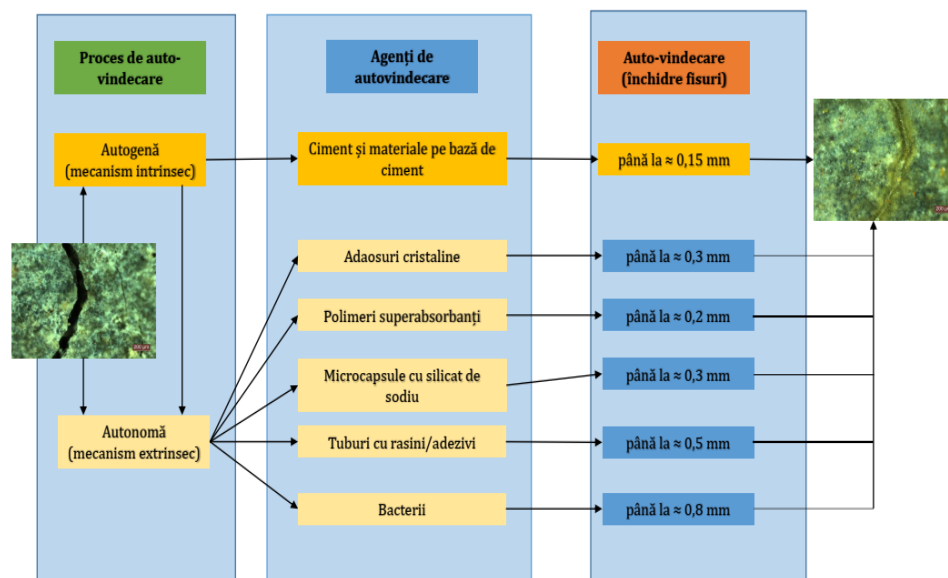


Fig. 2.2. Mecanisme concrete de auto-vindecare și amploarea potențială a vindecării unora dintre cele mai utilizate sisteme de auto-vindecare ale compozitelor cementoase.[15]

## 2.1. Evaluarea capacității mecanismului de auto - vindecare

Tittelboom și De Belie [40] oferă o prezentare a numeroaselor strategii de evaluare a performanței de auto-vindecare prin : analiza vizuală și microscopie optică, microscopie electronică cu scanare, măsurători de transmisie cu ultrasunete, analiza de secțiunii subțiri, radiografie de raze X, corelare imaginilor digitale, tomografie cu raze X, spectroscopia Raman, spectroscopia de difracție cu raze X și analiza în infraroșu sunt câteva dintre metodele utilizate pentru evaluarea mecanismului de vindecare al fisurilor, reprezentate schematic în Fig. 2.3..

Criteriile de eficiență ale mecanismului de auto-vindecare a betonului vs tehnici de auto-vindecare au fost studiate în literatura de specialitate [41-43] și prezentate în Tab. 2.2. și Tab. 2.3.

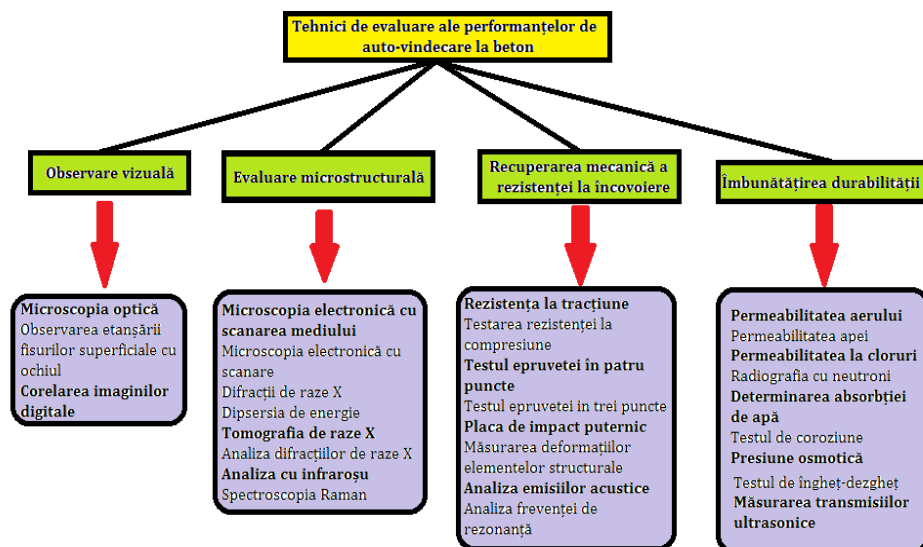


Fig. 2.3. Strategii de evaluare a performanței de auto-vindecare [40]

Tab. 2.2. Criterii de eficiență a auto-vindecării vs metode de auto-vindecare [41-43]

Nr. Crt.	Criteriu de eficiență	Tehnica de auto-vindecare		
		Încapsulare chimică	Microorganisme încapsulate	Aditivi
1	Termen de valabilitate	Lung, depinde de agentul de vindecare încapsulat	Sporii se mențin pentru cel puțin șase luni la fel pentru această abordare	Depinde de reactivitatea și hidratarea aditivilor
2	Omniprezența	Da, sub formă de capsule poate fi dispersat în tot masa betonului	Da, sub formă de capsule având spori poate fi dispersat în toata masa matricei cementoase	Da, ca aditivi sunt temeinic amestecați și dispersați în toată masa matricei cementoase
3	Calitatea	Restaurează proprietățile mecanice ale matricei, proprietatea de autoetanșare nu a fost investigată	Demonstrează o completă auto-etanșare dar mai puține proprietăți de restaurare mecanică	Demonstrează o completă auto-etanșare dar proprietățile de restaurare mecanică nu au fost studiate

Continuare Tab. 2.2.

4	Fiabilitate	Nu sunt suficiente date disponibile pentru evaluare	Nu sunt suficiente date disponibile pentru evaluare	Nu sunt suficiente date disponibile pentru evaluare
5	Versatilitate	Da, precum este independent de mediu inconjurator	Nu, așa cum are nevoie continuu de expunere la umiditate	Nu, așa cum are nevoie continuu de expunere la umiditate
6	Repetabilitate	Nu sunt suficiente date disponibile pentru evaluare	Nu sunt suficiente date disponibile pentru evaluare	Nu sunt suficiente date disponibile pentru evaluare

## 2.2. Betonul cu mecanismul de auto-vindecare autogenă

La realizarea elementelor din betonul clasic, 20-30% din cantitatea de ciment utilizată la prepararea lui, rămâne nehidratată. În momentul apariției fisurilor în elementele de beton, iar acestea intră în contact cu apa, se inițiază reacția de hidratare a particulelor de ciment din beton ramase nehidratate, prin care fisurile se închid parțial sau total. Acest mecanism de închidere al fisurilor este cunoscut ca mecanism de auto-vindecare autogenă [44], [45].

Mecanismul de auto-vindecare autogenă este un mecanism intrinsec al matricei cementoase, natural, deoarece posedă proprietăți naturale de autovindecare autogenă datorită hidratării continue a mineralelor de clincher sau a carbonatării hidroxidului de calciu ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), iar fisurile se închid într-o anumită perioadă de timp [15], [16].

Auto-vindecarea autogenă este eficientă la materialele cementoase care prezintă microfisuri cu deschidere mică și sunt expuse în medii cu umiditate ridicată, gradul de închidere al microfisurilor fiind foarte greu de controlat. Cu toate aceste impedimente legate de mediul în care sunt expuse materialele compozite cementoase se pot proiecta și realiza materiale cementoase cu capacitatea de auto-vindecare autogenă [15], [46].

Mecanismul de vindecare autogenă [44], [47] se poate realiza în situațiile reprezentate schematic în Fig. 2.4. [47] și Fig. 2.5. [45]:

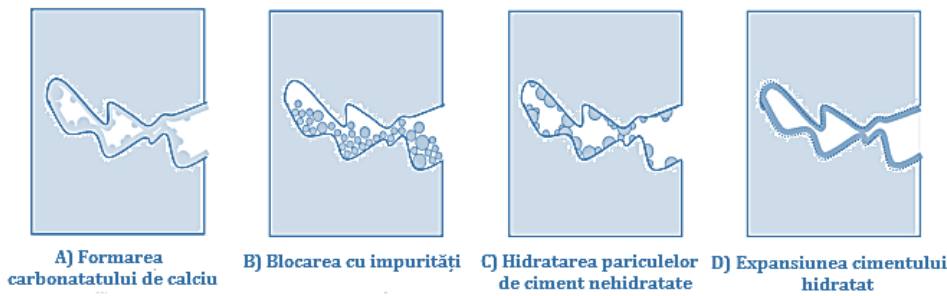


Fig. 2.4. Mecanisme de auto-vindecare autogenă [47].

- Expansiunea gelului de silicat de calciu hidrat (CSH).
- Hidratarea particulelor nehidratate de ciment.
- Formarea de  $\text{CaCO}_3$  sau  $\text{Ca(OH)}_2$  pentru a optura fisurile.
- Opturarea fisurilor prin prezența impurităților din apă.

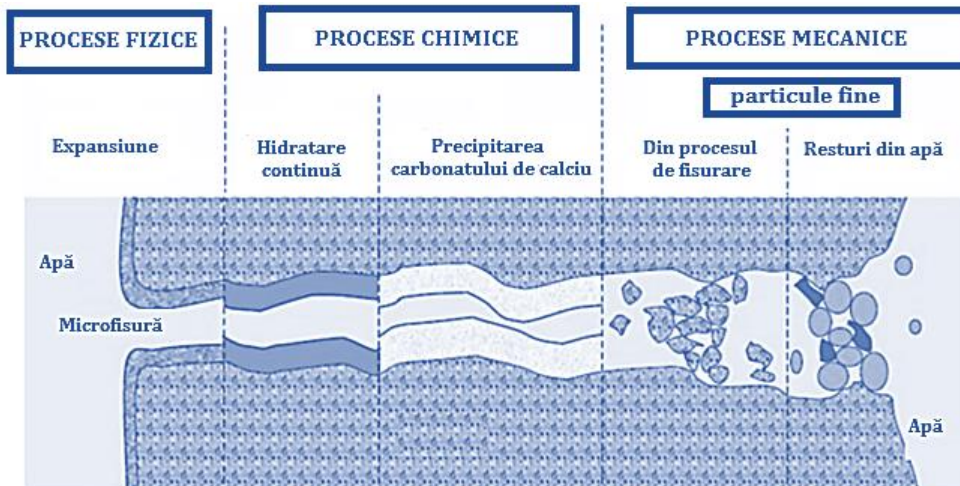
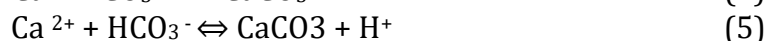


Fig. 2.5. Mecanisme de auto-vindecare autogenă [45]

Toate mecanismele de auto-vindecare autogenă enumerate mai sus se pot realiza și simultan. Dintre toate mecanismele de auto-vindecare autogenă, cele mai eficiente se realizează prin formarea  $\text{CaCO}_3$  și  $\text{Ca(OH)}_2$  [41], în urma următoarelor reacții chimice :





Mecanismul de autovindecare cel mai relevant din literatura de specialitate îl reprezintă carbonatarea hidroxidului de calciu (portlandit), respectiv hidratarea ulterioară a particulelor de ciment nehidratate din matricea cementoasă [48], reprezentat schematic în Fig. 2.6.

Hidratarea ulterioară a particulelor de ciment se realizează prin expunerea elementelor fisurate din beton în medii cu umiditate ridicată, respectiv a elementelor fisurate aflate în apă [49-51].

În urma reacției chimice dintre calciu ( $\text{Ca}^{2+}$ ), element chimic prezent în matricea betonului hidratat și dioxidul de carbon ( $\text{CO}_2$ ) existent în apa unde este expus elementul din beton fisurat, se formează precipitatul de carbonat de calciu ( $\text{CaCO}_3$ ) sub formă de cristale, reprezentată schematic în Fig. 2.7. [52].

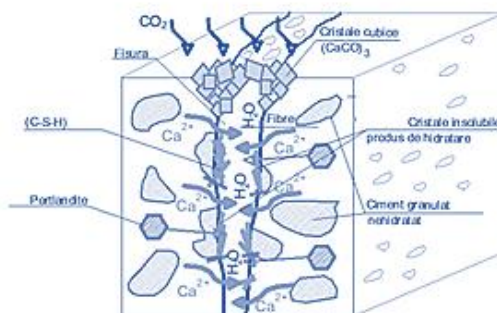


Fig. 2.6. Schema mecanismului de auto-vindecare autogenă [48]

În urma formării cristalelor de precipitat de carbonat de calciu ( $\text{CaCO}_3$ ) se reduce permeabilitatea apei prin fisurile elementelor de beton.

În unele studii din literatura de specialitate se indică o concentrație mai mare de precipitat de carbonat de calciu ( $\text{CaCO}_3$ ) doar la suprafața fisurilor existente în betonul expus în apă [52].

Mecanismul procesului de auto-vindecare autogenă este influențat semnificativ de compoziția din care s-a realizat betonul, deoarece structurile moderne în compoziția lor pe lângă cimentul Portland, au diferite materiale substituente ale acestuia, precum cenușa zburătoare, praf de silice, zgură de furnal, care contribuie și ele la realizarea mecanismului de auto-vindecare.

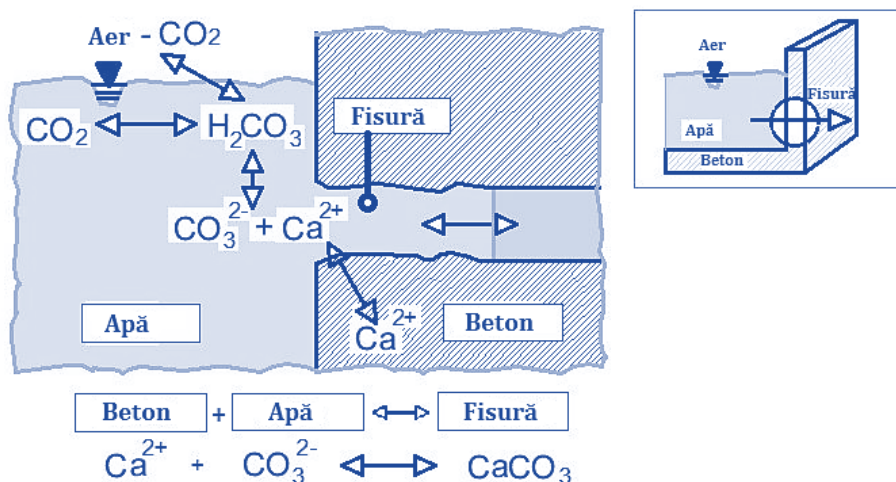


Fig. 2.7. Schema mecanismului de auto-vindecare autogenă a elementelor fisurate din beton aflate în apă [52]

Realizarea mecanismului de auto-vindecare autogenă este influențat semnificativ de deschiderea fisurilor, respectiv fisurile cu deschidere mică au eficiența de vindecare mai mare datorită volumului mai mic care necesită umplut [15].

Închiderea completă a deschiderii maxime a fisurilor prin mecanismul de vindecare autogen, s-a realizat pentru deschiderea de 0,10 mm, respectiv vindecarea pentru o fisură cu deschiderea de 0,32 mm după 42 zile la probele imersate în apă [49].

Pentru elementele fisurate imersate în apă timp de 90 de zile prin mecanismul de vindecare autogenă s-au închis fisuri cu deschiderea maximă de 0,45 mm [50].

Îmbunătățirea mecanismului de autovindecare poate fi realizat prin restricționarea deschiderii fisurilor datorată înglobării în masa betonului în momentul preparării acestuia a fibrelor [53].

Tipul de fibră poate influența formarea precipitatelor în interior fisurii și controlul deschiderii acesteia [15], [54], [55].

Mecanismul de vindecare autogenă a fisurilor din materialele compozite cementoase se realizează printr-o închidere mai rapidă în cazul matricelor cementoase tinere datorita hidroxidului de calciu și a aportului de umiditate ridicat [56-59].

Pentru o eficiență mai ridicată a mecanismului de vindecare autogenă la realizarea compozitelor cementoase se adaugă în compoziția acestora a unor materiale cu hidratare întârziată precum praful de silice,

aditivul cristalin, cenușa zburătoare, metacaolinul sau zgură de furnal [15], [60-62].

### **2.3. Betonul cu mecanismul de auto - vindecare autonom.**

Proiectarea mecanismului de vindecare autonom al betonului se realizează în următoarele moduri:

- prin modificarea mecanismului de autovindecare autogen prin înglobarea în compoziția matricei cementoase a altor materiale precum microorganismele, cenușa zburătoare, fibre din alcool polivinilic (PVA), praf de silice sau chiar prin declanșarea unor reacții chimice pentru a umple fisurile precum reacția calciu-sulfat-aluminat [30], [64 - 66].

- prin încapsularea agenților de vindecare, aceasta fiind una dintre cele mai eficiente și populare metode de autovindecare. Microcapsulele fiind folosite pentru înglobarea în interiorul lor a diferiților agenți de vindecare sau a bacteriilor care să rămână în stare latentă în beton, până la momentul apariției fisurilor care sparge capsulele, iar agenții de vindecare se raspândesc în fisuri formate cu rolul de a le sigila. [30], [67-69].

- prin metode vasculare, care imită sistemul cardiovascular uman, prin care sângele transportă substanțele din alimente, apă și minerale în tot corpul. Această metodă când este aplicată la beton, poate livra agenții de vindecare dintr-o sursă externă în interiorul rețelei betonului [70 - 72].

#### **2.3.1. Betonul cu mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat cu adaosuri hidroizolante cristaline.**

Capacitatea mecanismului de auto-vindecare autonomă poate fi îmbunătățită prin adăugarea în compoziția betonului a unor aditivi minerali impermeabilizanți de cristalizare care reacționează în prezența apei și formează cristale subțiri care pot să umple porii, capilari și microfisurile [73]. Cât persistă starea de umezeală, cristalele din interiorul matricei cementoase continuă să se expandeze în interiorul acesteia. La momentul uscării betonului, aditivi minerali impermeabilizanți de cristalizare stau latenți până când sunt supuși unui nou ciclu de apă care poate fi furnizat prin apariția unei noi fisuri ce activează din punct de vedere chimic fenomenul de cristalizare [73], [74-79].

Aditivii cristalini sunt în mare parte aditivi solubili în apă care îmbunătățesc proprietățile betonului în stare proaspătă și în stare întărită [80], [81].

Conform raportului Institutului American al Betonului (ACI), aditivii cristalini sunt un tip de amestec utilizat la reducerea permeabilității. ACI împarte aditivii de reducere a permeabilității în două părți, cei care reduc permeabilitatea apei în condiții fără umiditate și cei cu umiditate. Aditivii care pot funcționa în condiții hidrostatice includ aditivii cristalini. Câțiva din acești aditivii au o mulțime de beneficii, cum ar fi reducerea contracției prin uscare, minimizarea pătrunderii ionilor de clor la suprafață, rezistență îmbunătățită la îngheț și proprietăți de vindecare autogenă [80], [82].

Guzlena S. and Sakale G. [81] au analizat și prezentat diferite tipuri de amestecuri de beton în care la prepararea lor s-au folosit diferiți aditivi cristalini, precum și alte caracteristici ale acestora prezentate în tabelul nr.2.3.1. și tabelul nr.2.3.2..

Rezultatele prezentate diferă, din cauza utilizării în realizarea compozițiilor cercetate a unor materiale cementoase cu caracteristici diferite. S-a pornit de la un amestec proiectat de: ciment, nisip (raportat la cantitatea de ciment), apă (raportată la cantitatea de ciment), diferite cantități de aditivi, respectiv tipul acestora (superplastifianți, agenți de vâscozitate), prezentate în tabelul nr.1. Deoarece nu există o metodă de testare standardizată a mecanismului de auto-vindecare, metodele de testare diferă pentru fiecare tip de cercetare, prin urmare, este greu de comparat rezultatele, prezentate în Tab. 2.3.1..

Tab. 2.3.1. Rezumatul tipurilor de beton, proiectarea amestecului, aditivii cristalini utilizați, metodele de pre-fisurare [81].

Nr. crt.	Tip de beton	Tip de ciment	A:C	Aditiv	Metoda de fisurare	Referința
1	Beton cu rezistență normală	II 42,5	0,63	amestec de ciment, nisip și microsilice	Încovoiere în 3 puncte	[83]
2	Beton cu rezistență normală	Fără specificație	0,25	pe bază de sulfoaluminat de calciu aditiv expansiv (CSA, Denka CSA#20) și aditiv cristalin (CA, Xypex Admix C-1000NF)	Încovoiere în 3 puncte Test. Proba creștătă la mijloc.	[84]



Continuare Tab. 2.3.1.

3	Beton cu rezistență normală	P II 52,5	0,45	sulfoaluminat de calciu expansiv agent și metacaolin natural cu a cantitate mică de aditivi	Epruvete testate la compresiune	[85]
4	Beton armat cu fibre	II/A-L 42,5 R	0,60	Fără specificație	Întindere prin despicare	[75]
5	Beton armat cu fibre	II 42,5	0,50	amestec cristalin (Penetron Admix)	Tracțiune -încovoiere	[86]
6	Beton armat cu fibre	II/A-L 42,5 R	0,45	Fără specificație	Întindere prin despicare	[74]
7	Beton armat cu fibre	I 42,5 N	0,25	aditiv cristalin și aditiv expansiv	Întindere prin despicare	[61]
8	Beton armat cu fibre de performanță ridicată	Fară specifi cații	0,43	aditiv cristalin (WT-250 by Sika)	Încovoiere în trei puncte	[88]
9	Compozite cementoase armate cu fibre de performanta ridicata	I 52,5	0,18	amestec de ciment, nisip și microsiline	Încovoiere în 4 puncte	[83]

Tab. 2.3.2. Timpul până la inducerea fisurilor, deschidere fisuri, zile de vindecare, mod de condiționare [81].

Nr. crt.	Timp până la inducerea fisurilor	Deschidere fisuri	Zile de vindecare	Condiționare	Refe rința
1	35-42 zile	130 și 250μm	1,3,6 și 12 luni	Imersat în apă sau expus la aer	[83]
2	7 zile	0-200 μm	28 zile	Vindecare în apă plată	[84]
3	7 zile	Fără specificații	28 zile	Imersat în apă	[85]
4	2 zile	100 și 400 μm	42 zile	Imersat în apă la 15°C, imersat în apă la 30 °C și cicluri umed/uscat	[75]

Continuare Tab. 2.3.2

5	3, 7; 28 și 56 de zile și 4 luni	Mai mici de 300 μm	Până la 6 luni	Expuse în aer	[86]
6	2 zile	Mai mici de 300 μm	42 zile	Imersare în apă, apă Expusă la umiditatea aerului din camera și expunerea la laborator condiție	[74]
7	28 zile	100-400 μm	4, 7, 14- și 28- zile	Imersat în apă	[61]
8	28 zile	200 μm	56 zile	Imersat în apă și expusă în aer	[88]
9	2 luni	130 și 250 μm	până la șase luni	Imersat în apă	[83]

Mecanismul de auto-vindecarea la care se utilizează aditivi cristalini indică rezultate bune pentru probele imersate în apă sau supuse la cicluri de umed-uscăt [75].

Lățimea fisurilor care poate fi vindecată cu aditiv cristalin este de maxim 300 μm [88], [80], dar dacă la realizarea compozițiilor pe lângă aditivi cristalini se adaugă și aditivi expansivi, mecanismele de auto-vindecare fiind combinate, lățimea fisurilor vindecate poate fi mărită până la 400 μm [74].

Umiditatea are un rol important în realizarea mecanismului de auto-vindecare, dacă în compoziția betonului se adaugă agenți chimici (aditivi cristalini) pentru a induce depunerea și umplerea fisurii [88], [74].

După ce fisurarea este formată, în prezența umidității, silicatul tricalcic (alitul) (C<sub>3</sub>S) reacționează cu hidrura de Cesium (CSH) și se depune pe pereții fisurilor și umple fisura [74].

Calitatea mecanismului de auto-vindecare al betonului poate fi diminuată în funcție de proporția amestecului, temperatură, umiditate ambientală și solicitările din zona fisurată, respectiv dacă solicitarea este prea mare, la zona de fisură deja vindecată pot apărea noi fisuri [88].

La realizarea compozițiilor cementoase cercetătorii au folosit cu preponderență aditivi cristalini disponibili comercial, precum: WT-250 comercializat de Sika [87] Admix C-1000NF de la Xypex [84] Penetron

Admix de la Penetron [86] sau nu au specificat utilizarea tipului de aditiv cristalin la realizarea compoziției studiate.

Esscfres et. al. a indicat un conținut mai mare de Mg utilizat la realizarea compoziției cementoase care poate conduce la o cantitate mai mare de aragonit subprodus de vindecare [87].

Ferrara et. al. [83] a utilizat o compoziție de aditiv cristalin compusă din ciment, nisip și microsiline. Compoziția a fost investigată prin analize EDS și comparată cu proba martor realizată din ciment Portland. Diferența dintre probe a fost prin prezența unui vârf ușor mai mare de sulf. Betonul cu rezistență normală și eșantioanele de beton de înaltă performanță au fost fisurate după 2 luni și s-au vindecat prin condiționare prin imersie în apă, respectiv expuse la aer. Deschiderea fisurilor a fost de 0,2 mm pentru betonul cu rezistență normală. A fost evidențiată o bună capacitate de sigilare a fisurilor la betonul de rezistență normală și la betonul de înaltă rezistență ce au în compoziția lor aditiv cristalin, iar epruvetele au fost condiționate prin imersie în apă. Testarea capacității de auto-vindecare a continuat și a fost indicată o îmbunătățire a procesului și după 12 luni [83].

Escoffres et. al. [87] a utilizat la prepararea compoziției un amestec cristalin disponibil comercial de la SIKKA WT-200. S-a făcut analiza EDS care a indicat cantități mari de Mg în acest amestec.

M. Roig-Flores și echipa ei [74] au investigat capacitatea de vindecare a fisurilor a epruvetelor de beton cu și fără amestec de aditiv cristalin. Au fost induse fisuri la epruvetele cu vârsta de 2 zile și cu o lățime a fisurii investigată sub 0,3 mm. Expunerea epruvetelor a fost făcută în diferite condiții de mediu, pentru a se accelera fenomenul de vindecarea al fisurilor și anume – prin imersare în apă, în contact cu apa, cameră de condiționare a epruvetelor la o anumită umiditate, respectiv prin expunerea la aer. Concluziile rezultate în urma acestui studiu au indicat capacitatea de vindecare a fisurilor crește pentru epruvetele condiționate prin imersare în apă și conțin amestecul cristalin. Fisurile epruvetelor ce conțin amestec cristalin au fost vindecate în jur de 95%, respectiv de 75% la epruvetele fără amestec cristalin.

Epruvetele cu și fără amestec cristalin expuse într-o incintă cu umiditate și în aer au avut o capacitate scăzută de vindecare a fisurilor. Această evaluare a fost făcută și comparată la 0 și 42 zile [74].

Wang et. al. [84] au folosit la proiectarea compoziției cementoase materiale precum agregate poroase din argilă expandată ca recipient de carbonat de sodiu, aditiv cristalin ce constă din catalizatori cristalini și

silice reactivă, comercializat sub denumirea de Xypex Admix C-100NF și aditiv expansiv pe bază de sulfoaluminat Denka CSA#20.

A fost indusă starea de fisurare a probelor la vârsta de 7 zile și s-au vindecat, respectiv condiționat prin imersare în apă timp de 28 de zile. Rezultatele reprezentative ale închiderii fisurilor au fost obținute la compozițiile care au în amestec lor 10-12% carbonat de sodiu, 7-10% agent expansiv pe bază de sulfoaluminat, 4,5% aditiv cristalin [84].

Cuenca et. al. [86] a făcut cercetări asupra capacității de auto-vindecare a betonului armat cu fibre, expus la multe cicluri de auto-vindecare – inducere fisuri. Pentru a accelera auto-vindecarea a fost folosit un amestec cristalin. Probele au fost fisurate utilizând testul de despicare. Probele au fost vindecate după inducerea fisurilor și condiționarea acestora în apă, în aer liber și cicluri de ud-uscă. Probele condiționate prin expunere la aer au indicat o capacitate scăzută de închidere a fisurilor. Fisura complet vindecată a fost la probele cu deschiderea fisurii mai mică de 0,3 mm care au fost condiționate prin imersare în apă, periodic sau permanent. Numeroase fisuri au arătat o bună capacitate de închidere repetată a fisurilor timp de un an după teste repetate de fisurare [86].

Coppola et. al. [89] au studiat un mecanism nou de auto-vindecare a betonului prin adăugare în compoziția acestuia a acidului fumaric.

S-a constatat că prin utilizarea acidului fumaric este posibilă precipitarea de cristale mai dense comparativ cu produsele disponibile comercial. Fisurile probei cu deschiderea de până la 0,4 mm sunt vindecate după 7 zile de condiționare a probei prin imersarea în apă. Nu s-a observat nicio îmbunătățire a hidroizolației dacă doza de acid fumaric a crescut procentual de la 1 până la 2 % raportat la cantitatea de ciment.

Diverși cercetători au folosit în cercetările efectuate asupra îmbunătățirii mecanismelor de auto-vindecare prin înglobarea în masa betonului a următorilor aditivi materiali: sulfoaluminat de calciu, var, argilă bentonitică, cenușă zburătoare, praf de silice și zgură de furnal, prezentați schematic în tabelul 2.1.3 (tipul de aditivi utilizați în cercetare, raportul de aditivi minerali și condițiile de expunere a probelor pentru realizarea mecanismului de auto-vindecare) și tabelul 2.1.4. (Modul de fisurare, respectiv capacitatea de sigilare a deschiderii fisurilor raportate la timp) [90].

Tab. 2.3.3. Tipul de aditivi utilizați în cercetare, raportul de aditivi minerali și condițiile de expunere a probelor pentru realizarea mecanismului de auto-vindecare [90].

<b>Nr. Crt.</b>	<b>Tip aditiv mineral</b>	<b>Raportul de aditivi minerali</b>	<b>Condiții de expunere</b>	<b>Ref. bibl.</b>
1	Aditiv cristalin (CA), sulfoaluminat de calciu (CSA), și cenușă zburătoare (FA)	1,5% aditiv cristalin și ciment portland obișnuit cu 10% sulfoaluminat de calciu	apă	[61]
2	Oxid de magneziu (MgO)	5% înlocuit din cantitatea de ciment	apă	[91]
3	Zgură din oțel carbonată	4,4%, 15,2% din cantitatea de ciment	apă	[92]
4	Polimeri superabsorbanti	0,5% , 1%	Umiditatea relativă de 90% și temperatură de (20 ± 2) °C	[72]
5	Sulfoaluminat de calciu	Până la 10% (beton)	apă	[93]
6	Cenușă zburătoare	15-20% din ciment	apă	[94]
7	Cenușă zburătoare, aditiv cristalin, praf de silice	Zgură din oțel carbonată + 10% praf de silice Zgură din oțel carbonată + 1% aditiv cristalin Zgură din oțel carbonată + 30% cenușă zburătoare	apă	[95]
8	Combinăția de praf de silice și MgO	(5% praf de silice + 5% MgO) ca înlocuitor al cimentului	apă	[91]
9	Praf de silice, argilă bentonitică, Ca, agent chimic expansiv	8% până la 14%	Apă, aer, umed- uscat, îngheț-dezghet	[96]
10	Zgură, cenușă zburătoare	30-40% din mortar	apă	[58]
11	Zgură de furnal	50% zgură de furnal+ 50% ciment Portland obișnuit	apă	[95]
12	Cenușă zburătoare	5-15% din nisip	apă	[97]
13	Zgură, cenușă zburătoare, var	85% zgură și 30%, 50% cenușă zburătoare; var 50%, 75%	apă	[56]
14	Argilă bentonitică, var, zgură	2% fibre PVA din volum. (Diam.=40 μm, Lungime = 8 mm)	Apă, umed- uscat, aer	[98]

Continuare Tab. 2.3.3.

15	Zgură de furnal	66% înlocuitor al cimentului	Saturat Soluție de Ca(OH) <sub>2</sub>	[99]
16	Argilă bentonitică	Nanoargila ca furnizor intern de apă	Apă	[100]
17	MgO	4–12% din cantitatea de ciment	Apă	[101] [102]
18	Zgură din oțel carbonată	PVA, până la 10% din mortar, 1:3	Apă	[103]
19	Argilă	Monofluorofosfat de sodiu și mortar	Apă	[104]
20	Zgură din oțel carbonată	Agregate	Apă Condițiile de expunere pentru vindecare (95–98)% umiditatea relativă și temperatura de (20 ± 2) <sup>o</sup> C	[105]
21	Zgură	66% din masa de ciment	Ca(OH) <sub>2</sub> solution	[99]
22	Aditiv mineral: microsilice + nisip + ciment	1-2% din cantitatea de ciment	Apă, aer deschis	[83]
23	Cenușă zburătoare, var nestins	3% din cantitatea de ciment	Apă	[106]

Tab. 2.3.4. Modul de fisurării respectiv capacitatea de sigilare a deschiderii fisurilor raportate în timp [90].

Nr. Crt.	Modul de inducere al fisurării	Capacitatea de sigilare a deschiderii fisurilor raportate în timp	Ref. Bibl.
1	Solicitarea la încovoiere	-100–400 μm de calcit în 56 zile	[61]
2	Sarcina aplicată corespunzător la 80% din valoarea rezistenței la compresiune la vârsta de 7 zile	-Analiza spectrelor în domeniul spectroscopiei în infraroșu (FTIR) a confirmat prezența benzilor ascuțite în jurul valorii de 1400 și 1500 cm <sup>-1</sup> datorită legăturii de întindere C–O, care corespund cu (CaCO <sub>3</sub> și MgCO <sub>3</sub> ) faze la 28 de zile	[91]

Continuare Tab. 2.3.4.

3	forța de testare	- Fisurile au fost sigilate în 14 zile cu deschiderea mai mică de 100 $\mu\text{m}$ - Fisuri mai mici de 150 $\mu\text{m}$ aproape complet vindecate	[92]
4	Test de încovoiere în patru puncte	Au fost prezentate fisuri mai mari de 200 $\mu\text{m}$ cu închidere vizuală redusă	[72]
5	Testul la încovoiere în trei puncte	160–220 $\mu\text{m}$ în calcit la 33 de zile	[93]
6	Micro-fisuri de contracție	Pori micro-macro la 91, 182 și 364 zile	[94]
7	Încercarea la încovoiere prin despicare	-50 $\mu\text{m}$ în 12 zile, fisurile mai mari se vindecă eficient cu praf de silice	[95]
8	Sarcina aplicata corespunzator la 80% din valoarea maximă a rezistenței la compresiune la vârsta de 7 zile	Analiza spectrelor FTIR au confirmat benzi ascuțite în jur 980 $\text{cm}^{-1}$ pentru legăturile Si–O, care indicați C–S–H - Fisurile au fost sigilate în 14 zile	[91]
9	Compresiune, Încovoiere prin despicare	220 $\mu\text{m}$ în 14 zile Silice, Calciu	[96]
10	Contracție	Rezistență crescută	[58]
11	Mecanic	A fost de 3 ori mai rapid pentru ciment	[95]
12	Îngheț-dezgeț	Deteriorări crescute cu 90% într-o zi	[97]
13	Mecanic, încovoiere în trei puncte	200 $\mu\text{m}$ în 42 de zile	[56]
14	Mecanic, încovoiere în patru puncte	Fibrele cresc capacitatea de îndoire la reîncărcare	[98]
15	Microfisuri	30 $\mu\text{m}$ din lățime au fost vindecate în jur 60%, respectiv 30%.	[99]
16	Mecanic	-Hidratare îmbunătățită pentru auto-vindecare	[100]
17	Contracție prin uscare, încovoiere în trei puncte	<500 $\mu\text{m}$ în 28 zile -Durabilitatea îmbunătățită	[101] [102]
18	Încovoiere în trei puncte	100–200 $\mu\text{m}$ -16 zile $\mu\text{m}$ -14 zile,<100 $\mu\text{m}$ -11 zile,	[103]
19	Mecanic	Reducerea absorbției fosforului, sodiu și fluor, CH	[104]

20	Mai multe bucăți din zgură din oțel carbonatată au fost rupte în jumătăți și puse împreună	Zona de vindecare eficientă ajunge până la 1/3 din zona fisurată după 3 luni	[105]
21	Tăiat, mecanic	60% din 10 μm în 10 zile -Hidrogenat, C-S-H, etringit	[99]
22	Încovoiere în patru puncte	60% fisuri sigilate la temperatură ambientală	[83]
23	Mecanic	Solubilitatea îmbunătățită a SiO <sub>2</sub>	[106]

Tabelul 2.3.1 evidențiază evoluția și tendințele mecanismului de auto-vindecare la care sunt utilizați la prepararea betoanelor adaosurile de aditivi minerali [90].

Sisomphon et. al. [61] au folosit în cercetarea sa aditiv cristalin din silice reactivă și catalizatori cristalini (materiale hidrofile hidroizolatoare) respectiv un aditiv expansiv pe bază de sulfoaluminat de calciu. Probele au fost fisurate cu o dimensiune a fisurii probei cuprinsă între (0,1 - 0,4)mm, la vârsta de 28 de zile. Probele au fost condiționate prin imersare în apă timp de 28 de zile. Fisurile cu deschiderea până la 0,15 mm pot fi închise după 28 de zile [61].

Roig-Flores et.al. [75] a investigat influența amestecului cristalin asupra vindecării fisurilor în diferite condiții de expunere, timp de 42 zile a probelor și anume imersie în apă la temperatura de 15 °C și 30 °C și cicluri umed/uscă. Rezultate cele mai reprezentative ale capacității de închidere ale fisurilor au fost obținute pentru probele menținute la temperatura de 30°C și imersate în apă, respectiv fisurile cu deschiderea maximă de 0,4 mm au fost sigilate.

### **2.3.2. Betonul cu mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat cu polimeri superabsorbanți.**

Prin înglobarea polimerilor superabsorbanți (SAP) în masa betonului la momentul preparării acestuia duce la îmbunătățirea capacității de auto-vindecare a betonului. Rețelele polimerice au capacitatea de a absorbi și reține o cantitate de lichid fără a se dizolva. Particulele de polimeri superabsorbanți în momentul preparării betonului se umflă datorită absorbției și se contractă în timpul întăririi betonului formându-se astfel macropori, respectiv defecte inițiale ce conduc la apariția fisurării multiple a betonului [51], [107].



Particulele din polimeri superabsorbanti îngolbate în masa betonului întărit sunt foarte utile în realizarea mecanismului de auto-vindecare autonomă, deoarece absorb apă în timpul expunerii elementelor din beton la umiditate și eliberează apa absorbită în perioadele uscate. Astfel apa este prezentă continuu pentru realizarea mecanismului de auto-vindecare autonom, sigilând fisurile inițiale, crescând astfel perioada de exploatare a elementelor realizate cu acest tip de material [51], [108].

Polimerii superabsorbanti sunt capabili să preia o cantitate semnificativă (de până la 500 de ori mai mare decât greutatea proprie) de fluide din mediu [109]. Introduși într-un lichid, declanșează umflarea strâns legată de presiunea osmotică și pot fi analizați folosind diferite tehnici [110,111]. Dacă fluidul este apă, sunt numiți hidrogeluri. Hidrogelurile sunt folosite în prezent în lentile de contact, schele în inginerie tisulară, sisteme inteligente de livrare cu eliberare susținută, produse de îngrijire a sănătății umane etc [112].

SAP-urile pot fi utilizate în materialele cimentoase pentru reducerea factorului autogen de contracție (întărire internă) [114-119], pentru modificarea reologiei materialului proaspăt [120], și pentru creșterea rezistențelor la îngheț/dezghet [120]. Didier Snoeck a analizat în cercetările sale atenuarea contracției autogene cu și fără adaosuri suplimentare de ciment, cenușa zburătoare și zgura de furnal [117].

Pentru a determina eficacitatea SAP-urilor s-a utilizat rezonanța magnetică nucleară [118,119,121]. Eliberarea cinetică a apei din SAP spre matricea de ciment, în timpul hidratării cimentului se monitorizată [118] prin intermediul radiografiei cu neutroni [122].

Utilizarea de polimeri superabsorbanti pentru a sigila și vindeca fisurile este intens studiată în lucrările lui Didier Snoeck.

Pe măsură ce polimerii superabsorbanti sunt capabili să se umfle, vor absorbi o parte din apa de amestecare [109] fapt ce va duce la o lucrabilitate scăzută, formându-se macropori, datorită unei modificări a microstructurii. Pentru a contracara acest fenomen, se adaugă apă suplimentară pentru compensarea lucrabilității scăzute, conducând la aceleași proprietăți ale microstructurii [123, 124].

Cu toate acestea, macroporii rămân prezenți, ducând la reducerea proprietăților mecanice [124, 125]. Pentru a limita umflarea și

influențarea proprietăților mecanice, se utilizează SAP sensibile la pH [126,127] sau SAP acoperite [128].

Datorită capacității lor de umflare la contactul cu fluide, SAP pot determina o scădere a permeabilității fisurilor materiale cementoase [109]. Când lichidele intră într-o fisură, particulele SAP vor pătrunde de-a lungul fețelor fisurii, se vor umfla și vor bloca fisura [129-132].

Alimentarea internă cu apă prin SAP-urile are o influență pozitivă asupra procesului de vindecare autogenă. SAP-urile pot menține hidratarea prin cedarea apei absorbite și furnizează apă pentru formarea produselor de vindecare.

Pentru determinarea deplasării apei într-un specimen, se pot utiliza mai multe metode, atât distructive cât și nedistructive [133]. O metodă este utilizarea unui set de testare a permeabilității apei. Cu toate acestea, în această metodă, potențialul de etanșare a fisurilor al particulelor SAP nu poate fi vizualizat, doar măsurat [109], speciunile care conțin SAP arătând inițial o scădere a permeabilității. Acest lucru se datorează în principal efectului de umflare al SAP-urilor și blocării fisurii de către SAP-uri. Scăderea permeabilității apei este deci o măsură pentru capacitatea de etanșare.

În fisurile cu lățimea de 100-300  $\mu\text{m}$ , SAP-urile cu dimensiunile de aproximativ 500  $\mu\text{m}$  sunt mai bune în ceea ce privește etanșarea comparativ cu SAP de 100  $\mu\text{m}$ , deoarece acestea din urmă sunt spălate și nu sunt capabile să umple fisurile, chiar dacă sunt utilizate cantități mari (1 % din greutatea cimentului) [132,134,135]. Datorită efectului de umflare al SAP-urilor, viteza redusă de mișcare a apei, care este esențială pentru a obține vindecarea autogenă, este optimă deoarece fisurile se pot închide datorită cristalelor depuse [109].

Într-un alt test practic, s-a montat un bazin de apă, unde pe grinzi la scară mare [136], s-a observat o scădere a pătrunderii apei prin fisurile cu SAP-uri. S-au realizat studii privind umflarea speciunilor din interior folosind microscopia electronică [137]. S-a observat că SAP-urile se umflă în interiorul golurilor, inclusiv în fisuri, provocând etanșarea materialului de ciment [137].

Mai mulți cercetători realizează studii pentru a modela auto-sigilarea prin intermediul SAP-urilor [138,139] și pentru a spori aplicarea lor în domeniu.

Prin utilizarea radiografiei cu neutroni, efectul de autoetanșare ar putea fi studiat în detaliu [132]. Pe epruvete cilindrice mici cu diametrul de 10 mm și înălțimea de 20 mm, a fost realizată o coloană de apă cu înălțimea de 20 mm pentru a se determina permeabilitatea la apă a epruvetelor fisurate fără SAP și a epruvetelor fisurate cu conținut de 1 % SAP-uri din cantitatea de ciment. În cazul epruvetelor unde nu au fost utilizați SAP-uri, coloana de apă scade rapid în timp. Datorită blocării fisurii, cauzate de acțiunea de umflare a SAP-uri, coloana de apă scade puțin în timp. Auto-etanșarea nu este permanentă și este legată de scăderea inițială a permeabilității. Posibilul efect de auto-etanșare temporală poate să împiedice refacerea proprietăților mecanice. Pe de altă parte, această revenire este rezultatul auto-vindecării [109].

În urma testelor, fisurile mai mici de 30  $\mu\text{m}$  expuse la cicluri umed/uscat s-au vindecat complet atât cu, cât și fără SAP. Fisuri între 50  $\mu\text{m}$  și 150  $\mu\text{m}$  s-au vindecat parțial în probe fără SAP, și o fisură de 138  $\mu\text{m}$  s-a închis complet după 28 cicluri umed/uscat într-un specimen care conține SAP [134]. Pentru fisurile cu deschiderea mai mare de 200  $\mu\text{m}$  nu a fost observată aproape nici o vindecare.

În literatura de specialitate s-a utilizat 0,2-0,6 m% SAP pentru a reduce contracția materialului cementos [113].

Formarea produselor de vindecare ar putea fi vizualizată prin mijloace de scanare  $\mu\text{CT}$  cu raze X, folosind probe cilindrice fisurate cu o înălțime de 10 mm și un diametru de 6 mm [140], lățimea fisurii fiind de aproximativ 100  $\mu\text{m}$ .

După păstrarea în cicluri umed/uscat timp de 28 de zile, epruvetele de referință sunt cele cu gradul cel mai mare de vindecare. Produsele de vindecare sunt formate în partea de sus și de jos a specimenului la suprafața fisurii de la 0 la 800-1000  $\mu\text{m}$  în interiorul fisurii [140]. Cea mai mare cantitate se găsește în intervalul de adâncime 0-100  $\mu\text{m}$ . În interiorul unei fisuri, cantitatea de produse de vindecare este mai mică și doar în unele locuri distincte, produsele de vindecare fac o punte, probabil în vecinătatea unei fibre (deoarece acesta acționează ca un magnet pentru cristalele de carbonat de calciu).

Materialele cementoase se vindecă cel mai bine în cicluri umed/uscat atunci când particulele de SAP sunt amestecate cu compoziția, în principal datorită disponibilității apei în perioadele secetoase.

Utilizarea SAP-urilor pentru realizarea elementelor de construcții are numeroase avantaje cum ar fi: absorbția apei din amestecul de beton proaspăt și furnizarea acestuia la particulele de ciment în momentul potrivit pentru procesul de hidratare. În betonul întărit, SAP-urile pot etanșa fisurile care apar, deoarece acestea se umflă în contact cu apa care se infiltrează. Acest fenomen reduce absorbția de substanțe nocive, conducând la o durată de viață crescută [109].

În urma cercetărilor făcute, s-a constatat că datorită proprietăților de auto-compactare ale amestecului de întărire se pot realiza elemente din produse cementoase cu secțiuni subțiri [141].

### **2.3.3. Betonul cu mecanismul de auto - vindecare autonomă realizat cu bacterii.**

Microorganismele, omniprezente în mediu reprezintă forma predominantă de viață pe Pământ [142]. Microorganismele pot fi utilizate ca și parte integrantă a tehnologiilor avansate. Capacitatea unei comunități mari de bacterii de a transforma o sursă adecvată de nutrienți în cristalite de calcit insolubile - cunoscute sub numele de precipitare a carbonatului de calciu indusă microbial (MICP) - a fost utilizată ca parte a biotehnologiilor reprezentând o alternativă la metodele aplicate în mod traditional [142]. Printre altele, MICP este exploatat în bioconsolidarea solului [144-146], stomatologie [144], tehnologii de chituiră [147, 148], conservarea operelor de artă din piatră [149,150], în special în inginerie civilă [151-155].

Formarea carbonatului de calciu ( $\text{CaCO}_3$ ) necesită prezența unor concentrații suficiente de ioni de calciu ( $\text{Ca}^{2+}$ ) și anioni carbonați cu un nivel de saturație mai mare  $> 1$  [156]. Acest proces de biocalcificare este puternic influențat de potențialul de hidrogen (pH) al sistemului, de concentrația de ioni de calciu și de concentrația de carbon anorganic dizolvat. Un potențial mare de utilizare în inginerie civilă pentru repararea materialelor pe bază de ciment este dat de către capacitatea metabolică a bacteriilor de a transforma substanțele organice pentru a produce  $\text{CaCO}_3$  ca produs secundar.

Închiderea fisurilor folosind substanțe chimice (rășini epoxidice, emulsii de latex, polimeri pe bază de poliuretan) poate fi aplicată numai în cazul fisurilor vizibile sau accesibile; în plus, din locurile reparate pot fi eliberate gaze nocive, iar efectele reparatorii nu sunt adesea stabile în permanent [142]. Închiderea fisurilor prin utilizarea metodei de precipitare a carbonatului de calciu indusă microbial (MICP) este

prietenosă cu mediul (netoxică și lipsită de poluare) și ajută la consolidarea suprafețelor materialelor cementoase [157,158].

Nivelurile ridicate de concentrații de bacterii permit o densitate mai mare a grupurilor de carbonat de calciu nou formate în interiorul fisurii, rezultând o creștere a rezistenței la compresiune și a rigidității probei [142]. Prin parametri ajustabili din exterior, este important să se controleze această parte a curbei de creștere bacteriană, deoarece carbonatogeneza are loc în principal în timpul fazei exponențiale a proliferării bacteriilor.

De-a lungul timpului s-au realizat multe studii detaliate care se ocupă de aplicarea tehnicilor de autovindecare [159], selecția speciilor de bacterii adecvate [155,160] și cea optimă.

Pavel Demo și colab. [142] a testat *Bacillus pseudofirmus* pentru a repara fisurile de pe suprafața unei paste de ciment veche de 2 ani (pastrată în condiții de laborator, sub 50% umiditate și la 30°C) pentru a ilustra capacitatea de autovindecare a microorganismelor calcifiante. (fisura analizată avea o lățime de 0,25 mm).

Capacitatea de autovindecare a fisurilor este strâns legată cu concentrația de bacterii nou formate și cu condițiile de mediu (de exemplu, temperatura, densitatea numărului de cationi de calciu liberi prezenți, factorul pH etc.).

Înainte de aplicarea culturii bacteriene, suprafața probei a fost curățată pentru a permite o mai bună observare a procesului de calcifiere. În cele din urmă, s-au implantat 0,05 ml de mediu care conține bacterii în fisurile examinate și apoi proba a fost plasată într-un desicator (99% umiditate) pentru a preveni deshidratarea mediului [142].

Capacitatea bacteriilor (aici, *Bacillus pseudofirmus*) de a transforma sursele de nutrienți în cristalite insolubile de calcit a fost exploatată pentru a umple fisurile și pentru a forma un strat protector pe suprafața deteriorată. S-a constatat că diviziunea (creșterea) controlabilă a microorganismelor este crucială pentru un proces optim de autovindecare. Pavel Demo și colab. [142] au observat că capacitatea metabolismului bacteriilor de a procesa sursa de nutriție poate afecta semnificativ concentrația maximă de bacterii.

Salmabanu Luhar și colab. [161] a observat că în urma studiilor efectuate, rezultatele sale sugerează că timpul necesar pentru etanșarea și vindecarea fisurilor în betonul bacterian cu condiții adecvate de întărire este o perioadă prelungită, de cel puțin două până la trei săptămâni. Pentru a obține o vindecare rapidă și bine organizată prin

bioacțiune, controlul lățimii fisurilor este, de asemenea, un aspect esențial [162].

Dong și colab. [163] au lucrat pentru a dezvolta microcapsule cu eliberare inteligentă pentru a vindeca degradările betonului, în special coroziunea barelor de armare cauzată de o alcalinitate scăzută a matricei de beton.

Tehnicile de estimare a durabilității pot fi utilizate pentru a îmbunătăți ciclul de viață al sistemelor de auto-vindecare bio [164,165]. Având în vedere acestea, bioagenții vindecători pot fi amestecați cu material de captare a carbonului [166] pentru a face compozite cementoase utilizate în domeniul construcțiilor, care sunt mai durabile și autonome „verzi” [161].

Cercetătorii care au făcut studii asupra acestor materiale și anume suplimentul de lactat de calciu poate întârzia timpul de priză, în timp ce lactatul de calciu și nitratul pot crește viteza de priză a betonului [161].

Deasemenea *Bacillus pasteurii* și *Bacillus subtilis* sunt cele mai eficiente și utile bacterii pentru vindecarea fisurilor din beton care pot îmbunătăți microstructura acestuia prin precipitații minerale care au fost confirmate prin analize EDS, SEM și XRD.

În zonele supuse unor umidități mari,  $\text{CaCO}_3$  poate rezista ploii acide și protejează armăturile structural de coroziune și sporește durabilitatea structurilor. De asemenea s-a observat că precipitarea  $\text{CaCO}_3$  îmbunătățește rezistența la compresiune a betonului structural și contribuie la o permeabilitate și porozitate mai redusă a mortarului de ciment.

#### **2.3.4. Betonul cu mecanismul de auto-vindecare autonomă realizată cu agenți de vindecare încorporați în capsule.**

Capsulele oferă protecție mecanică agenților de auto-vindecare în matricea cementoasă. Agenții de vindecare din capsule în momentul fisurării matricei cementoase și spargerea capsulei sunt eliberați în fisuri prin acțiunea capilară, oprind umezeala.

Strategia de utilizare a încapsulării agenților de vindecare chimici sau biologici, mărește durata de viață a acestora, respectiv permit controlul eliberării acestora în matricea cementoasă. În urma studiilor efectuate în literatura de specialitate se indică faptul că utilizarea capsulelor este versatilă și calitatea reparației este satisfăcătoare, având rezultate bune din punct de vedere al recuperării mecanice, respectiv a proprietății de durabilitate.

Pe termen lung, abordarea cercetărilor bazate pe mecanismul de auto-vindecare cu ajutorul capsulelor este o provocare privind repetabilitatea sa. Structurile din beton sunt supuse mai multor cicluri de deteriorare pe parcursul duratei de exploatare, prin urmare, este de așteptat utilizarea unui sistem de auto-vindecare bazat pe capsule, pentru a oferi multiple secvențe de vindecare. Microcapsulele conțin cantități limitate de agent de vindecare, prin urmare, majoritatea agenților de vindecare sunt epuizați la un singur ciclu de încărcare și prin urmare, vindecarea repetată pe termen lung este discutabilă [167].

Gupta Souradeep și Harn Wei Kua a studiat proiectarea capsulelor astfel încât să se poată realiza mai multe cicluri de vindecare. Thao [168] și Van Tittelboom și colab. [169] au evaluat eficacitatea vindecării sub mai multe cicluri de încărcare prin încorporarea agentului de vindecare în tuburi descoperind că recuperarea rigidității scade sub multiple cicluri de încărcare.

În Fig. 2.3.4. este reprezentat schematic mecanismul de vindecarea prin abordare pe bază de microcapsule. În funcție de tehnica de încapsulare utilizată, capsule sunt fie plasate strategic în zonele sensibile și predispuse sau sunt dispersate în întreaga matrice cimentoasă cât mai uniform posibil.

Vindecarea pe bază de capsule poate fi clasificată în: vindecare indusă de precipitarea bacteriană și substanța chimică încapsulată cu agenți de vindecare.

Joseph și colab. [170,171], Van Tittelboom și De Belie [172] și Sun și colab. [173], au studiat geometria capsulei și designul special pentru amestec, remarcând că forța capilară insuficientă a fisurii și presiunea gravitațională a masei fluidului va conduce la un grad de vindecare mai scăzut, față de cel preconizat, agentul fiind eliberat în matricea cimentoasă.

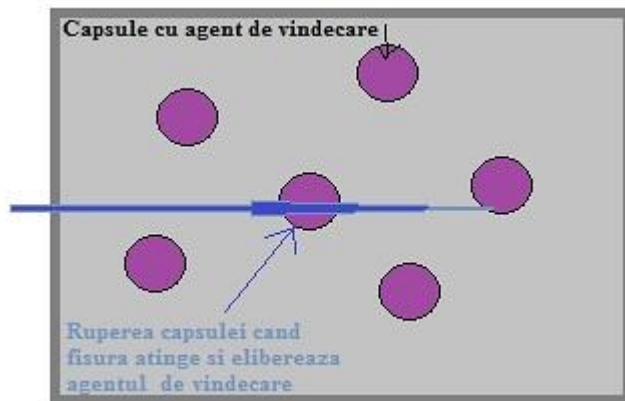


Fig. 2.8. Schema mecanismului de auto-vindecare cu ajutorul capsulelor

Capsule cilindrice în multe ocazii suferă de forță capilară rezistivă și presiune negativă la ambele capete. Această problemă a fost într-o oarecare măsură ameliorată de Li și colab. [174] folosind cantități mari de fibre de polietilenă (PE) pentru a controla lățimea fisurii și prin aceasta creșterea capilarității și atragerea fisurilor pentru a elibera agentul de vindecare. De Rooij et al. [175] și Liu și colab. [176] au propus utilizarea cavității acoperite cu fibre vegetale ca încapsulare pentru a reduce presiunea negativă la capete sigilate ale tuburilor capilare de sticlă eliberând astfel agentul de vindecare în locurile fisurate.

Cercetările efectuate de Jung [177] au pus în evidență aspectul că capsulele de formă sferică permit distanța de transport mai mică a materialului de vindecare în fisuri, comparativ cu capsulele de formă alungită. Această eliberare sporită a agenților de vindecare din capsulele sferice ar putea fi o problemă din cauza epuizării rapide a materialului de vindecare [178].

Feng și colab. [179] au observat că folosind material epoxidic ca agent de vindecare în interiorul capsulelor sferice, se vindecă doar câteva fisuri, datorate epuizării rapide a agentului de vindecare. Capsulele de formă cilindrică au prezentat o îmbunătățire semnificativă a recuperării mai bune a proprietăților mecanice, precum rezistența și durabilitatea.

Kaltzakorta și Erkizia [180] au încapsulat două componente epoxidice în microcapsule de silice.

Mihashi și colab. [181] au folosit capsule sferice cu o uree formaldehidă în înveliș de formol, care conține epoxid bicomponent. Au constatat că vindecarea a fost inefficientă din cauza amestecării



inadecvate și întărirea materialului epoxidic bicomponent. Acest proces a fost îmbunătățit de Feng și colab. [179], care au înlocuit rășina epoxidică cu un produs chimic diluat pentru a regla vâscozitatea și pentru a obține un randament mai bun la amestecare. Deși reacția poate avea loc la temperatura camerei, beneficiul deplin a fost obținut numai prin întărire termică la temperatura de 120°C.

Odată ce capsulele sunt rupte, agentul de vindecare este de așteptat să fie eliberat și dispersat rapid în matricea cementoasă. În această privință, capsulele sferice ar putea fi mai bune decât cele cilindrice, deoarece primele au o formă mai uniformă și efectele de aspirație la închiderea capetelor capsulelor cilindrice îngreunează eliberarea agentului de vindecare din acestea [167].

Van Tittelboom și colab. [182] au studiat eficiența eliberării a agentului de vindecare cu două tipuri de dimensiuni de tub. Tuburile lungi și continue nu au avut capacitatea de a elibera agentul de vindecare după spargere acestora, deoarece forța de rezistență din interiorul capsulelor lungi a fost mare. Capsulele cu o lungime de 60 mm, respectiv 3 mm grosime, s-au dovedit a fi mai eficiente în ceea ce privește eliberarea agentului de vindecare și etanșarea fisurilor.

Mookhoek [183] și Mookhoek și colab. [184] au observat că pentru aceeași fracțiune de volum de capsulă, cantități mai mari de agent de vindecare ar putea fi livrat într-o anumită locație a fisurii prin capsule cilindrice. Astfel vindecarea unui volum mai mare de fisuri este mai eficientă prin capsule cilindrice.

Rășina epoxidică este, de asemenea, utilizată pe scară largă ca agent de vindecare. Deoarece sunt disponibile rășini cu vâscozitate diferită, rășina epoxidică poate fi modificată prin diluarea ei cu ajutorul unor produse chimice [179].

### **2.3.5. Betonul cu mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat prin utilizarea tuburilor**

Literatura de specialitate indică posibilitatea de obținere a proprietății de auto-vindecare prin mecanisme bazate pe exploatarea proprietăților unor polimeri încorporați în matricea cementoasă, ca agenți de vindecare [185]. Avantajul în acest caz, este faptul că structurile chimice ale acestor polimeri nu se modifică ca urmare a inițierii procesului de vindecare, ceea ce este diferit față de majoritatea sistemelor de auto-vindecare intrinseci [186].

Dintre adaosurile disponibile care conțin agent de vindecare, microconducele [187] sunt capabile să stocheze/furnizeze o cantitate mai mare de agent de vindecare, uneori, permit vindecarea multiplă prin conexiune cu o sursă de alimentare cu agent de auto-vindecare extern, în comparație cu microcapsulele [188].

Durată de vindecare prea mare sau eficiența de vindecare mai scăzută sunt factori care duc la căutarea unor soluții cât mai viabile și durabile pentru a îmbunătăți mecanismul de auto-vindecare. În situații extreme, procesul de vindecare poate dura și 12 luni [189].

O varietate foarte mare de configurații de microconducele au fost analizate în literatura de specialitate, precum:

- tuburile goale de fibră de sticlă [190,195],
- fibră de carbon goală [196],
- tub de polimer gol [197, 198],
- tub metalic gol [199],
- tuburi ceramice, din polistiren extrudat sau ciment.

Tuburile de sticlă și-au demonstrat eficiența în timpul testelor realizate în laborator, dar, acest tip de înveliș de material este incompatibil cu procesul de omogenizare și montarea lor la fața locului [200, 201].

În lucrarea lui Hillouin și colab. [202], au fost propuse tuburi din polistiren extrudat, acid poli(lactic) și poli (metacrilat de metil). Nu s-au constatat probleme în timpul procesului de amestecare fără nicio protecție specială și să se rupă la apariția fisurilor fără o intervenție externă; cu toate acestea, durabilitatea agentului de vindecare selectat (rășină PU) în interiorul capsulei a fost limitată. Formia et al. [203], au prezentat eficacitatea tuburilor goale din ciment produse printr-un proces de extrudare [203]. Tuburile (diametrul interior = 7,5 mm; diametrul exterior = 10 mm) au prezentat o rezistență la încovoiere comparabilă cu rezistența la încovoiere a mortarului de ciment. Mai mult, a fost verificată capacitatea tuburilor goale de a nu fi deteriorate în timpul procesului de amestecare. În acest caz, silicatul de sodiu s-a fost folosit ca agent de vindecare. Rezultatele preliminare ale testelor de încovoiere în trei puncte efectuate pe eșantioane de mortar au indicat că silicatul de sodiu a fost eliberat efectiv din tuburi. Chiar și pentru fisuri mari de peste 1 mm, s-a evidențiat o bună recuperare a rezistenței și a rigidității. Un efect de auto-vindecare suplimentar a fost observat și la

creșterea în continuare a deschiderii fisurii după ce a avut loc primul proces de auto-vindecare.

Efectul capilar care este principalul factor de conducere al fluidul de vindecare în materiale cu microfisuri cu proprietati de auto-vindecare, devine slab pentru compozitele de fibre cu fisura deschisă [192,194,205,207].

Pentru a remedia aceste probleme, au fost utilizate în timpul vindecării, măsuri bazate pe intervenția manuală, precum evacuarea [194], încălzirea [11, 205, 206], diluarea cu solvent [194,207] și presurizarea [194,204].

S-au efectuat studii privind influența încorporării tuburilor de polipropilenă încărcate cu agent de vindecare. S-a constatat ca, rezistențele la încovoiere ale compozitelor cementoase sunt reduse după introducerea tuburilor.

În cazul distanței dintre tuburi de 500 mm, s-a observat cea mai mare scădere cu o rată de descompunere de 10,6%, spre deosebire de alte studii efectuate anterior [192, 194, 205, 207].

Sistemul de vindecare autopresurizat s-a dovedit a funcționa în compozite cementoase, efectul concentrației de agent spumă, este direct legat de volumul de gaz creat în interior tuburilor, deci de presiunea internă. Inițial, eficiența vindecării crește odată cu creșterea cantității de agent de vindecare, de unde rezultă că o presiunea internă mai mare are difuzia forțată a agentului de vindecare în regiuni mai răspândite. Când conținutul de agent depășește 3 părți, s-a observant că eficiența vindecării începe să scadă. Acest lucru apare ca urmare a faptului că presiunea internă în interiorul tubului care conține agentul de vindecare este mare, iar în urma fisurării acestuia agențul de vindecare este răspândit la nivelul fisurilor matricii cementoase. Odată cu creșterea dozei de agent de spumare, presiunea internă în tuburile de polipropilenă crește, contribuind la eliminarea unei cantități mai mari de agent în materialul compozit. Prin urmare, doza de agent de spumare trebuie optimizată în favoarea utilizării maxime a agentul de vindecare.

Literatura de specialitate indică faptul că viteza de vindecare a compozitului cimentos cu agent de vindecare microîncapsulat epoxidic este una satisfăcătoare [208, 209]. Doar o cantitate foarte mică de fisuri necesită o perioadă prelungită de vindecare. Cercetatorii au presupus că agentul epoxidic eliberat și întăritorul se întâlnesc în interiorul fisurii, având loc reacția de întărire, care mărește vâscozitatea agentului de vindecare și împiedică mișcarea compușilor. Pentru umplerea golurilor

foarte mici rămase, agentul de vindecare pătrunde foarte lent în interiorul acestora.

S-au efectuat studii privind efectul timpului de păstrare la temperatura camerei asupra capacității de vindecare pentru determinarea durabilității compozitelor. Când timpul de spumare scade de la 8 ore la 4 ore, scăderea eficienței vindecării devine mai scăzută. Din moment ce timpul mai scurt de spumare corespunde cu o descompunere mai mică a spumării agentului și presiunea internă este mai scăzută a tuburilor.

Pentru a obține rezultate mai eficiente în procesul de auto-vindecare al materialelor cementoase, este necesară creșterea timpului de spumare, acest aspect având dezavantajul scaderii durabilității. Pentru a soluționa acest aspect, cercetătorii studiază îmbunătățirea impermeabilității tuburilor din polipropilenă.

## CONTRIBUȚIA PERSONALĂ

### 3. Ipoteza de lucru/obiective

- a) **Obiectivul general** al proiectului de cercetare a fost acela de a proiecta, produce și analiza un microbeton inovativ care are în compoziția sa pe lângă materiile prime clasice de origine autohtonă și un aditiv de cristalizare în masa matricei cementoase, respectiv capacitatea acestui aditiv la îmbunătățirea capacității de auto-vindecare a compozițiilor proiectate.

Prin introducerea în faza de preparare a microbetonului, a unui aditiv impermeabilizant de cristalizare în masa matricei cementoase, în cazul fisurării, în condiții de alternare ud-uscat, are loc activarea acestui aditiv și formarea unor compuși cristalini care se depozitează la nivelul fisurii contribuind la închiderea acesteia. În funcție de caracteristicile geometrice ale fisurii, dar și de durata de expunere la alternarea ciclurilor ud-uscat, această închidere poate fi parțială sau totală și are loc cu o viteză influențată de concentrația procentuală de aditiv în matricea cementoasă compozită.

- b) **Obiectivele specifice** au fost:

- Identificarea mecanismului de auto-vindecare al microbetonului, relevant și stabilirea modului de realizare al cercetării;
- Analiza rezultatelor obținute din cercetările experimentale până în prezent;
- Analiza și stabilirea materiilor prime utilizate la prepararea microbetonului;
- Studiarea și elaborarea tehnologiei de preparare;
- Analiza fizico-mecanică și chimică a materialelor componente ale microbetonului;
- Optimizarea compoziției prin stabilirea cantitativă a materiilor prime care dau proprietatea de auto-vindecare a microbetonului.

## 4. Metodologie generală

Proiectarea și analizarea microbetonului cu capacitatea de auto-vindecare s-a desfășurat în următoarele etape:

- 4.1. Proiectarea compozițiilor preliminare ale compozitului cementos pe baza referințelor prezentate în literatura de specialitate în contextul specificului local și disponibilității de materii prime.
- 4.2. Analiza și caracterizarea materiilor prime:
  - a) Cimentul;
  - b) Agregatele;
  - c) Cenușa de termocentrală;
  - d) Aditiv impermeabilizant prin cristalizare în masa matricei cementoase de tip MasterLife WP 1000;
  - e) Fibre sintetice din alcool polivinilic (PVA) cu lungimea de 8 mm;
  - f) Șlamul;
  - g) Superplastifiant tip Master Glenium 51, BASF;
- 4.3. Analiza și caracterizarea liantului cementos cu conținut de cenușă zburătoare (consistența standard și determinarea timpului de priză);
- 4.4. Sinteza rezultatelor experimentale pe materiile prime componente ale microbetonului cu identificarea posibilitatilor de dezvoltare a microbetonului cu capacitate de auto-vindecare ;
5. Proiectarea compozițiilor preliminare ale microbetonului;
6. Realizarea standurilor experimentale.
7. Caracterizarea performanțelor preliminare ale microbetonului:
  - 7.1. Determinarea densității;
  - 7.2. Determinarea absorbției de apă;
  - 7.3. Determinarea caracteristicilor mecanice:
    - 7.3.1. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere;
    - 7.3.2. Determinarea rezistenței la compresiune;
  - 7.4. Determinarea capacității de auto-vindecare.
  - 7.5. Determinarea caracteristicilor mineralogice a compozițiilor proiectate cu ajutorul difracțiilor de raze X.

### **4.1. Proiectarea compozițiilor preliminare ale microbetonului cu capacitate de auto-vindecare.**

Primul obiectiv stabilit pentru realizarea betonului cu proprietatea de auto-vindecare a fost acela de a stabili componența materiilor prime care intră în compoziția acestuia.

Materiile prime utilizate la prepararea microbetonului sunt de proveniență autohtonă.

Proiectarea compoziție preliminară a betonului a fost realizată după prescripțiile de proiectare ale materialelor compozite cementoase (ECC), realizată de către Victor Li. [210]

În vederea realizării compozițiilor betonului cu proprietatea de auto-vindecare, au fost utilizate următoarele materiale componente :

- 1) ciment de tip Portland CEM I 42,5 R, provenit de la fabrica de ciment Aleșd, județul Bihor;
- 2) cenușă zburătoare de la termocentrala Mintia, județul Hunedoara;
- 3) sort de râu (0-4) mm, sursa balastiera din localitatea Grigorești, județul Cluj-Napoca;
- 4) nisip poligranular standardizat conform EN 196-1;
- 5) sort de râu (4-8) mm, sursa INCD URBAN INCERC sucursala Cluj-Napoca;
- 6) șlam de calcar, provenit de la o fabrică de debitare a marmurii, din localitatea Cluj-Napoca;
- 7) aditiv superplastifiant tip Master Glenium 51, BASF;
- 8) aditiv de impermeabilizare prin cristalizare de tip MasterLife WP 1000, BASF;
- 9) fibre sintetice din alcool polivinilic (PVA), L= 8 mm;
- 10) apă.

În continuare au fost analizate și caracterizate materiile prime componente ale microbetonului, respectiv determinările efectuate pe acestea pentru a găsi atât tipul cât și cantitatea optimă obținerii proprietăților fizico-mecanice și proprietatea de auto-vindecare a microbetonului.

## **4.2. Analiza și caracterizarea materiilor prime componente ale micro-betonului**

Pentru analizarea și caracterizarea materiilor prime componente ale micro-betonului s-au efectuat următoarele determinări (prezentate schematic în figura Fig. 3.1.) :

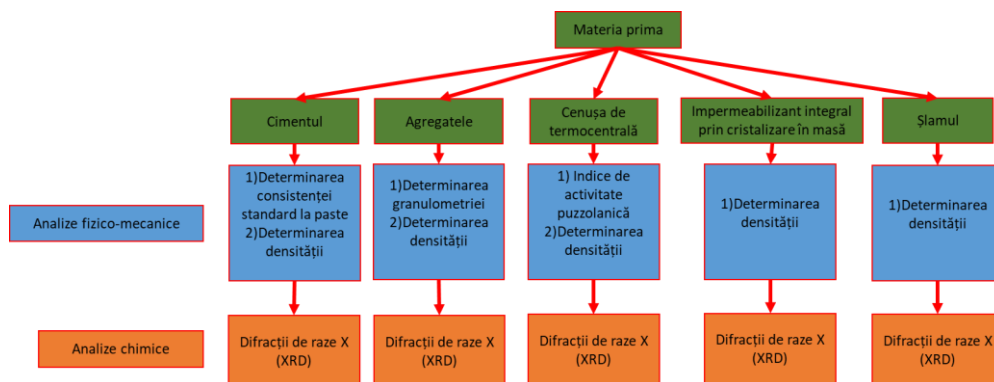


Fig. 3.1. Prezentare schematică a analizelor efectuate pe materiile prime componente ale microbetonului.

- Determinarea timpului de priză al cimentului

Determinarea consistenței standard a pastei de ciment și a timpului de priză în conformitate cu standardul SR EN 196-3 [211] și anume: pentru o cantitate de 500g de ciment s-a înregistrat cantitatea de apă necesară pentru amestecarea și obținerea pastei de consistență standard. Timpul de priză s-a determinat cu aparatul de tip Vicat. Determinarea constă în observarea penetrării unui ac într-o pastă de ciment de consistență standard pînă când pe scala gradată a aparatului se atinge o valoare specificată [211].

- Determinarea granulometriei agregatelor

Determinarea granulometriei agregatelor se realizează prin separarea agregatelor în mai multe clase de granulozitate. S-au făcut analize granulometrice, prin cernere a sortului de dimensiune 0-4 mm și 4-8 mm, în conformitate cu SR EN 933-1 [212]. Pentru a se obține cantitatea de 200 grame de sort (0-4)mm și 600 g de sort (4-8) mm, dintr-o cantitate reprezentativă de sort, acesta se reduce prin amestecare și sfertuire, repetate consecutiv, pentru a obține proba de încercat, conform SR EN 932-2 [213].

- Determinarea masei volumice în vrac a materialelor componente ale microbetonului.

Determinarea masei volumice în vrac se face după standardul SR EN 1097-3 [214] și anume se realizează prin umplerea unui vas de volum stabilit de agregate, de masă uscată și cântărirea acestuia, respectiv masa volumică corespunzătoare acestuia se calculează



În funcție de diametrul maxim al granulei se alege capacitatea vasului și anume: granula cu diametrul maxim de 4 mm pentru care se alege un vas cu o capacitate de 1 litru.

Proba de încercat se obține prin metoda sfertuirii, acesta fiind cuprinsă între (120 – 150)% din masa necesară umplerii vasului.

- Determinarea compoziției mineralogice cu ajutorul difracțiilor de raze X (XRD) ale materialelor componente ale microbetonului.

Difracția de raze X (XRD) este o tehnică non-distructivă, respectiv analitică, utilizată la caracterizarea compoziției mineralogice a unui material sub formă de pulbere și este realizată cu difractometrul de raze X, Bruker D8 ADVANCE, prezentat în Fig. 3.2 și Fig. 3.3.

În urma realizării determinărilor pe pulberi se obțin difractograme ce conțin următoarele informații:

- Din punct de vedere calitativ al fazei cristalelor, respectiv fiecare fază cristalină are specific un spectru de difracție.
- Din punct de vedere cantitativ și anume dacă într-o proba sunt mai multe faze se poate stabili procentual fiecare fază componentă din materialul studiat.
- Structura cristalină a materialului sub formă de pulbere.

- Determinarea indicelui de activitate a cenușii zburătoare.

Indicele de activitate a cenușii zburătoare s-a determinat procentual din raportul rezistenței la compresiune realizat din mortar cu 75% din masă compoziției reprezentând cimentul de tip CEM I 42,5R respectiv 25% din masă compoziției reprezentând cenușă zburătoare și rezistența la compresiune a epruvetelor de referință de mortar, realizate cu 100% cimentul utilizat, testate la aceeași vârstă.

Materialul pentru determinarea indicelui de activitate ale cenușii zburătoare este preparat cu ajutorul unui malaxor cu paletă și introdus într-un tipar metalic, care se pastrează într-un mediu umed timp de 24 h până la decofrare.



a)

Fig. 3.2. Imagine de ansamblu a difractometrului de raze X, Bruker D8 ADVANCE



b)

Fig. 3.3. Mod de poziționare epruvete pentru testare în difractometru de raze X, Bruker D8 ADVANCE

- Determinarea rezistențelor mecanice ale epruvetelor de liant se face conform specificațiilor standardului SR EN 196-1:„ Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 1.” [215]

Pentru determinarea rezistențelor mecanice se utilizează presa de tip Ele International.

Modul de încărcare al prisme solicitate la încovoiere se realizează prin aplicarea unei sarcini concentrate la jumătatea deschiderii și este reprezentat schematic în Fig. 3.4., iar pentru determinarea rezistenței la compresiune epruvetele pentru încercare se poziționează astfel încât încărcarea să se realizeze perpendicular pe direcția de turnare a epruvetei și sunt prezentat schematic în Fig. 3.5.. Se înregistrează forța de cedare a epruvetei prismatice.

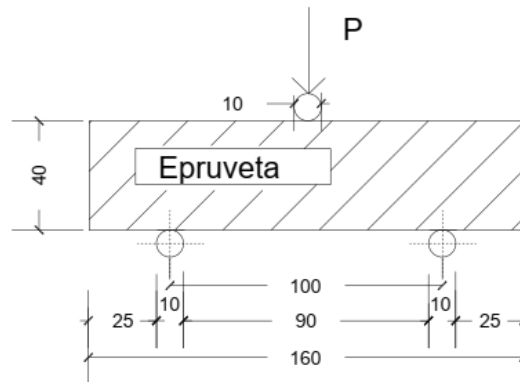


Fig. 3.4. Reprezentare schematică a modului de încărcare al prisme solicitate la întindere prin încovoiere

- Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere

Valoarea rezistenței la întindere prin încovoiere este dată de relația:

$$R_{ti} = \frac{3Pl}{2b^3} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (6)$$

Unde :

$R_{ti}$  - rezistența la încovoiere, (N/mm<sup>2</sup>);

$b$  - latura secțiunii pătrate a prisme, (mm);

$P$  - sarcina aplicată la rupere în mijlocul prisme, (N);

$l$  - distanța dintre reazeme, (mm).

- Determinarea rezistenței la compresiune.

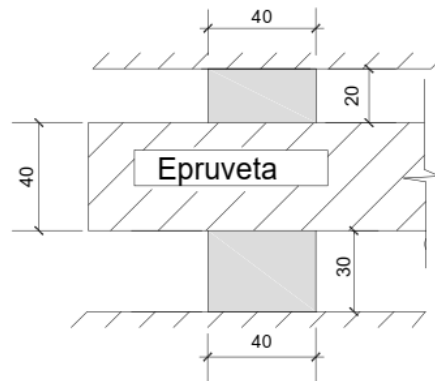


Fig. 3.5. Reprezentare schematică a modului de încărcare al prisme solicitate la compresiune

Valoarea rezistenței la compresiune este dată de relația:

$$R_c = \frac{F}{A} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (7)$$

unde:

R<sub>c</sub> - rezistența la compresiune, (N/mm<sup>2</sup>);

F – sarcina maximă în momentul ruperii, (N);

A=40x40 mm – aria suprafeței pe care se aplică forța F, (mm<sup>2</sup>).

#### **4.2.1.Cimentul**

a) Ciment Portland - CEM I 42,5 R, conform SR EN 197-1. Pentru analiza și caracterizarea cimentului s-au preluat performanțele din declarația de performanță numărul CPR – 043 – AE [216] cu următoarele caracteristici esențiale specificate în tabelul nr. 4.2.1.1., respectiv din punct de vedere al aspectului s-a analizat microscopic și prezentat în Fig. 4.2.1.1.

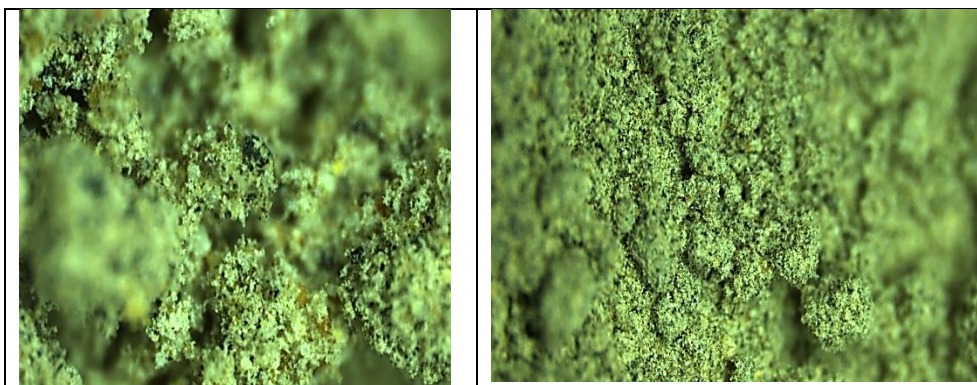


Fig.4.2.1.1. Imagine microscopică a pulberii de ciment CEM I 42,5 R.

Tab. 4.2.1.1. Caracteristicile esențiale ale cimentului de tip Ciment Portland – CEM I 42,5 R [216]

<b>Caracteristicile esențiale</b>	<b>U.M.</b>	<b>Performanța declarată</b>
Timp inițial de priză	min	Minim 60
Stabilitate (expansiune)	mm	Maxim 3
Rezistența la compresiune: inițială	MPa	Minim 24
Rezistența la compresiune: standard	MPa	Minim 46
Conținut de sulfati (sub forma de SO <sub>3</sub> )	%	Maxim 4
Conținut de cloruri	%	Maxim 0.1

- Pentru determinarea consistenței standard a cimentului s-a folosit 140 ml de apă și s-a determinat timpul de priză, reprezentat în Fig.4.2.1.2..
- Determinarea compoziției mineralogice cu ajutorul difracției de raze X pe pulberea de ciment.

Spectrul de difracție pe proba de ciment CEM 42,5 R a pus în evidență prezenta următoarelor minerale: hatrurit, brownmillerit și calcit și este reprezentat în Fig. 4.2.1.3..

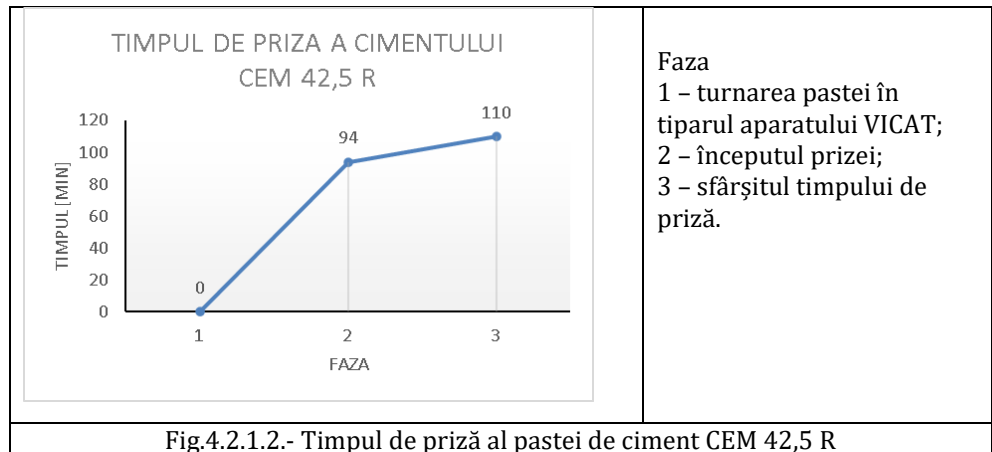


Fig.4.2.1.2.- Timpul de priză al pastei de ciment CEM 42,5 R

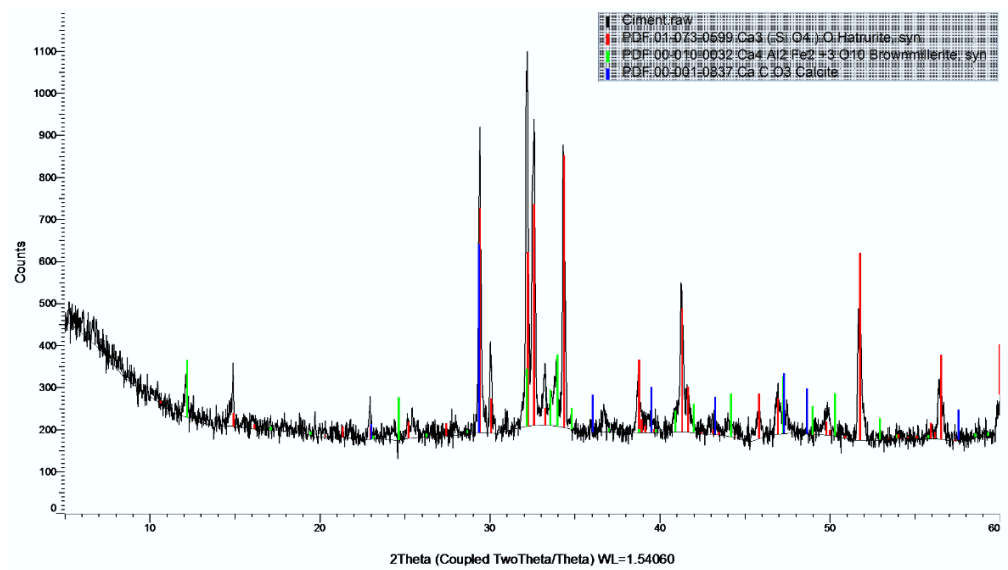


Fig.4.2.1.3.- Spectrul de difracție cu raze X al probei de ciment CEM 42,5 R

#### 4.2.2. Agregatele

S-au efectuat analize fizico-mecanice pe mai multe tipuri de agregate, pe diferite cantități și a fost determinat tipul și cantitatea optimă de agregate pentru a obține proprietățile dorite ale compozitului cimentos.

- Agregate naturale, clasa de granulozitate 0/4 mm; 4/8 mm

Sunt de proveniență locală, din balastiera Gligorești, județul Cluj, pentru care a fost realizată analiza vizuală reprezentată în Fig. 4.2.2.1. respectiv analize granulometrice, reprezentate în tabelele 4.2.2.1, 4.2.2.2.



Fig.4.2.2.1.- Imagine vizuală a sorturilor din balastiera Gligorești, județul Cluj.

Tab.4.2.2.1 Analiza cumulativă a agregatelor naturale 0/4 mm

Sort 0/4 mm									Total
Site [mm]	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
Refuz pe sită [g]	0	2,9	35,6	37,2	32,5	34,3	32,6	24,9	200
Refuz pe sită [%]	0	2	19	18	16	19	15	12	100

Curbele cumulative ale agregatelor sunt reprezentate grafic în Fig.4.2.2.2 și Fig.4.2.2.3..

Tab. 4.2.2.2. Analiza cumulativă a agregatelor naturale 4/8 mm

Sort 4/8 mm										Total
Site [mm]	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
Refuz pe sită [g]	0	112,4	444,5	42,0	0,2	0,3	0,1	0,1	0,4	600
Refuz pe sită [%]	0	19	74	7	0	0	0	0	0	100

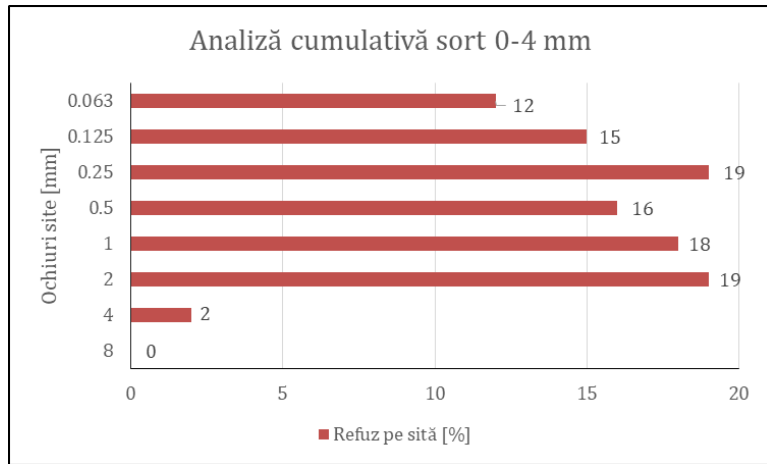


Fig. 4.2.2.2 Analiză cumulativă a agregatelor naturale cu clasa de granulozitate 0/4 mm, sursa balastiera Gligorești, județul Cluj.

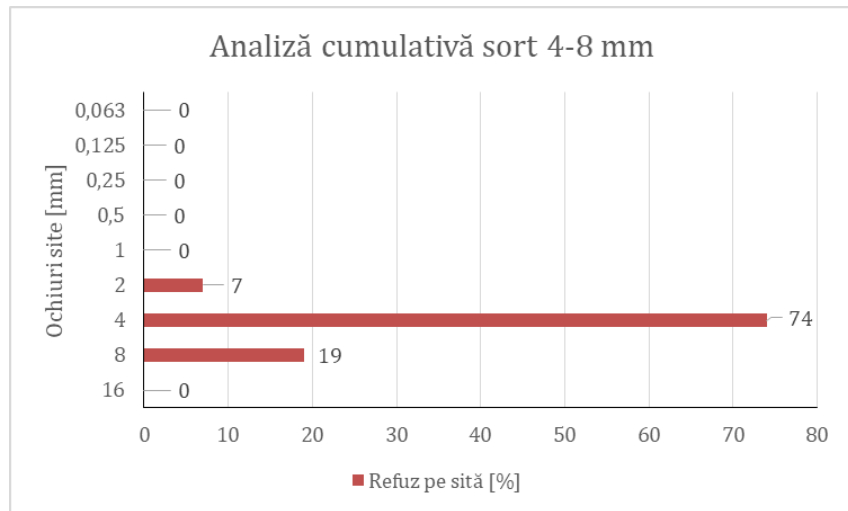


Fig.4.2.2.3. Analiză cumulativă a agregatelor naturale cu clasa de granulozitate 4/8 mm, sursa balastiera Gligorești, județul Cluj

- Determinarea compoziției mineralogice cu ajutorul difracției de raze X pe sort 0-4 din balastiera Gligorești.

Spectrul de difracție de raze X al probei de sort 0-4 de la balastiera Gligorești este reprezentat în Fig.4.2.2.4. și pune în evidență prezența următoarelor minerale: cuarț, albit, muscovit, clorit-serpentinit. Identificarea fazelor minerale care apar izolat, în cantități foarte mici, se poate face numai după separarea lor din proba de nisip. Participarea lor redusă face ca reflexele lor să fie greu de identificat în spectrul de difracție realizat pe întreaga probă de nisip.

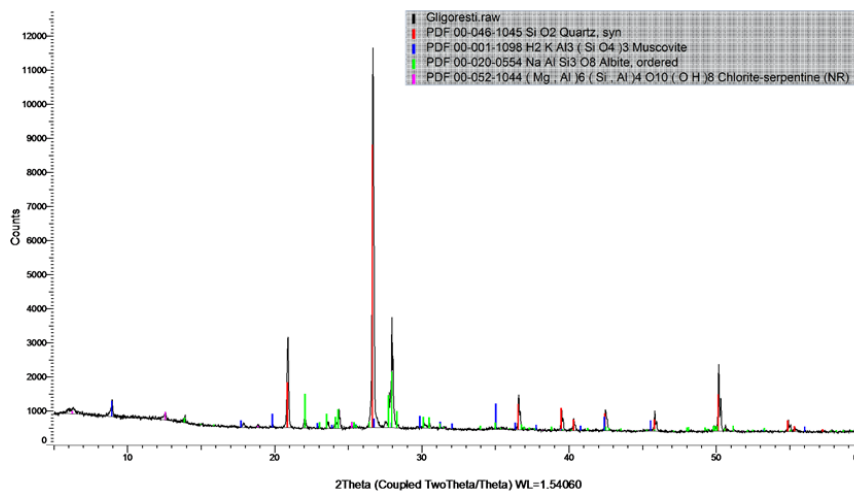


Fig. 4.2.2.4 Spectrul de difracție cu raze X al probei de sort 0-4 mm din balastiera nisip Gligorești

- Nisip poligranular standardizat

De proveniență din Germania, conform datelor inscripționate pe ambalaj, pentru care s-a realizat determinarea granulozității și s-a făcut analiza vizuală a acestuia, reprezentată în Fig.4.2.2.5. și granulometrică, prin cernere, reprezentată în tabelul nr.4.2.2.3.



Fig.4.2.2.5.- Imagine vizuală a nisipului poligranular standardizat

Tab. 4.2.2.3. Analiza cumulativă a nisipului poligranular standardizat

Nisip poigranular standardizat									Total
Site [ mm]	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
Refuz pe sită [g]	0	0	0	61,7	74,3	20,1	37,0	6,9	200
Refuz pe sită [%]	0	0	0	31	37	10	19	3	100



Curba cumulativă a nisipului standardizat este reprezentată grafic în Fig. 4.2.2.6.

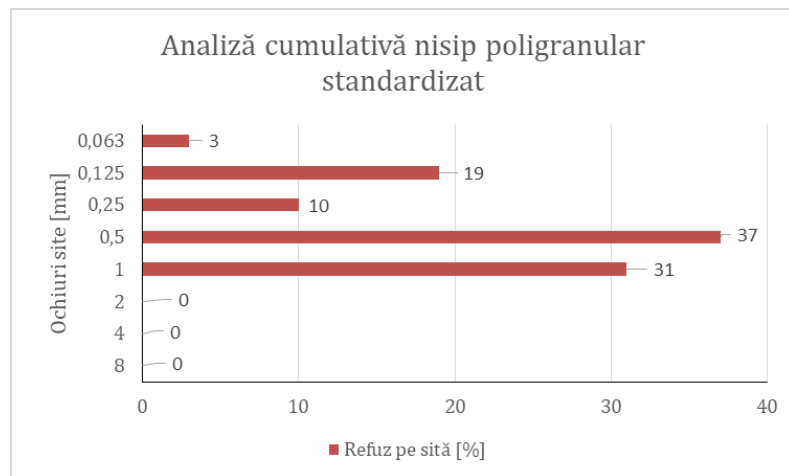


Fig. 4.2.2.6 Analiză cumulativă a nisipului poligranular standardizat

- Determinarea compoziției mineralogice cu ajutorul difracției de raze X pe nisip standardizat.

Spectrul de difracție de raze X al probei de nisip standardizat este reprezentat în Fig.4.2.2.7.

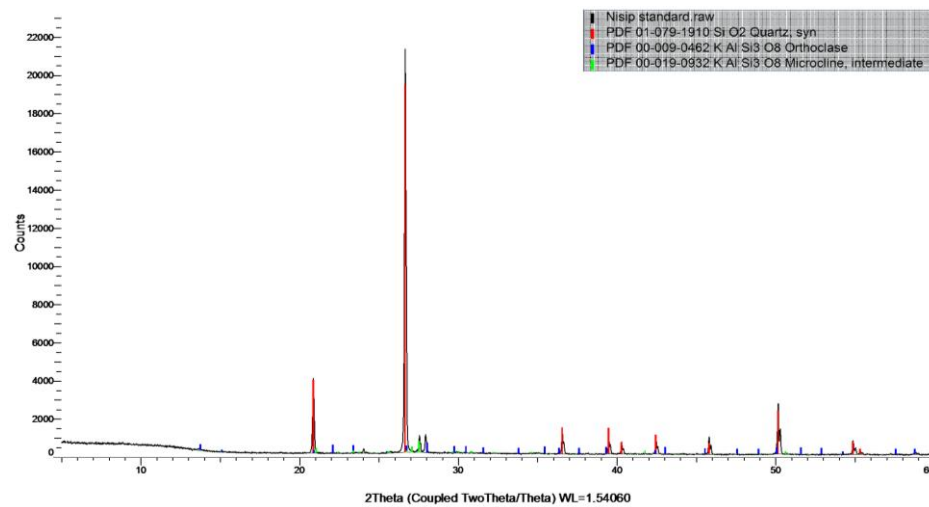


Fig. 4.2.2.7 Spectrul de difracție cu raze X al probei de nisip standardizat

Spectru de difracție realizat pe proba de nisip standardizat a pus în evidență următoarele minerale: cuarț și feldspati (ortoclaz și

microclin). Identificarea fazelor minerale care apar izolat , în cantități foarte mici, se poate face numai după separarea lor din proba de nisip. Participarea lor redusă face ca reflexele lor să fie greu de identificat în spectrul de difracție realizat pe întreaga probă de nisip.

#### **4.2.3 Cenușa zburătoare (de termocentrală).**

În literatura de specialitate cenușa zburătoare (de termocentrală) este descrisă ca oferind caracteristici esențiale ale matricei cimentului cu potențial de auto-vindecare. [217-220]. Caracteristica principală a cenușii zburătoare o reprezintă activitatea puzzolanică, acesta fiind rezultată ca și deșeu în industria reducerii energiei electrice.

Cenușa zburătoare pot fi folosită la înlocuirea parțială a cimentului în beton, respectiv utilizată în producția de materiale inovative [220-222].

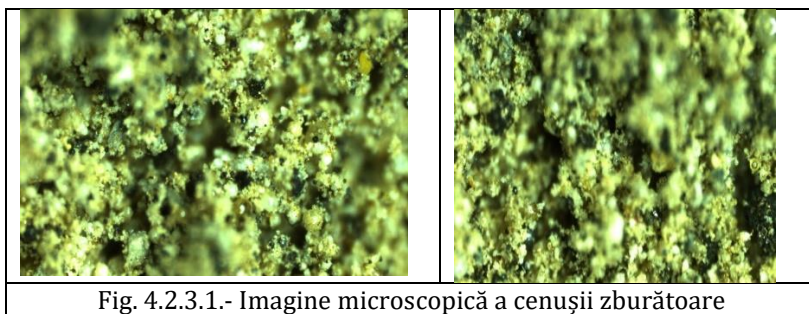
S-au introdus diferite procente cantitative de cenușă de termocentrală în compozitul cimentos și s-a ales cantitatea optimă, respectiv cantitatea la care sunt obținute proprietățile fizico-mecanice dorite ale materialului compozit.

Cenușa zburătoare folosită la proiectarea și realizarea compozițiilor studiate a fost procurată de la termocentrala din localitatea Mintia, județul Hunedoara.

Pentru determinarea calitativă și cantitativă a cenușii de termocentrală s-au făcut următoarele determinări:

- Analiza aspectului cenușii zburătoare

Analiza aspectului cenușii de termocentrală s-a realizat microscopic și este prezentată în Fig. 4.2.3.1



- Determinarea masei volumice în vrac

Determinările efectuate pe fiecare probă sunt specificate în tabelul nr. 4.2.3.1.

Tab. 4.2.3.1. Densitatea în vrac a cenușii de termocentrală

Nr. proba	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	895
2	892
3	894
<b>MEDIA</b>	<b>895</b>

- Determinarea compoziției mineralogice cu ajutorul difracției de raze X pe cenușa zburătoare

Spectrul de difracție de raze X al probei de cenușă de termocentrala de proveniență Mintia, județul Hunedoara este reprezentat în Fig. 4.2.3.2..

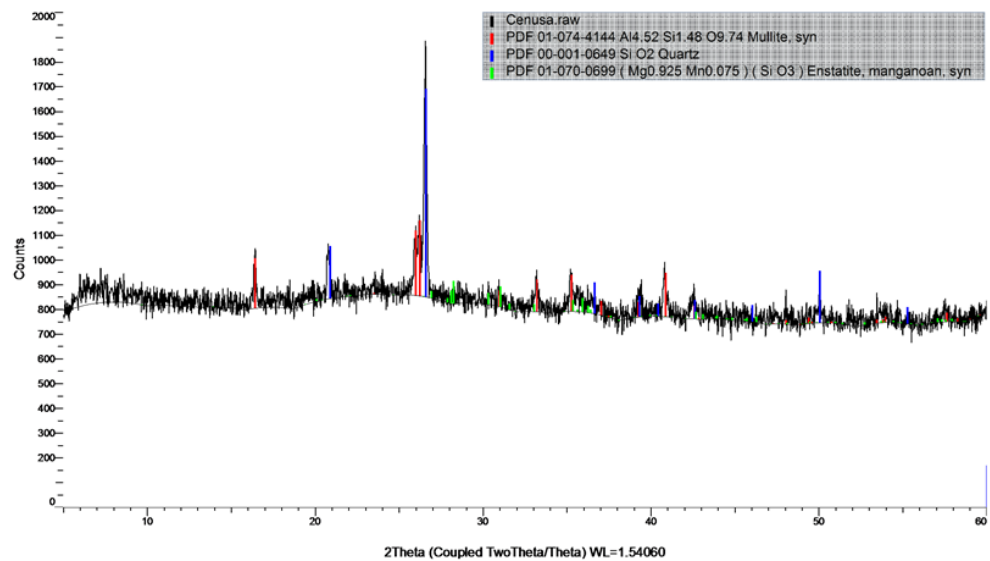


Fig. 4.2.3.2 Spectrul de difracție cu raze X al probei de cenușă zburătoare

Spectru de difracție realizat pe proba de cenușa zburătoare a pus în evidență următoarele minerale: mullit (silicat de aluminiu), cuarț și enstatit.

- Determinarea indicelui de activitate a cenușii zburătoare

Indicele de activitate s-a determinat procentual ca raportul rezistența la compresiune a epruvetelor de mortar, pregătite cu 75% ciment de încercat (martor) la care s-au adăugat 25% din masa cenușă zburătoare și rezistența la compresiune a epruvetelor standardizate de mortar, pregătite cu 100% ciment de încercat (martor), încercate la 28 de zile. Valoarea medie a rezistenței la compresiune și a indicelui de activitate sunt prezentate în Tabelul nr. 4.2.3.6.

- Rezistență la întindere prin încovoiere

Valoarea rezistențelor la întindere prin încovoiere determinate pe epruvetele ale probei martor sub formă prismatică cu dimensiunile de 40x40x160 mm la vârsta de 28 de zile sunt prezentate în tabelul 4.2.3.2. respectiv valorile rezistenței la încovoiere ale probei cu adaos de cenușă zburătoare prezentate în tabelul 4.2.3.3.

Tab. 4.2.3.2. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere a probei martor.

Nr epruvetă	P (N)	l (mm)	b (mm)	R <sub>ti</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
T M.1	3865	100	40	9,1
T M.2	3925	100	40	9,2
T M.3	3907	100	40	9,2
<b>Media</b>				<b>9,2</b>

Tab. 4.2.3.3. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere probei cu cenușă zburătoare.

Nr epruvetă	P (N)	l (mm)	b (mm)	R <sub>ti</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
T.1	3704	100	40	8,7
T.2	3621	100	40	8,5
T.3	3668	100	40	8,6
<b>Media</b>				<b>8,6</b>

- Rezistență la compresiune

Valoarea rezistențelor la compresiune ale probei martor sunt prezentate în tabelul 4.2.3.4., respectiv ale probei cu conținut de cenușă prezentate în tabelul 4.2.3.5..

Tab. 4.2.3.4. Determinarea rezistenței la compresiune a probei martor

Epruveta	TM1.1	TM1.2	TM2.1	TM2.2	TM3.1	TM3.2	Media
<b>F (N)</b>	100800	104400	98600	99980	100650	99950	
<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	1600	1600	1600	1600	1600	1600	
<b>Rc(N/mm<sup>2</sup>)</b>	63,0	65,3	61,6	62,5	62,9	62,5	<b>63,0</b>

Tab. 4.2.3.5. Determinarea rezistenței la încovoiere ale probei cu conținut de cenușă zburătoare

Epruveta	T1.1	T1.2	T2.1	T2.2	T3.1	T3.2	Media
<b>F (N)</b>	91696	91520	91712	91552	90368	90832	
<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	1600	1600	1600	1600	1600	1600	
<b>Rc(N/mm<sup>2</sup>)</b>	57,3	57,2	57,3	57,2	56,5	56,8	<b>57,1</b>

Tab. 4.2.3.6. Determinarea indicelui de activitate al cenușii zburătoare la vârsta de 28 de zile

Compoziția	Rezistența la compresiune [N/mm <sup>2</sup> ]	Indicele de activitate [%]	Vârsta testare epruvete [zile]
Proba martor - ciment	63,0	90,6	28
Proba cu cenușă	57,1		

#### **4.2.4. Aditiv de impermeabilizare prin cristalizare (MasterLife WP 1000).**

MasterLife WP 1000 este un aditiv sub forma de pulbere, produs al firmei BASF, ce acționează prin cristalizare în masa matricei cementoase. În urma reacției chimice active din compoziția cementoasă a aditivului cu apa provenită de la prepararea betonului proaspăt se formează cristale insolubile, distribuite în toata masa matricei cementoase, cu rolul de a închide fisurile cu deschiderea maximă de 0,4 mm și a reduce porozitatea capilară formând o „barieră” impermeabilă a produselor cementoase, caracteristicile acestuia fiind preluate din fișa tehnică a producătorului și specificate în tabelul nr. 4.2.4.1. [223].

Proba de adaos mineral impermeabilizant este constituită dintr-un material pulverulent gri în care sunt vizibile la lupa binocular cristale de cuarț transparent, sticlos, reprezentat în Fig. 4.2.4.1.



Tab. 4.2.4.1 Caracteristicile adaosului impermeabilizant preluate din fișa tehnică a producătorului MasterLife WP 1000 [233]

Caracteristici adaos impermeabilizant	Rezultate
Forma / Aspect	Pudra
Culoare	Gri
Densitate vrac necompactat [g/cm <sup>3</sup> ]	0,670-0,870

- Determinarea masei volumice în vrac a adaosului impermeabilizant

Determinările efectuate pe fiecare probă sunt specificate în tabelul nr. 4.2.4.2.

Tab. 4.2.4.2. Densitatea în vrac a adaosului impermeabilizant

Nr. proba	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	773
2	774
3	775
<b>MEDIA</b>	<b>774</b>

- Determinarea compoziției mineralogice cu ajutorul difracției de raze X a adaosului impermeabilizant.

Spectrul de difracție de raze X al probei de adaos impermeabilizant de cristalizare în masă este reprezentat în Fig. 4.2.4.2. Spectrul de difracție pe proba de adaos a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: hatrurite (echivalentul alitului – silicat tricalcic- din clincherul de ciment), calcit, feldspati (albit și sanidina-felspat potasic de temperatură ridicată), trona și coesit.

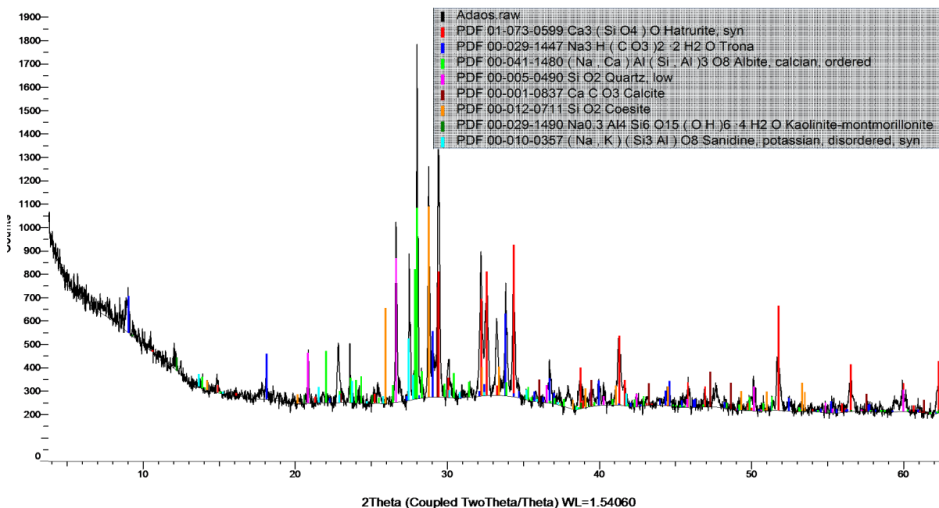


Fig. 4.2.4.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei de adaos impermeabilizant

#### 4.2.5. Fibrele sintetice din alcool polivinilic (PVA)

Din literatura de specialitate, referitor la fibrele PVA, am evidențiat ca folosite în compoziția materialului, 2% din masa cimentului, fibre bine distribuite în masa compoziției proiectate ce au

capacitatea la întindere prin tracțiune de peste 300 de ori mai mare decât a betonului simplu și permite controlul asupra formei și lățimii fisurii [224].

Fibrele PVA prezintă avantajul unei ductilități ridicate, comportare bună la fisurare sub sarcina la tracțiune și forfecare [224 , 225], au un aspect distinct comparativ cu armarea clasică a betonului, bazat pe principiul micromecanic de echilibrare a modului de răspândire al deschiderii fisurilor [226].

Fibrele sintetice PVA utilizate în această cercetare sunt produse de firma Kuraray Europe GmbH, rezentate în Fig. 4.2.5.1 și au următoarele caracteristici:

- lungime de 8 mm;
- densitatea 1300 kg/m<sup>3</sup>;
- diametrul de 39 μm;
- rezistență la tracțiune de 1,2 GPa;
- acoperire cu ulei mineral de 1,2% pentru a reduce legătura chimică a interfaței acestora cu matricea cementoasă.

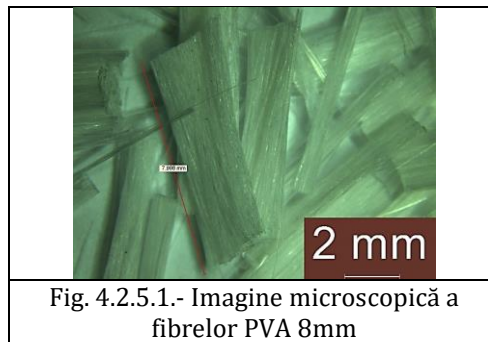


Fig. 4.2.5.1.- Imagine microscopică a fibrelor PVA 8mm

#### **4.2.6. Șlamul de calcar**

Șlamul de calcar este un deșeu rezultat de la un producător local de produse din marmura, prin debitarea și finisarea marmurii, prezentat în Fig.4.2.6.1. și prezintă un interes crescut pentru găsirea unei soluții ieftine de valorificare a acestuia și reducerea impactului pe care îl are asupra mediului unde este depozitat în halde.

O direcție majoră a cercetării dezvoltate la Incerc Cluj-Napoca urma să identifice, să evalueze și să îmbunătățească potențialul utilizării adaosurilor minerale locale, ca înlocuire parțială sau completă a materiei prime compozite, pe bază de ciment pentru industria construcțiilor și astfel obținerea unor compozite fiabile în termeni de domeniul de aplicabilitate, fizic, mecanic și a durabilității. Șlamul de calcar a

reprezentat unul din deșeurile vizate ale studiului, considerate ca adaos secundar, pe lângă cenușa zburătoare, considerată ca adaos primar și înlocuire substanțială a cimentului în cadrul matricei. Evaluările inițiale a șlamului, generează rezultate foarte promițătoare, mai ales atunci când sunt combinate cu alte adaosuri și mai ales cu cenușa zburătoare [214].

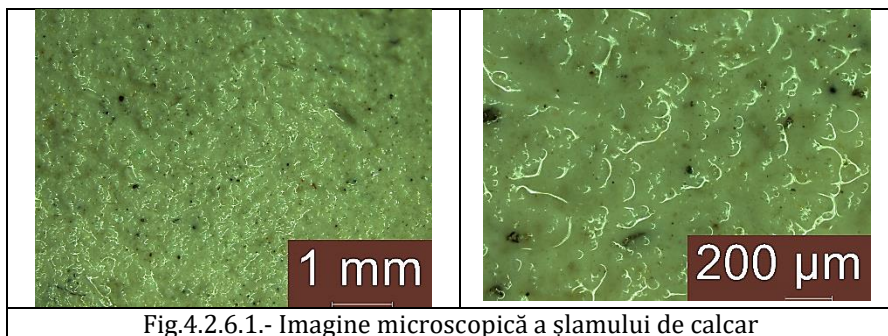


Fig.4.2.6.1.- Imagine microscopică a șlamului de calcar

- Determinarea masei volumice în vrac a șlamului de calcar

Determinările efectuate pe fiecare probă sunt specificate în tabelul nr. 4.2.6.1.

Tab. 4.2.6.1. Densitatea în vrac a șlamului de calcar

Nr. proba	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	1189
2	1190
3	1190
<b>MEDIA</b>	<b>1190</b>

- Determinarea compoziției mineralogice cu ajutorul difracției de raze X pe proba de șlam de calcar.

Spectrul de difracție de raze X al probei de șlam de calcar este reprezentat în Fig.4.2.6.2.



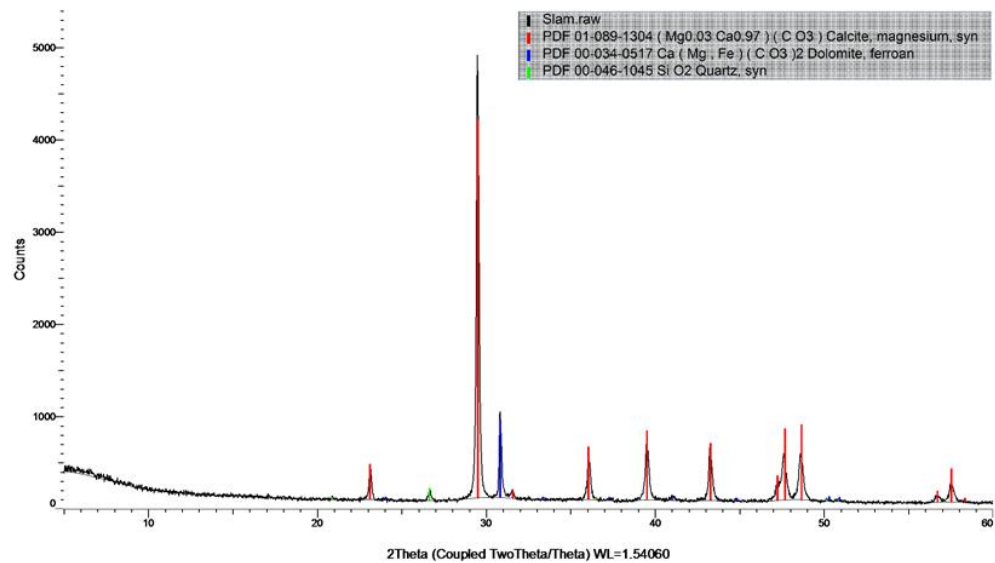


Fig. 4.2.6.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei de șlam de calcar

Spectrul de difracție pe proba de șlamul de calcar a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: calcit, dolomit și cuarț.

#### **4.2.7 Superplastifiant tip Master Glenium 51, BASF**

MasterGlenium 51 este un aditiv pe bază de polimeri de eter policarboxilic modificat și este compatibil cu toate tipurile de ciment.

#### **4.3. Determinarea consistenței standard a pastei formată din ciment și cenușă de termocentrală a timpului de priză.**

Determinarea consistenței standard a pastei formată din ciment și cea a timpului de priză în conformitate cu standardul SR EN 196-3 [211] și anume: pentru o cantitate de 500g de ciment Portland - CEM I 42,5 R + cenușă de termocentrală, cu diferite compoziții (notate de la 1 la 4) specificate în Tab. 4.3.1. s-a înregistrat cantitatea de apă necesară pentru amestecarea și obținerea pastei de consistență standard. Apoi s-a determinat timpul de priză al pastei studiate.

Tab. 4.3.1. Compoziții materii prime utilizate la determinarea consistenței standard și a timpului de priză

Nr. Compoziție	Materii prime	
	Ciment Portland - CEM I 42,5 R [g]	Cenușă de termocentrală [g]
Compoziția 1	238	262
Compoziția 2	288	212
Compoziția 3	338	162
Compoziția 4	388	112

a) Compoziția 1 (238 g ciment Portland - CEM I 42,5 R + 262 g cenușă zburătoare)

- Pentru determinarea consistenței standard a cimentului s-a folosit 150 g de apă și s-a determinat timpul de priză, reprezentat în Fig. 4.3.1..

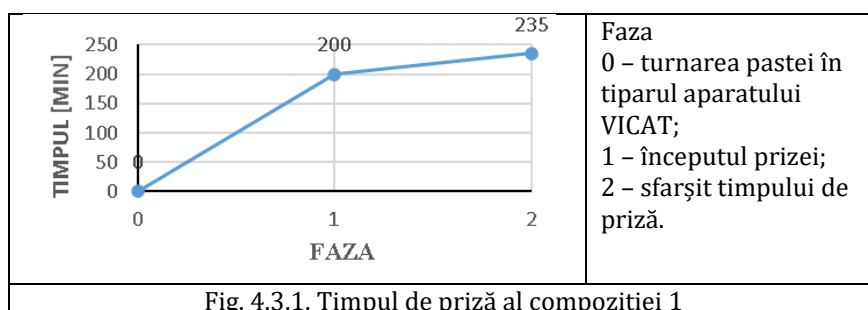


Fig. 4.3.1. Timpul de priză al compoziției 1

b) Compoziția 2 (288 g ciment Portland - CEM I 42,5 R + 212 g cenușă zburătoare)

- Pentru determinarea consistenței standard a cimentului s-a folosit 150 g de apă și s-a determinat timpul de priză, reprezentat în Fig. 4.3.2.

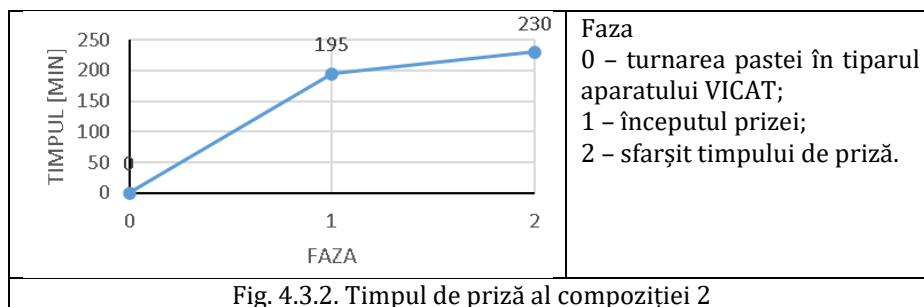


Fig. 4.3.2. Timpul de priză al compoziției 2

c) Compoziția 3 (338 g ciment Portland - CEM I 42,5 R + 162 g cenușă zburătoare)

- Pentru determinarea consistenței standard a cimentului s-a folosit 142 g de apă și s-a determinat timpul de priză, reprezentat în Fig.4.3.3.

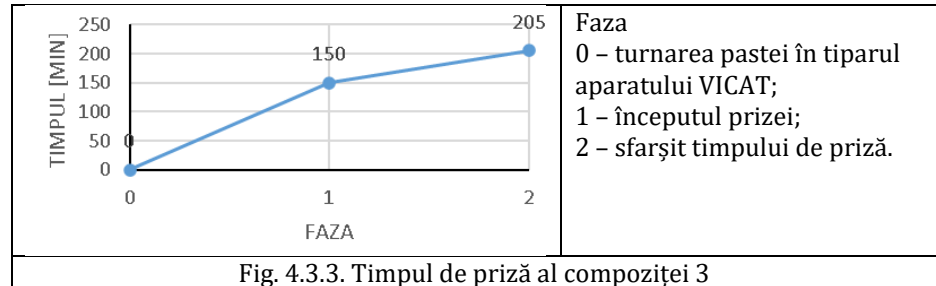


Fig. 4.3.3. Timpul de priză al compoziției 3

d) Compoziția 4 (338 g ciment Portland - CEM I 42,5 R + 112 g cenușă zburătoare)

- Pentru determinarea consistenței standard a cimentului s-a folosit 140 g de apă și s-a determinat timpul de priză, reprezentat în Fig. 4.3.4..

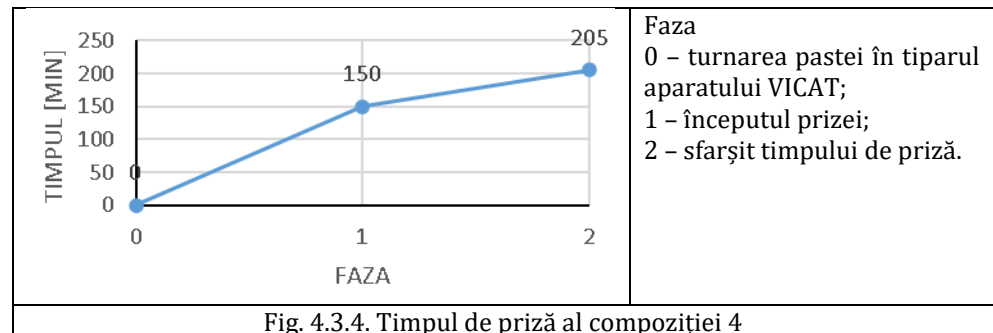


Fig. 4.3.4. Timpul de priză al compoziției 4

Rezultatele experimentale s-au indicat în Tab. 4.3.2.

Tab. 4.3.2. Timpul de priză al compozițiilor de ciment cu cenușă zburătoare

Nr. Compoziție	Apa pt. consistență Standard [g]	Timp de priză inițial [min.]	Timp de priză final [min.]
Compoziția 1	150	200	235
Compoziția 2	150	195	230
Compoziția 3	142	150	205
Compoziția 4	140	150	205

**Concluziile rezultatelor experimentale sunt :**

- creșterea necesarului de apă pentru obținerea pastei de consistență normal, de la 140 g (pasta martor cu 0% cenusă de termocentrală) la 150 g (pasta cu 52,4% cenusă de termocentrală), pe măsură ce cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenusă de termocentrală a crescut.
- creșterea timpului inițial de priză de la 94 minute la 200 minute, pe măsură ce cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenusă de termocentrală a crescut.
- creșterea timpului final de priză de la 110 minute la 235 minute, pe măsură ce cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenusă de termocentrală a crescut.

Rezultatele experimentale indică beneficiile substituirii unei cantități de ciment Portland - CEM I 42,5 R cu cenusă de termocentrală pentru creșterea lucrabilității pastei.

## 5. Realizarea compozițiilor preliminare de microbeton

În vederea proiectării compozițiilor preliminare s-a ținut seama de specificațiile din articolele de specialitate și de caracteristicile obținute în urma determinărilor pe materiilor prime componente ale compozitului cementos.

Se vor introduce diferite procente cantitative de materii în compozitul cementos și se va alege cantitatea optimă, respectiv cantitatea la care sunt obținute atât proprietățile fizico-mecanice ale materialului, cât și proprietățile de auto-vindecare.

S-au proiectat următoarele opt rețete ale microbetonului (Tab. 5.1., Tab. 5.2., Tab. 5.3., Tab. 5.4., Tab. 5.5., Tab. 5.6., Tab. 5.7. și Tab. 5.8.), unde exprimarea cantităților s-a făcut pentru o cantitate de 1 mc de material compozit:

Tab. 5.1.- Compoziție proiectată Rețeta TM<sub>sort 0-4</sub>

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	650
Agregate naturale clasa de granulozitate 0/4 mm	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26

Tab. 5.2.- Compoziție proiectată Rețeta martor TM<sub>nisip standard</sub>

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	650
Nisip standardizat 0/4 mm	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26

Tab. 5.3- Compoziție proiectată T1

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	644
Agregate naturale clasa de granulozitate 0/4 mm	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26
Aditiv Impermeabilizant integral prin cristalizare MasterLife WP 1000	[kg]	5,8

Tab. 5.4.- Compoziție proiectată T2

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	638
Agregate naturale clasa de granulozitate 0/4 mm	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26
Aditiv Impermeabilizant integral prin cristalizare MasterLife WP 1000	[kg]	11,6

Tab. 5.5.- Compoziție proiectată T3

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	633
Agregate naturale clasa de granulozitate 0/4 mm	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26
Aditiv Impermeabilizant integral prin cristalizare MasterLife WP 1000	[kg]	17,4

Tab. 5.6.- Compoziție proiectată T4

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	644
Nisip Stand. 196-1	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26
Aditiv Impermeabilizant integral prin cristalizare MasterLife WP 1000	[kg]	5,8

Tab. 5.7.- Compoziție proiectată T5

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	638
Nisip Stand. 196-1	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26
Aditiv Impermeabilizant integral prin cristalizare MasterLife WP 1000	[kg]	11,6

Tab. 5.8.- Compoziție proiectată T6

<b>Materiale componente</b>	<b>U.M.</b>	<b>Cantitatea</b>
Ciment CEM I 42,5 R	[kg]	580
Cenușă de termocentrală Sursa Mintia	[kg]	633
Nisip Stand. 196-1	[kg]	476
Șlam	[kg]	141
Aditiv Superplastif. MasterGlenium 51 BASF	[kg]	12,75
Apă	[kg]	327
Fibre PVA L= 8 mm	[kg]	26
Aditiv Impermeabilizant integral prin cristalizare MasterLife WP 1000	[kg]	17,4

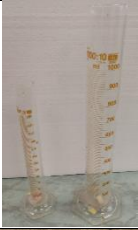





Deși nu sunt normative referitoare pentru realizarea unor betoane cu capacitatea de auto-vindecare pentru proiectarea și analizarea acestuia s-au folosit normativele în vigoare de producere ale betonului clasic.

Pentru determinările care s-au realizat pe materialele componente ale microbetonului cu proprietatea de auto-vindecare au fost folosite următoarele echipamente: site granulometrice, sticlărie de laborator, balanță, etuvă, aparat Vicat, tipare metalice, cronometru, malaxor cu paletă, mașină de încercare la întindere și compresiune, prezentate în Fig. 4.5.1. – Fig.4.5.10..

Compozițiile microbetonului au fost preparate în laboratorul INCD URBAN INCERC, Sucursala Cluj-Napoca. Compoziția rezultată a fost turnată în tipare metalice, care au fost păstrate într-o incintă cu o temperatură de  $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  și URA min. 90%, timp de 24 h până la decofrare. După decofrare epruvetele de microbeton au fost condiționate prin imersare în apă, într-un bazin, unde temperatura a fost menținută la valoarea  $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ , până la vârsta de 28 de zile.

Fig. 5.1. Site granulometrice, cu diametrul ochiurilor de : 0,063 mm; 0,125 mm; 0,250 mm; 0,500 mm; 1 mm; 2mm; 4mm; 8 mm; 16 mm.





<p>Fig. 5.2. Sticlărie de laborator  - cilindru gradat de 250 ml;  - cilindru gradat de 1000 ml.</p>	
<p>Fig. 5.3. Balanță KERN:  - masa maximă cântărită 24000g;  - d= 0,1 g.</p>	
<p>Fig. 5.4. Etuvă termoreglabilă tip ULM 500</p>	
<p>Fig. 5.5. Aparat Vicat</p>	
<p>Fig. 5.6. Tipar metalic pentru realizat trei epruvete cu dimensiunile de 40x40x160 mm.</p>	
<p>Fig. 5.7. Cronometru digital Producator NAHITA  Tip Timer Clock (KKF002)</p>	



<p>Fig. 5.8. Bazin cu apă termostată</p>	
<p>Fig. 5.9. Malaxor cu paletă Fabricant ELE INTERNAȚIONAL</p>	
<p>Fig. 5.10. Mașină de încercare a rezistenței compresiune și la întindere prin încovoiere, (Fabricant ELE INTERNAȚIONAL, Tip Digital).</p>	

Aspectul microbetonului sub formă de epruvete prismatice este prezentat în Fig. 5.11.

	
<p>Fig. 5.11. Aspectul microbetonului sub formă de epruvete prismatice 40x40x160 mm</p>	

## **6. Realizare stand experimental (Echipamentele utilizate în evaluarea capacității de auto - vindecare al fisurilor induse epruvetelor de microbeton)**

Activitatea de cercetare s-a desfășurat în cadrul laboratorului INCD-URBAN INCERC, Sucursala Cluj-Napoca.

<p>1) <u>Inducerea stării de fisurare</u> a prismelor a fost realizată cu mașina de încercare utilizată la determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere (Fig. 6.1.), (Fabricant ELE INTERNAȚIONAL, Tip Digital).</p>	
<p>2) <u>Evaluarea zonelor de fisurare și măsurarea fisurilor</u> s-a făcut cu Microscop Leica tip DMC 2500+ PC (Fig. 6.2.) pentru analiza zonelor fisurate ale epruvetelor, respective la măsurarea dimensiunilor fisurilor.</p>	
<p>3) <u>Standul experimental de condiționare și de realizare al ciclurilor de ud-uscat</u> (16 ore ud - 8 ore uscat), Fig. 6.3.</p>	

## 7. Caracterizarea performanțelor compozițiilor preliminare propuse pentru realizarea microbetonului

### 7.1. Determinarea densității

Determinarea densității microbetonului s-a realizat conform specificațiilor standardului SR EN 12390-7 - Încercare pe beton întărit, Partea 7: Densitatea betonului întărit [237], respectiv s-au efectuat pentru fiecare compoziție a microbetonului și anume pe câte șase epruvete de formă prismatică, cu dimensiunile de 40x40x160mm.

#### Exprimarea rezultatelor

Valoarea densității microbetonului se calculează cu relația:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad (8)$$

unde

$\rho$ - densitatea epruvetei, (kg/m<sup>3</sup>);

m este masa epruvetei în momentul încercării, (kg);

V este volumul calculat al epruvetei, (m<sup>3</sup>).

Determinările efectuate s-au notat în Tabelul nr. 4.7.1.

Tab. 7.1.- Densitate compoziții microbeton

Indicativ compoziție	Densitate [kg/m <sup>3</sup> ]
TM - nisip Gligorești	1921
TM - nisip standardizat	1918
T1	1923
T2	1927
T3	1931
T4	1922
T5	1923
T6	1925

### 7.2. Determinarea absorbției de apă

Această determinare se face după standardul de încercare SR EN 1338 [226] unde se specifică ca volumul minim al epruvetei sa fie de 100 cm<sup>3</sup>. Determinarea constă în imersarea a trei epruvete realizate din fiecare compoziție de microbeton studiat, în bazinul cu apă la o distanță între acestea de minim 15 mm și înălțimea apei deasupra lor să fie de minim 20 mm. Temperatura apei din bazin este de (20±2)<sup>0</sup>C , menținută și controlată de un termostat. Epruvetele sunt păstrate în bazinul cu apă până vor ajunge la masa constantă M<sub>1</sub>, într-o perioadă minimă de timp și

anume, 3 zile. Se consideră masa constantă a epruvetelor atunci când între două cântăriri succesive efectuate într-un interval de 24 h nu este o diferență a maselor epruvetelor de 0,1%. Pentru determinarea masei constante, uscate  $M_2$ , epruvetele ajunse la masă constantă prin imersare  $M_1$ , se pun în etuvă la o distanță minimă de 15 mm între ele la o temperatură de  $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$  care se menține minim 3 zile până când acestea ajung iar la masă constantă. Înainte de fiecare cântărire, epruvetele se lasă să se răcescă la temperatura din laborator [226].

Exprimarea rezultatelor :

Valoarea coeficientului de absorbție a apei, se calculează cu relația:

$$A_w = 100 \frac{M_1 - M_2}{M_2} (\%) \quad (9)$$

unde:

$A_w$  – coeficientul de absorbție, (%)

$M_1$  – masa probei saturate, (g)

$M_2$  – masa probei uscate, (g)

Rezultate obținute:

Determinările efectuate s-au notat în Tabelul nr. 7.2..

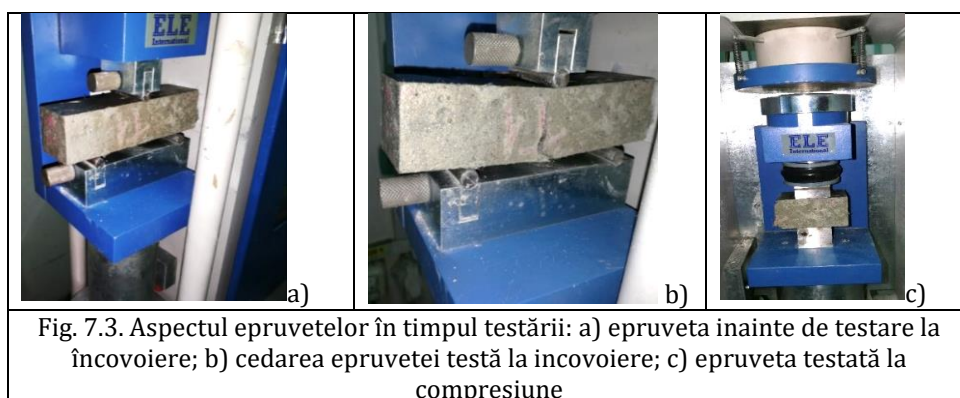
Tab. 7.2.- Coeficientul de absorbție al compozițiilor microbetonului

<b>Indicativ compoziție</b>	<b>Coeficientul de absorbție [%]</b>
TM – nisip Gligorești	6,63
TM – nisip standardizat	6,97
T1	6,84
T2	6,72
T3	6,68
T4	6,74
T5	6,65
T6	6,80

### **7.3. Determinarea caracteristicilor mecanice**

Determinarea caracteristicilor mecanice se face conform specificațiilor standardului SR EN 196-1: „Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 1.” [225]

Pentru determinarea rezistențelor la compresiune și încovoiere ale microbetonului s-au realizat epruvete cu dimensiunile de 40x40x160 mm, reprezentate în Fig. 4.7.3.



### 7.3.1. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere

Determinarea rezistenței la încovoiere s-a efectuat pentru fiecare compoziție a microbetonului și anume pe trei epruvete, de formă prismatică, cu dimensiunile de 40x40x160mm .

Determinările efectuate s-au notat în Tab. 7.3.1 și reprezentate grafic în Fig. 7.3.1.

Tab. 7.3.1- Rezistența la întindere prin încovoiere a compozițiilor microbetonului

Indicativ compoziție	$R_{ti}$ (N/mm <sup>2</sup> )
TM <sub>sort 0-4</sub>	15,6
T1	16,2
T2	16,3
T3	16,5
TM <sub>nisip standardizat</sub>	16,7
T4	15,7
T5	18,9
T6	20,2

După cum se poate observa în Tab. 7.3.1., Fig.7.3.1 și a) Fig.7.3.1. b) în cazul microbetonului preparat cu agregate de râu, sort 0-4 mm, pe măsură ce cantitatea de impermeabilizant crește de la 1% la 3% (raport masic la cantitatea de ciment), rezistența la întindere crește ușor, de la 16,2 N/mm<sup>2</sup>, la 16,5 N/mm<sup>2</sup>, fără ca să se poată spune că aceasta creștere de 1,8% este neapărat direct dependentă de creșterea cantității de impermeabilizant, respectiv, în cazul microbetonului preparat cu nisip poligranular standardizat, pe măsură ce cantitatea de impermeabilizant

crește de la 1% la 3% (raport masic la cantitatea de ciment), rezistența la întindere crește ușor, de la 15,7 N/mm<sup>2</sup>, la 20,2 N/mm<sup>2</sup>, fără ca să se poată spune că aceasta creștere de 1,8% este neapărat direct dependent de creșterea cantității de impermeabilizant.

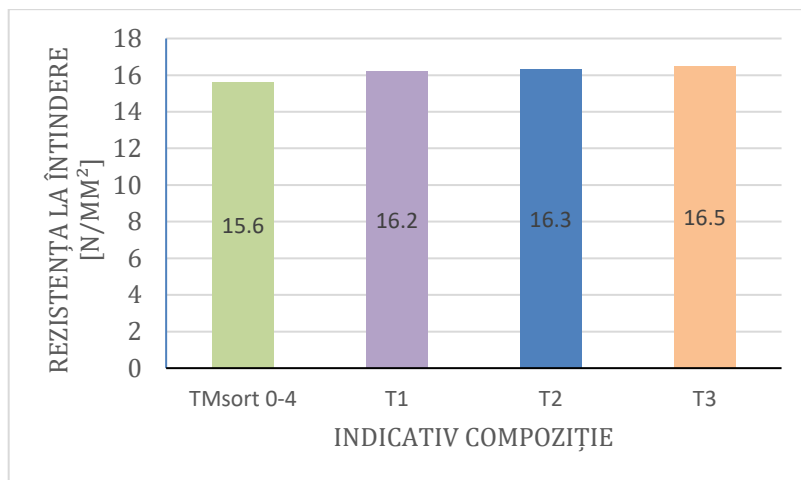


Fig. 7.3.1. a) Evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere pentru compozițiile TM<sub>sort 0-4</sub>, T1, T2 și T3

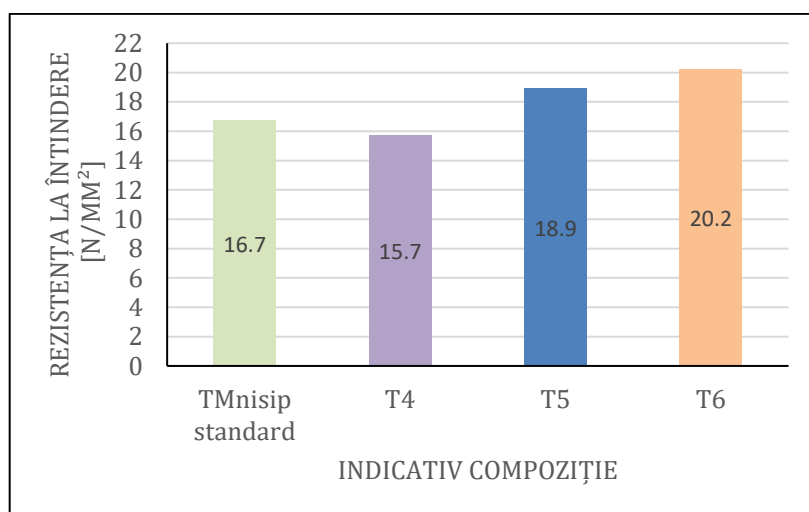


Fig. 7.3.1.b) Evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere pentru compozițiile TM<sub>nisip standad</sub>, T4, T5 și T6

### 7.3.2. Determinarea rezistenței la compresiune

Determinarea rezistenței la compresiune s-a efectuat pentru fiecare compoziție a microbetonului pe câte șase epruvete, de formă prismatică, cu suprafața de încercare 40x40mm. Determinările efectuate s-au notat în Tab. 7.3.2 și reprezentat grafic în Fig. 7.3.2. a). și Fig. 4.7.3.2. b)

Tab. 7.3.2.- Rezistența la compresiune a compozițiilor microbetonului

Indicativ compoziție	R <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
TM <sub>sort 0-4</sub>	57,4
T1	58,2
T2	56,6
T3	54,3
TM <sub>nisip standardizat</sub>	56,3
T4	56,7
T5	55,1
T6	55,0

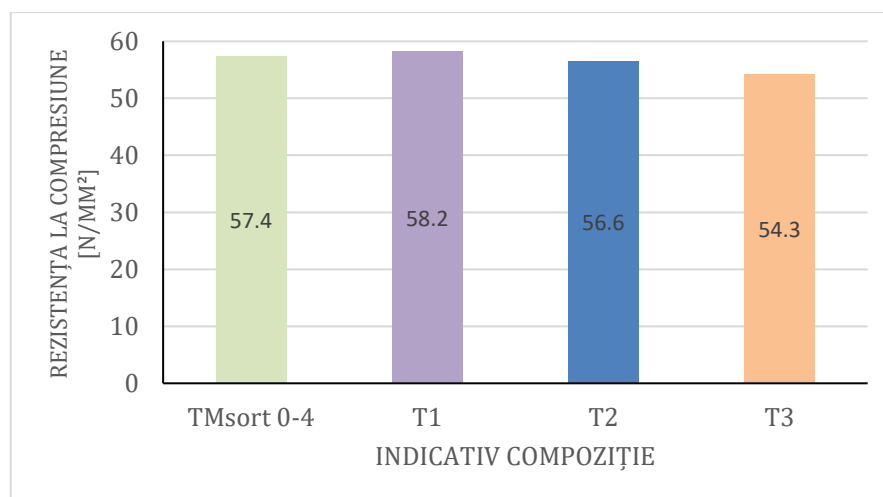


Fig. 7.3.2. a) Evoluția rezistenței la compresiune pentru probele TM<sub>sort 0-4</sub>, T1, T2 și T3

După cum se poate observa în Tab. 4.7.3.2, Fig. 7.3.2. a) și Fig. 7.3.2. b) pe măsură ce cantitatea de impermeabilizant crește de la 1% la 3% (raport masic la cantitatea de ciment), rezistența la compresiune crește ușor, de la 54,3 N/mm<sup>2</sup>, la 58,2 N/mm<sup>2</sup>, fără ca să se poată spune că aceasta

creșterea de 1,8% este neapărat direct dependent de creșterea cantității de impermeabilizant

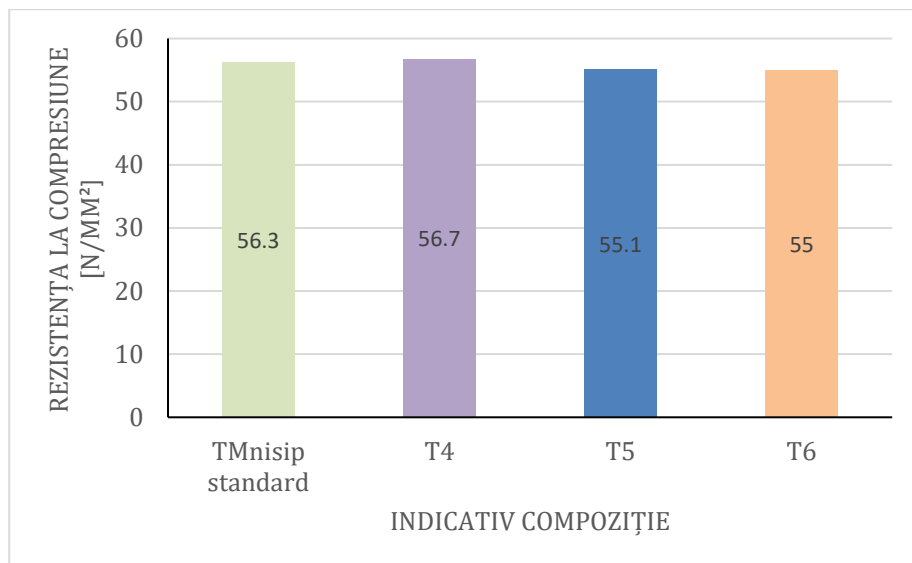


Fig. 7.3.2.b). Evoluția rezistenței la compresiune pentru probele TM<sub>nisip standard</sub>, T4, T5 și T6

#### **7.4. Evaluarea capacității de auto-vindecare a microbetonului**

Evaluarea capacității de auto-vindecare se realizează de la modul de inducere a stării de fisurare în epruvetele de microbeton studiate și anume prismele sunt fisurate la 90 % din forța de cedare la încovoiere.

Analiza respectiv măsurarea deschiderii micro-fisurilor au fost efectuată cu un microscop de tip Leica DMC2900 racordat la un PC. Măsurarea deschiderii microfisurilor s-a făcut la următoarele intervale de timp: după fisurare, după 1 zi, 4 zile, 8 zile, 14 zile și 20 de zile de condiționare în mediu umed-uscat (16 ore în apă – 8 ore uscat). Analiza microfisurilor s-a făcut pe segmente de fisură cu dimensiunile de 1,6 x 1,3 mm, cu un factor de mărire de 8 x.

Parametrii studiați ai mecanismului de auto-vindecare sunt analizați în funcție de timp și se referă la evaluările brute ale segmentului de fisură cât și la fisurile individuale:

- Închiderea fisurilor, având în vedere scăderea relativă a lățimii medii a fisurii  $D_{avm}$ , pentru deschiderea medie a fisurii, respectiv



$D_{avM}$ , pentru deschiderea fisurii maxime, pe zi „t” de condiționare, raportat la momentul inițial după fisurare:

$$GV_t^m [\%] = \frac{D_{avm(0)} - D_{avm(t)}}{D_{avm(0)}} \times 100 \quad (10)$$

$$GV_t^M [\%] = \frac{D_{avM(0)} - D_{avM(t)}}{D_{avM(0)}} \times 100 \quad (11)$$

- Viteza de închidere a fisurii, având în vedere scăderea lățimii medii a fisurii, asociată la un interval de timp „t” corespunzător de zile:

$$\text{viteza de închidere } [\mu\text{m/zi}] = \frac{D_{av(0)} - D_{av(t)}}{t(n) - t(n-1)} \quad (12)$$

Prin calcularea parametrilor de mai sus este justificată de faptul că oferă o caracterizare globală a mecanismului de închidere al microfisurilor.

Lățimea medie a fisurii a fost determinată pe segmente de fisură  $D_{av}^i$  respective lățimea media a întregii fisuri  $D_{av}$  a fost determinată de:

$$D_{av}^i = \frac{A_{cr}^i}{l_{cr}^i} \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

$$D_{av} = \frac{\sum_i A_{cr}^i}{\sum_i l_{cr}^i} \quad (\text{mm}) \quad (14)$$

unde :

$A_i^{cr}$  – aria segmentului de fisura i, (mm<sup>2</sup>);

$l_{cr}^i$  – lungimea segmentului de fisură al liniei mediane i, (mm).

#### **7.4.1. Evaluarea capacității de auto - vindecare pentru compoziția proiectată TM<sub>sort 0-4</sub>**

Pentru compoziția TM<sub>sort 0-4</sub> în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării la 0 zile, la 4 zile, la 8 zile, la 14 zile și la 20 zile, suprafața prisme a fost împărțită în 16 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 8 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 12 locuri de verificare;

- Zona 6 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 10 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 11 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 12 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 13 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 14 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 15 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 16 cu 11 locuri de verificare.

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției  $TM_{\text{sort } 0-4}$  a fost supusă la cicluri de ud-uscat (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

### Zonele de evaluare 1-16

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-16, respectiv a vitezei de închidere a microfisurilor sunt prezentate în Tab. 7.4.1..

Tab. 7.4.1. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția  $TM_{\text{sort } 0-4}$  – Zonele de evaluare 1-16

Caracteristica	Durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
<b>Zona 1</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	29	22	13	4	4	0
$GV_t^m (\%)$	0	24,14	55,17	86,21	86,21	100
$D_{av}^M (\mu m)$	33	29	28	27	27	0
$GV_t^M (\%)$	0	12,12	15,15	18,18	18,18	100
<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	79	78	51	37	22	5
$GV_t^m (\%)$	0	1,27	35,44	53,16	72,15	93,67
$D_{av}^M (\mu m)$	93	92	77	73	67	39
$GV_t^M (\%)$	0	1,08	17,20	21,51	27,96	58,06
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	30,5	24	14	3	3	0
$GV_t^m (\%)$	-	21,31	54,10	90,16	90,16	100
$D_{av}^M (\mu m)$	33	29	24	20	19	0
$GV_t^M (\%)$	-	12,12	27,27	39,39	42,42	100
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	69,5	69	31	21	16	5
$GV_t^m (\%)$	0	0,72	55,40	69,78	76,98	92,81

Continuare Tab. 7.4.1.

$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	88	88	63	48	42	37
$GV_f^M$ (%)	0	0	28,41	45,45	52,27	57,95
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	58	54	20	16	11	11
$GV_f^m$ (%)	0	6,90	65,52	72,41	81,03	81,03
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	81	69	47	45	36	33
$GV_f^M$ (%)	0	14,81	41,98	44,44	55,56	59,26
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	63	63	26	19	14	14
$GV_f^m$ (%)	0	0	58,73	69,84	77,78	77,78
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	76	76	48	47	39	39
$GV_f^M$ (%)	0	0	36,84	38,16	48,68	48,68
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	54	40	10	3	2	1
$GV_f^m$ (%)	0	25,93	81,48	94,44	96,30	98,15
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	68	60	33	25	23	23
$GV_f^M$ (%)	0	11,76	51,47	63,24	66,18	66,18
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	37	30	1	0	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	18,92	97,30	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	61	50	25	0	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	18,03	59,02	100	-	-
<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	34	28	5	0	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	17,65	85,29	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	47	42	26	0	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	10,64	44,68	100	-	-
<b>Zona 10</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	46	30	1	0	-	-
$GV_f^m$ (%)	-	34,78	97,83	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	55	39	33	0	-	-
$GV_f^M$ (%)	-	29,09	40,00	100	-	-
<b>Zona 11</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	31	23	1	1	1	0
$GV_f^m$ (%)	0	25,81	96,77	96,77	96,77	100
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	45	33	22	21	21	0
$GV_f^M$ (%)	0	26,67	51,11	53,33	53,33	100
<b>Zona 12</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	54	43	7	4	3	2
$GV_f^m$ (%)	-	20,37	87,04	92,59	94,44	96,30
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	70	66	37	27	27	23
$GV_f^M$ (%)	-	5,71	47,14	47,14	61,43	67,14

Continuare Tab. 7.4.1.

<b>Zona 13</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	51	44	2	1	0	-
$GV_f^m$ (%)	-	13,73	96,08	98,04	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	55	45	20	16	0	-
$GV_f^M$ (%)	-	18,18	63,64	70,91	100	-
<b>Zona 14</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	83	69	18	8	8	7
$GV_f^m$ (%)	-	16,87	78,31	90,36	90,36	91,57
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	109	77	41	36	34	34
$GV_f^M$ (%)	-	29,36	62,39	66,97	68,81	68,81
<b>Zona 15</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	32	20	1	0	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	37,50	96,88	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	40	40	15	0	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	0	62,50	100	-	-
<b>Zona 16</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	54	47	15	10	6	3
$GV_f^m$ (%)	-	12,96	72,22	81,48	88,89	94,44
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	86	67	41	35	34	22
$GV_f^M$ (%)	-	22,09	52,33	59,30	60,47	74,42

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.1.1., Fig. 7.4.1.2., Fig. 7.4.1.3., Fig. 7.4.1.4.

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama ciclurilor de condiționare ud-uscat, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 109  $\mu\text{m}$  la 33  $\mu\text{m}$ . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 83  $\mu\text{m}$  la 29  $\mu\text{m}$ , Fig. 7.4.1.1.
- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_f^M$ ) este reprezentat în Fig. 4.7.4.1.2. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximum de vindecare (100%), după 8 zile în cazul zonelor 8, 9, 10, și 15, după 14 zile în cazul zonei 13, după 20 zile în cazul zonelor 1 și 3, rămânând parțial deschise fisurile cu deschiderile prezentate în Tab. 7.4.1.1..

Tab. 7.4.1.1. Evoluția deschiderii fisurii rămasă parțial deschise pentru compoziția  $TM_{\text{sort } 0-4}$

Nr. zonă	Deschidere inițială fisură ( $\mu\text{m}$ )	Deschidere finală fisură ( $\mu\text{m}$ )
2	93	39
4	88	37
5	81	30
6	76	39
7	68	23
12	70	23
14	109	34
16	86	34

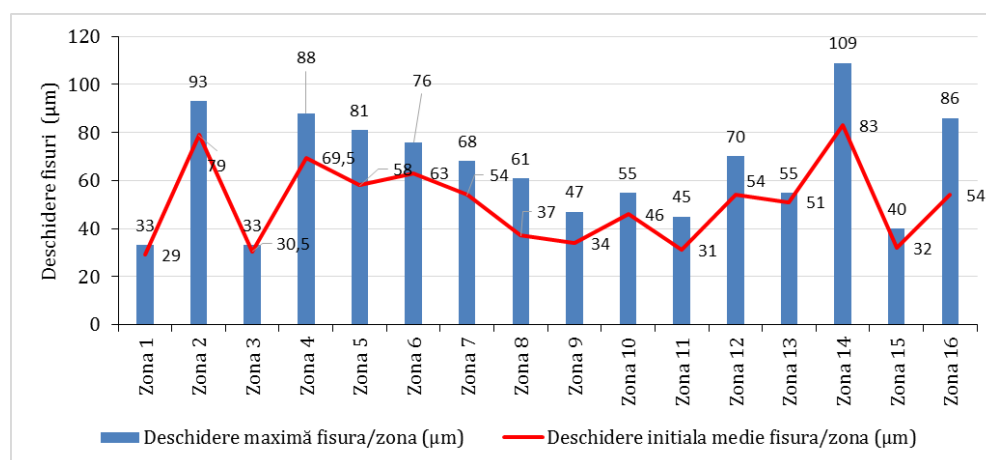


Fig. 7.4.1.1. Evoluția deschiderii maxime și a deschiderii medii a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare a compoziției  $TM_{\text{sort } 0-4}$

- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, ( $GV_t^m$ ), este reprezentat în Fig. 7.4.5.3. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 8 zile în cazul zonelor 8, 9, 10, și 15, după 14 zile în cazul zonei 13, după 20 zile în cazul zonelor 1 și 3, rămânând parțial deschise fisurile cu gradul de vindecare mediu final deschiderile prezentate în Tab. 7.4.1.2.

Tab. 7.4.1.2. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru  
compoziția  $TM_{\text{sort0-4}}$

Nr. zonă	$GV_t^m$ (%)
2	93,67
4	92,81
5	81,03
6	77,78
7	98,15
12	96,30
14	91,57
16	94,44

- Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare și indică faptul că, în primele ore de condiționare (maxim 96 de ore) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, reprezentat grafic în Fig. 7.4.1.4.. Excepție de la această constatare se observă doar în cazul indicatorilor calculați pentru zonele 2, 4, 5, 6, 7, 12, 14 și 16. Acest comportament de întârziere din punct de vedere cinetic a procesului de închidere a fisurii a fost pus pe seama deschiderea mare a acestor fisuri caracterizate de deschiderea fisurii maxime cuprinse între  $(68-109)\mu\text{m}$ .

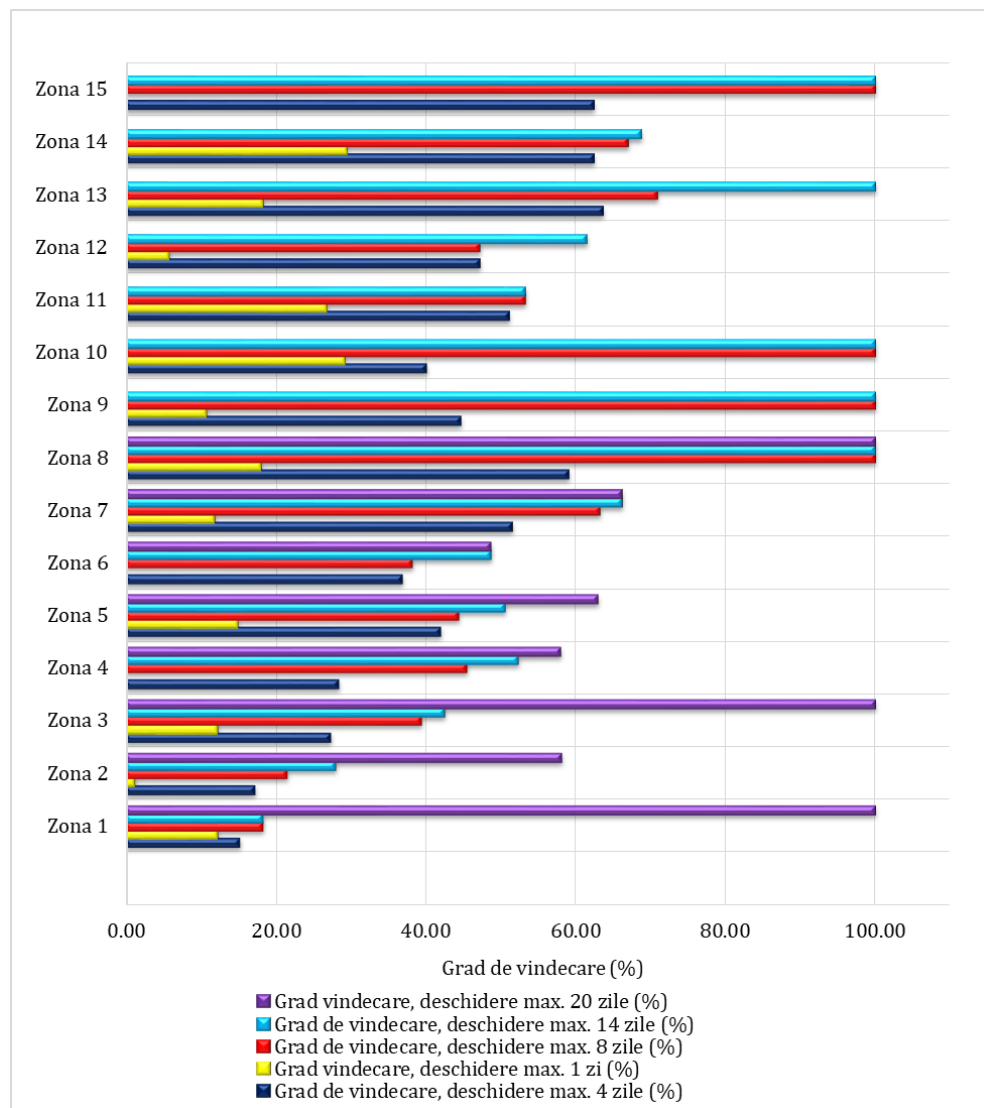


Fig. 7.4.1.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției  $TM_{\text{sort } 0-4}$

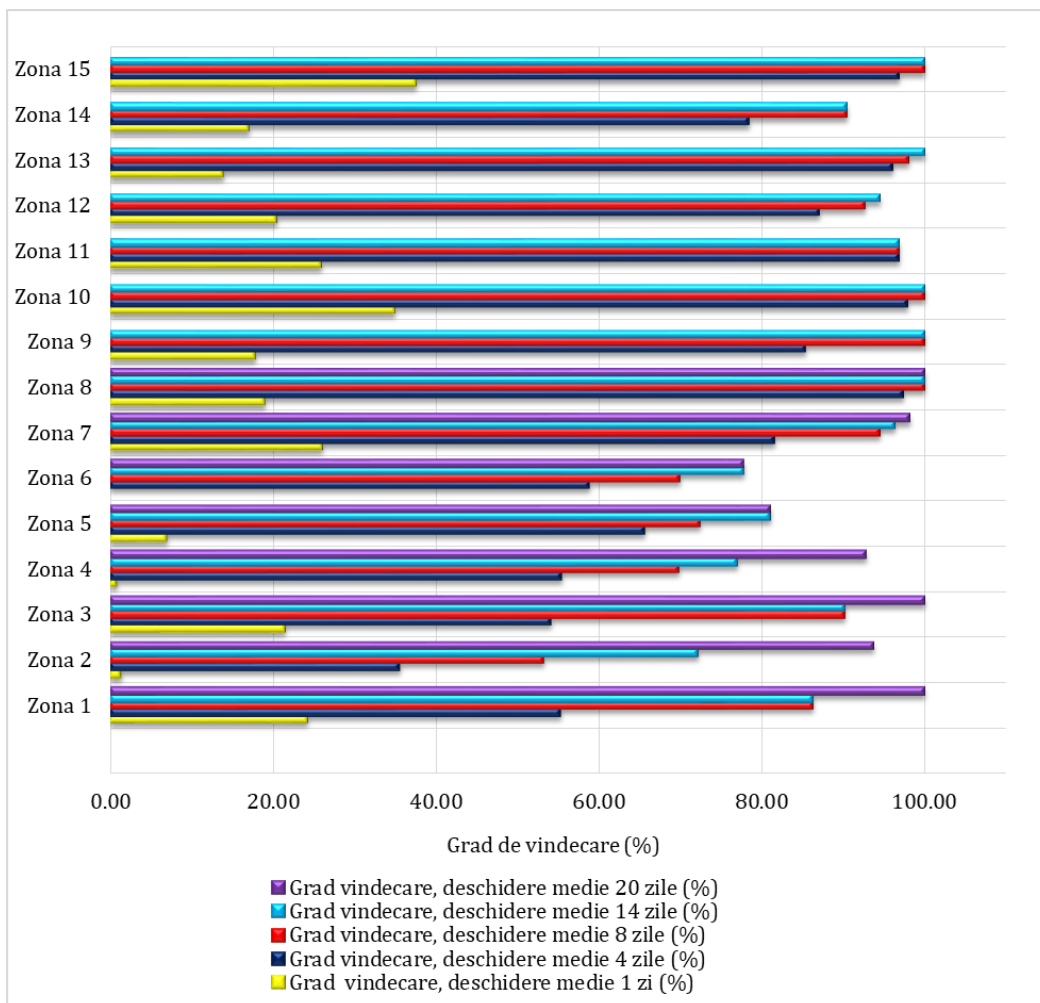


Fig. 7.4.1.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției  $TM_{\text{sort } 0-4}$



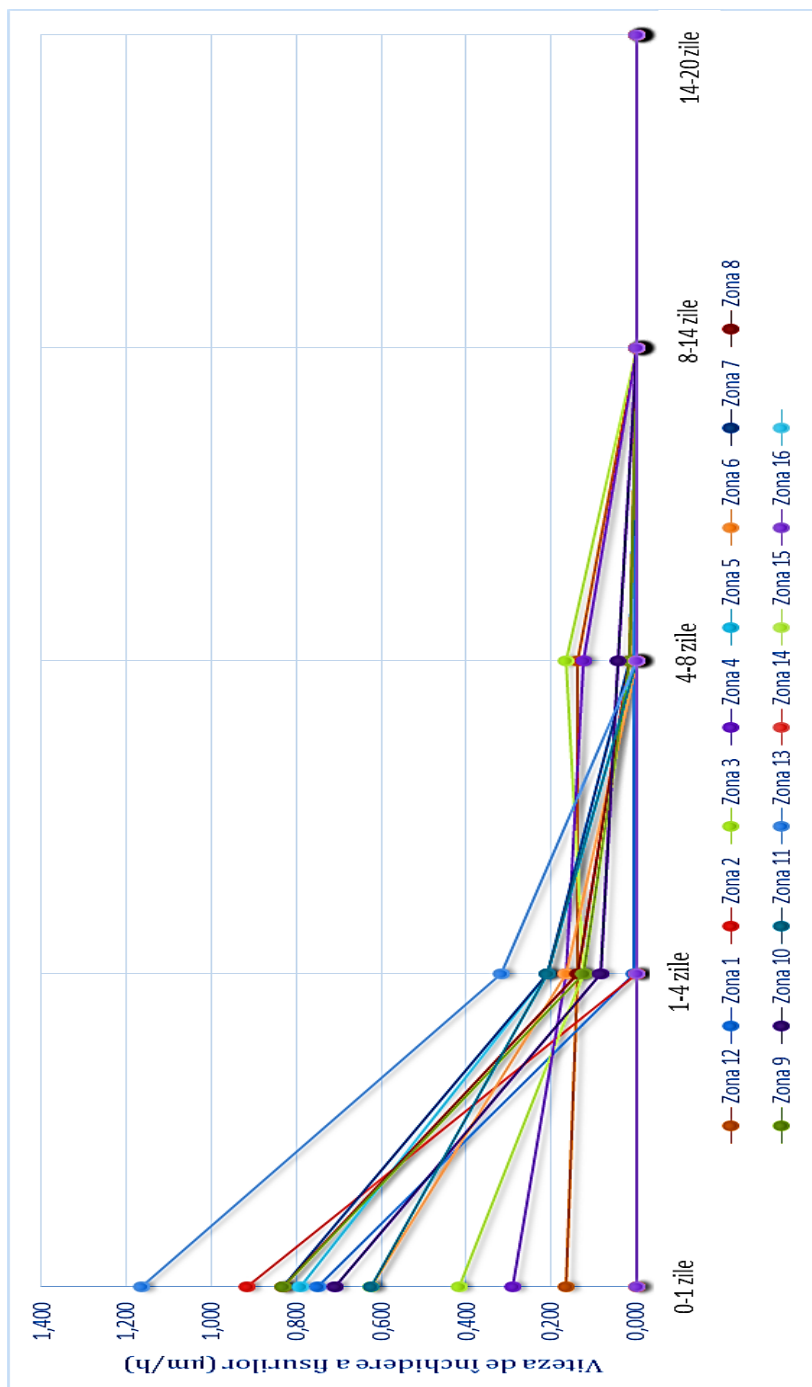


Fig. 7.4.1.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare al compoziției  $TM_{\text{sort } 0-4}$

**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția  $TM_{\text{sort } 0-4}$**

Compoziția  $TM_{\text{sort } 0-4}$  – zona 8 și zona 9

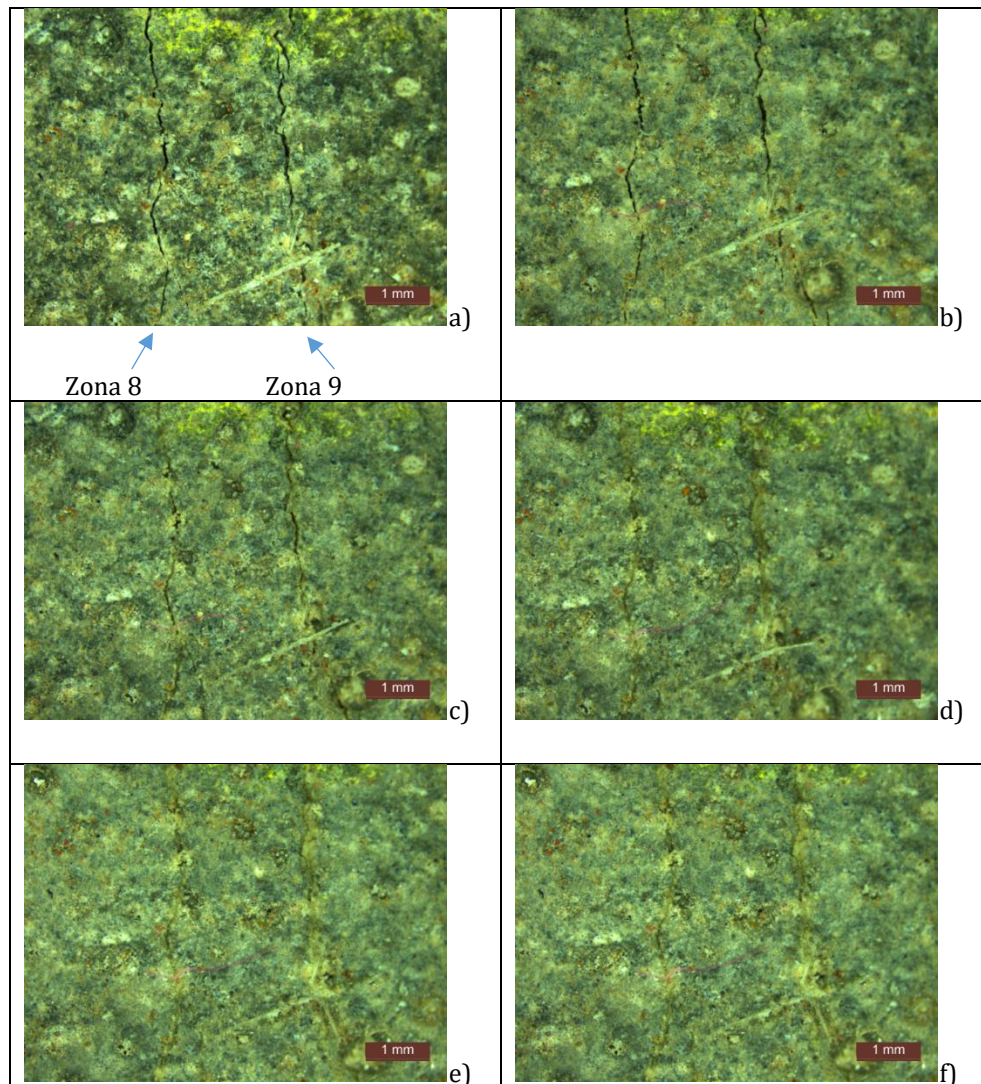


Fig. 7.4.1.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția  $TM_{\text{sort } 0-4}$  (Zona 8 și Zona 9): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

### Compoziția $TM_{\text{sort } 0-4}$ – zona 10 și zona 11

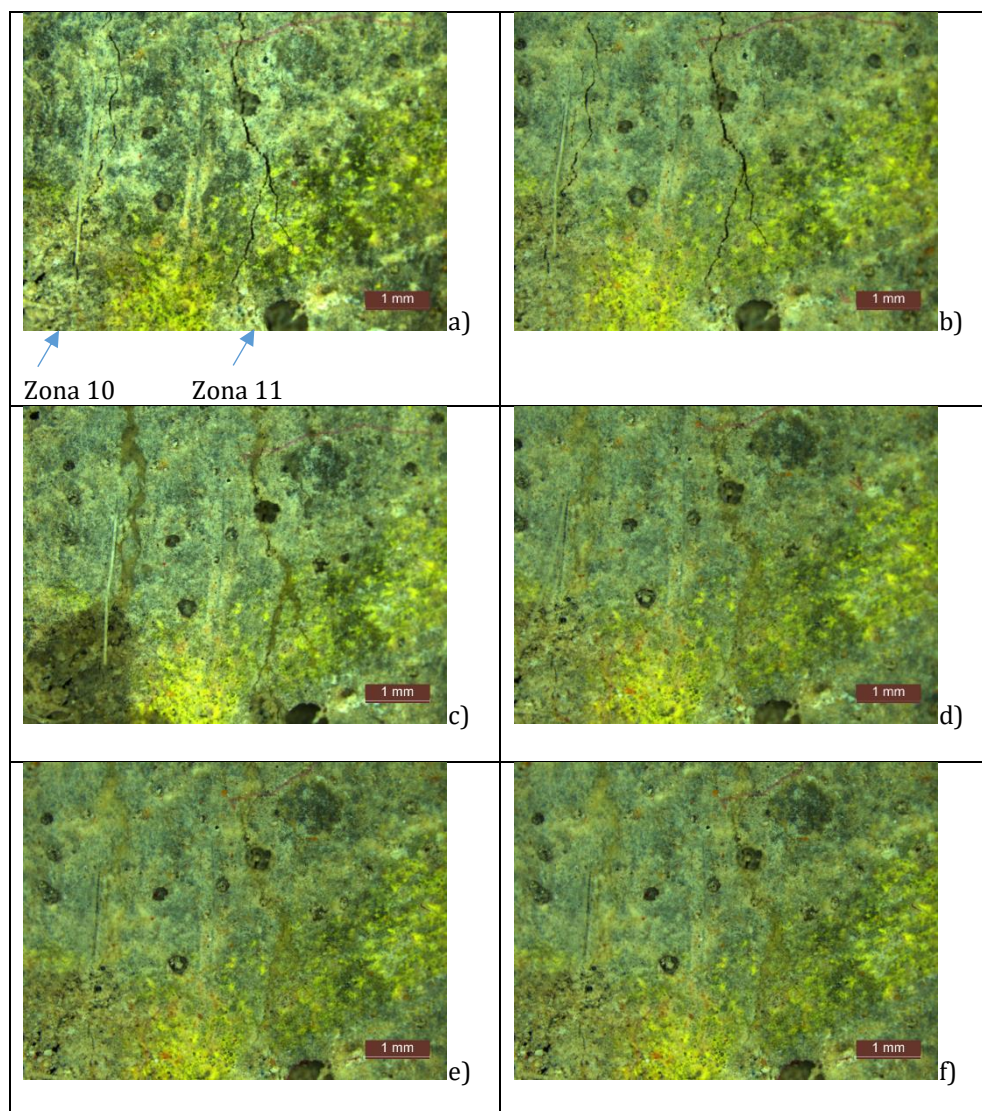


Fig. 7.4.1.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția pentru  $TM_{\text{sort } 0-4}$  (Zona 10 și Zona 11):

- a) aspect fisură indusă;
- b) aspect fisură după 1 zi condiționare;
- c). aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare;
- f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

### 7.4.2 Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T1

Pentru compoziția T1 în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării la 1 zi, la 4 zile, la 8 zile, la 14 zile și la 20 zile, suprafața prisme a fost împărțită în 16 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 8 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 6 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 11 locuri de verificare;

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției T1 a fost supusă la cicluri de ud-uscat (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

#### Zonele de evaluare 1-9

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-16, respectiv a vitezei de închidere a fisurilor sunt prezentate în Tab. 7.4.2..

Tab. 7.4.2. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T1 – Zonele de evaluare 1-9

Caracteristica	Durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
<b>Zona 1</b>						
$D_{av}^m$ (μm)	104,9	104,9	87	9,25	9	9
$GV_t^m$ (%)	0	0	17,06	91,13	91,42	91,42
$D_{av}^M$ (μm)	139	139	78	63	63	63
$GV_t^M$ (%)	0	0	43,88	54,68	54,68	54,68
<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m$ (μm)	80,8	80	39,2	16,7	4,1	0
$GV_t^m$ (%)	0	0,99	51,49	79,33	94,93	100
$D_{av}^M$ (μm)	127	127	97	85	49	0
$GV_t^M$ (%)	0	0	23,62	33,07	61,42	100
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m$ (μm)	82,7	82,2	30,2	9,1	3,7	0

Continuare Tab. 7.4.2.

$GV_t^m(\%)$	0	0,60	63,48	89,00	95,53	100
$D_{av}^M(\mu m)$	106	105	66	64	26	0
$GV_t^M(\%)$	0	0,94	37,74	39,62	75,47	100
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	31,5	30,5	0	-	-	-
$GV_t^m(\%)$	0	3,17	100	-	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	36	32	0	-	-	-
$GV_t^M(\%)$	0	11,11	100	-	-	-
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	87,7	87,2	10,5	0	-	-
$GV_t^m(\%)$	0	0,57	88,03	100	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	119	119	41	0	-	-
$GV_t^M(\%)$	0	0	65,55	100	-	-
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	31	28	0	-	-	-
$GV_t^m(\%)$	0	9,68	100	-	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	33	32	0	-	-	-
$GV_t^M(\%)$	0	3,03	100	-	-	-
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	65	63	9,7	0	-	-
$GV_t^m(\%)$	0	3,08	85,08	100	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	136	132	75	0	-	-
$GV_t^M(\%)$	0	2,94	44,85	100	-	-
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	35	34	0	-	-	-
$GV_t^m(\%)$	0	2,86	100	-	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	40	40	0	-	-	-
$GV_t^M(\%)$	0	0	100	-	-	-
<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	77,1	77	17,8	4	0	-
$GV_t^m(\%)$	0	0,13	76,91	94,81	100	-
$D_{av}^M(\mu m)$	100	100	80	60	0	-
$GV_t^M(\%)$	0	0	20,00	40,00	100	-

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.2.1., Fig. 7.4.2.2., Fig. 7.4.2.3., Fig. 7.4.2.4.

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama ciclurilor de condiționare ud-uscat, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim

de 139  $\mu\text{m}$  la 33  $\mu\text{m}$ . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 104,9  $\mu\text{m}$  la 31  $\mu\text{m}$ , Fig. 7.4.2.1.

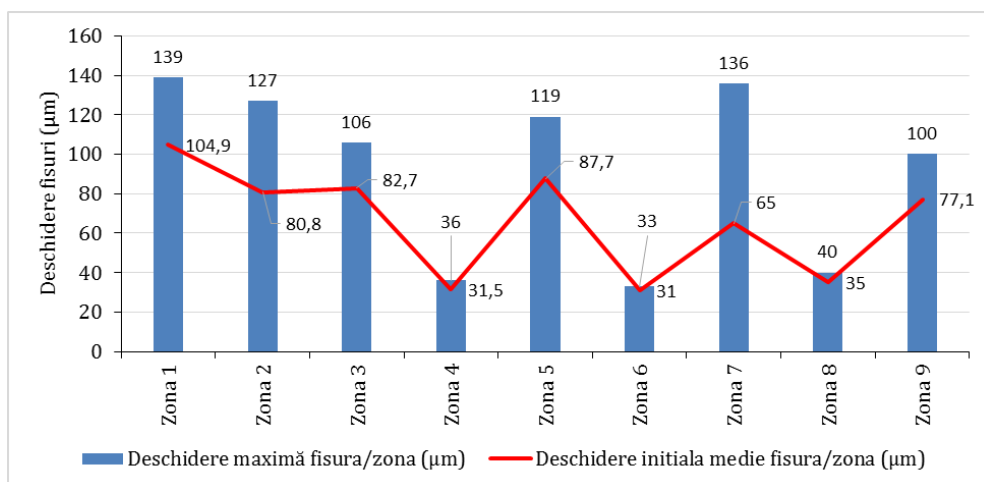


Fig. 7.4.2.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare a compoziției T1

- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_t^M$ ) este reprezentat în Fig.7.4.2.2. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%) , după 4 zile în cazul zonelor 4, 6 8, după 8zile în cazul zonelor 5 și 7, după 14 zile în cazul zonei 9, după 20 zile în cazul zonei 1, rămânând neînchisă total fisura cu deschidere maximă de 139  $\mu\text{m}$ , Tab. 7.4.2.2..
- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, ( $GV_t^m$ ), este reprezentat în Fig. 7.4.2.3. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 4 zile în cazul zonelor 4, 6 8, după 8 zile în cazul zonelor 5 și 7, după 14 zile în cazul zonei 9, după 20 zile în cazul zonelor 2 și 3, rămânând neînchisă total fisura din zona 1, cu gradul de vindecare mediu final de 91,42 % , Fig. 7.4.2.3.

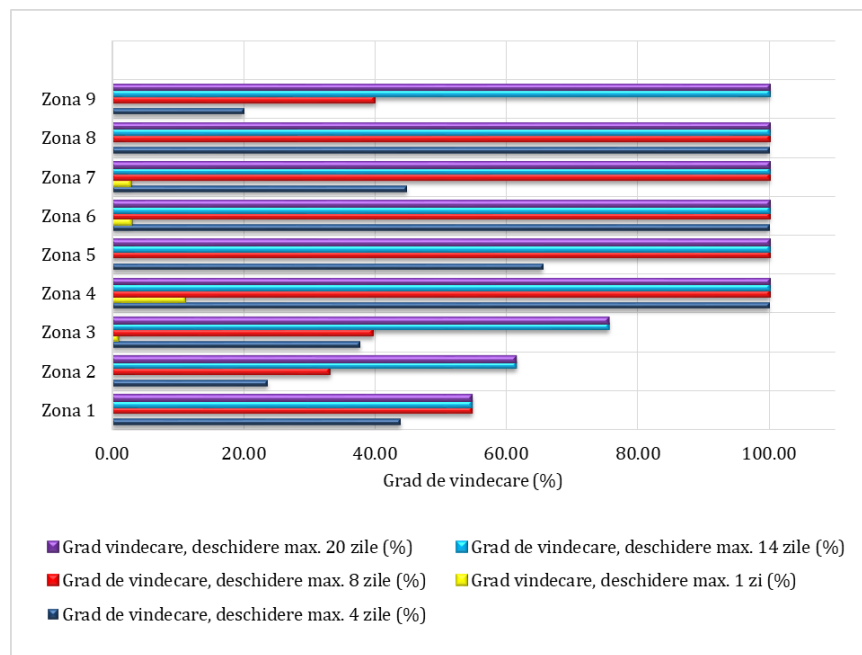


Fig. 7.4.2.2 Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției T1

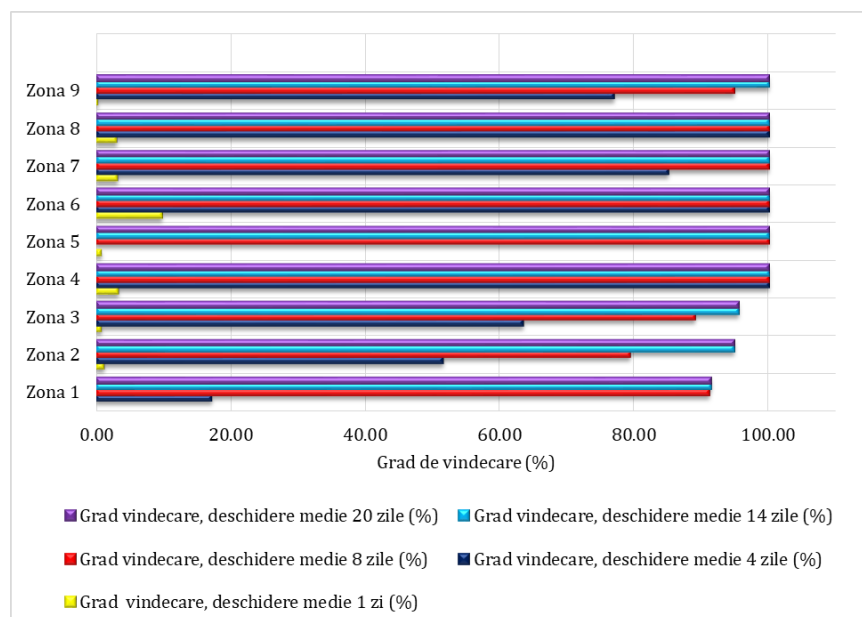


Fig. 7.4.2.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției T1



- Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare și indică faptul că în primele zile de condiționare (4 zile) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, Fig. 7.4.2.4. Excepție de la această constatare se observă doar în cazul indicatorului calculat pentru Zona 1. Acest comportament de întârziere din punct de vedere cinetic a procesului de închidere a fisurii a fost pus pe seama deschiderii mari a acestei fisuri caracterizate o deschidere inițială medie de 104,9  $\mu\text{m}$ .

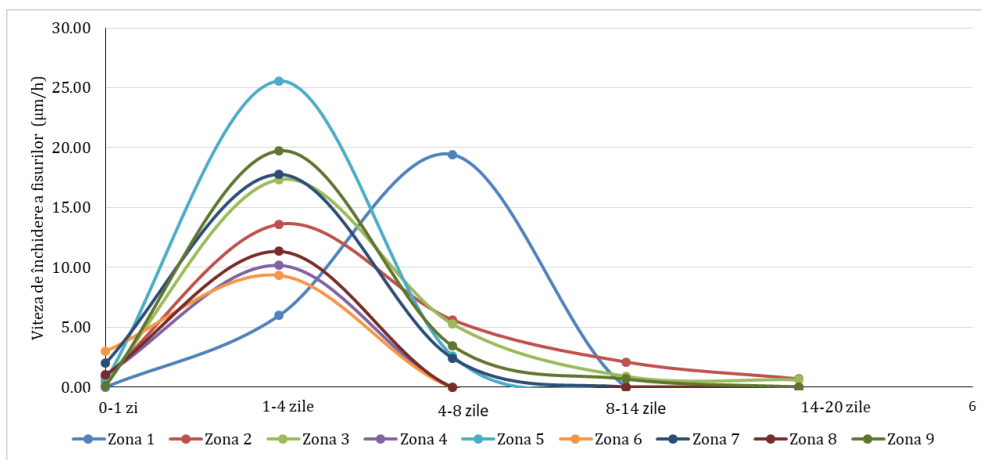


Fig. 7.4.2.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare al compoziției T1



**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția T1**

Compoziția T1 - zona 1

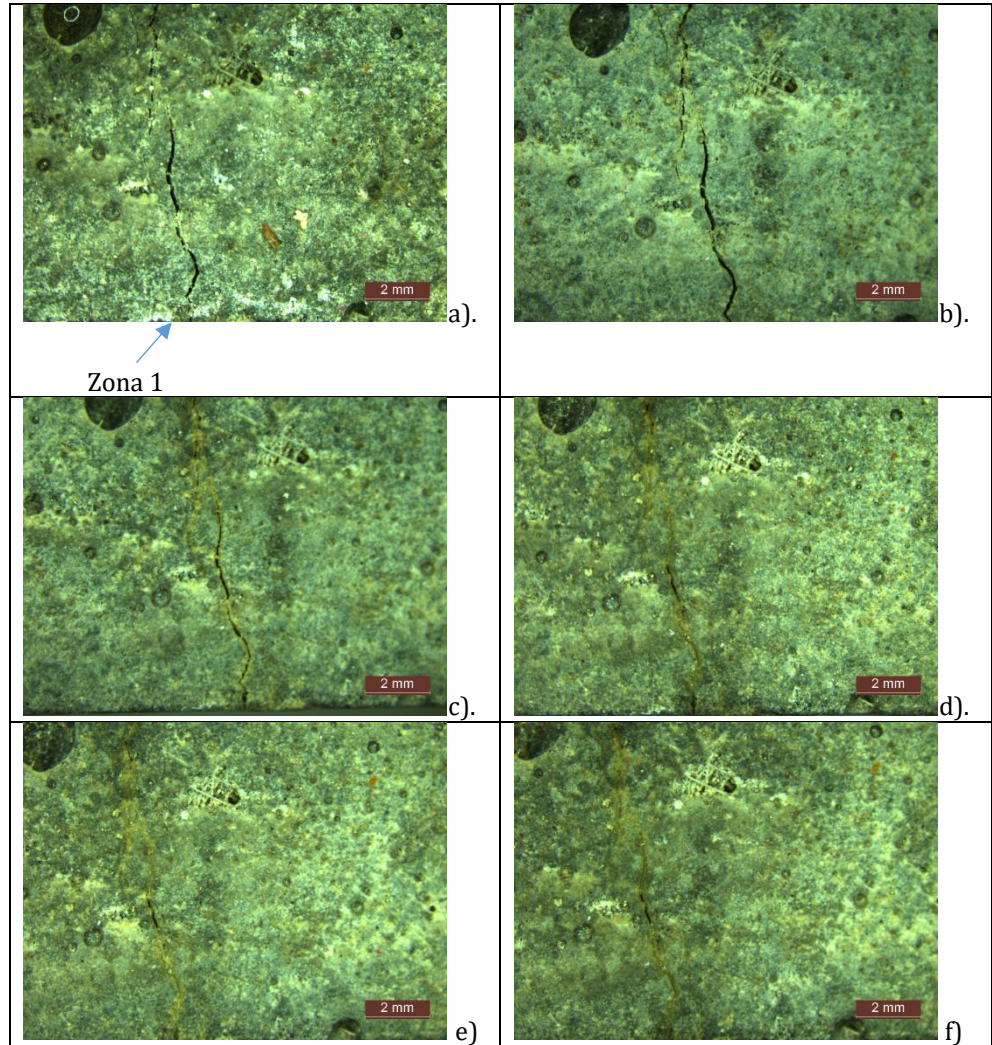


Fig. 7.4.2.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 1):

- a) aspect fisură indusă;
- b) aspect fisură după 1zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare;
- f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

## Compoziția T1 - Zona 2

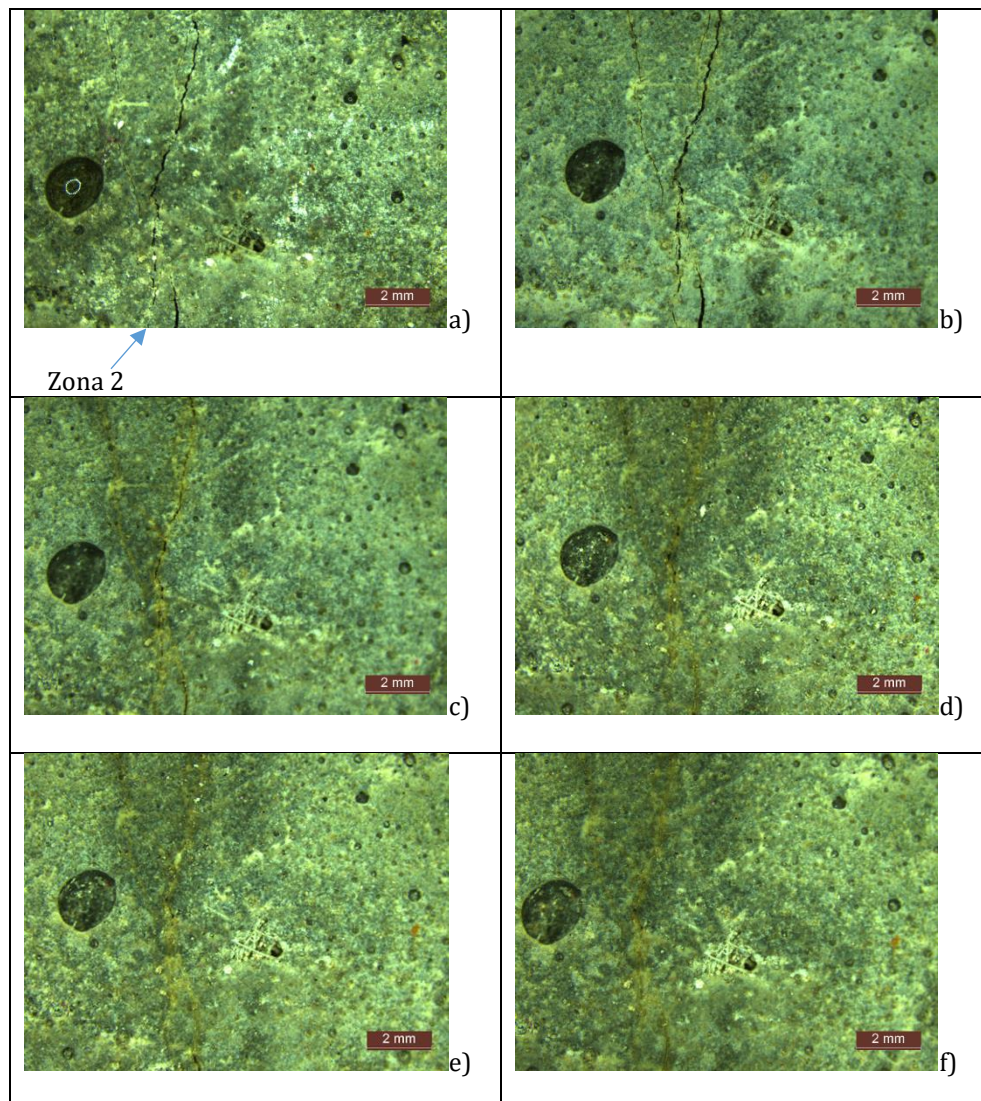


Fig. 7.4.2.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 2): a) aspect fisura indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură auto-vindecată după 20 zile condiționare.



### Compoziția T1 - Zona 4 și Zona 5

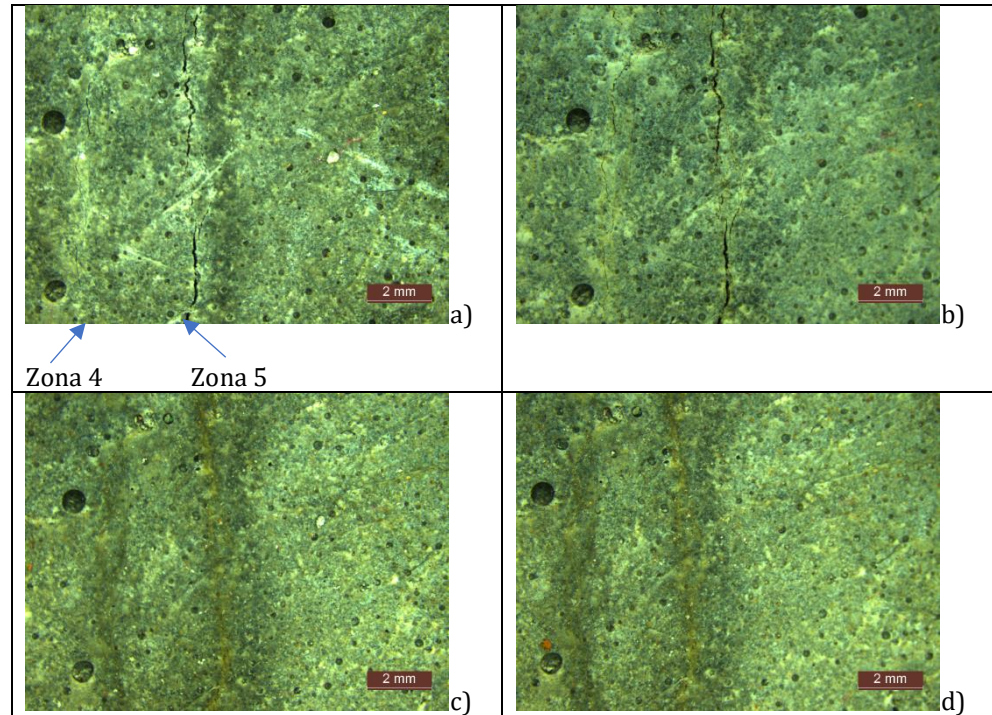


Fig. 7.4.2.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 4 și Zona 5):

- a) aspect fisură indusă;
- b) aspect fisură după 1zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;

### Compoziția T1 - Zona 6 și Zona 7

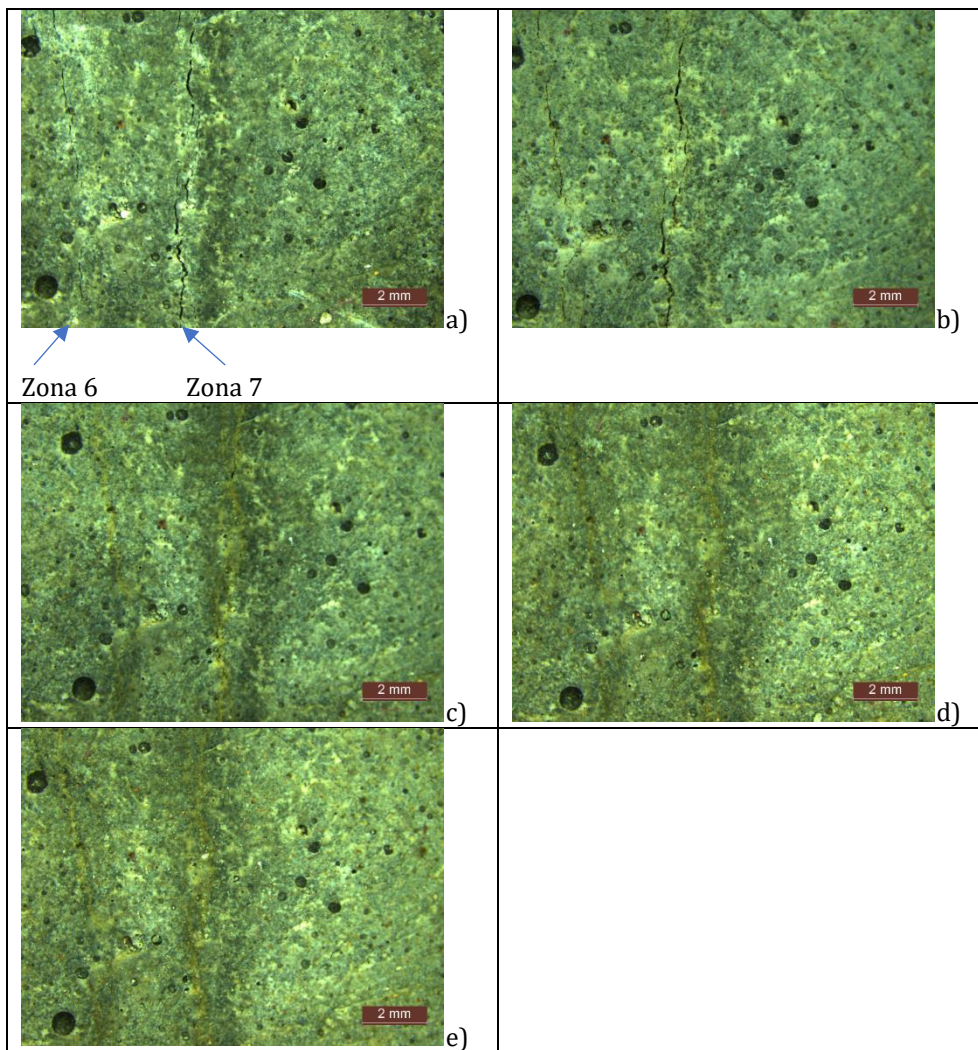


Fig. 7.4.2.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 6 și Zona 7):

- a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare.



Compoziția T1 - Zona 8 și Zona 9

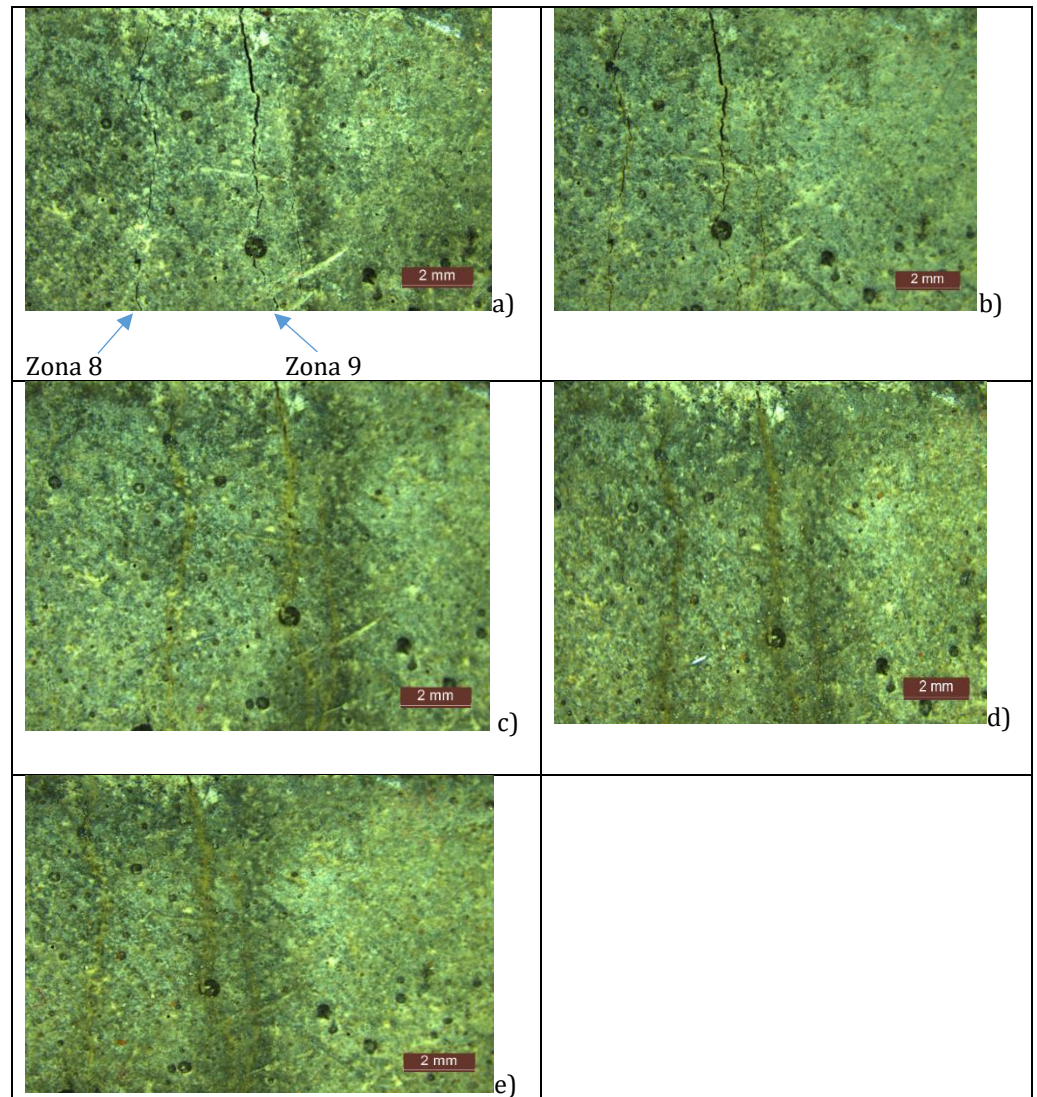


Fig. 7.4.2.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 8 și Zona 9):

- a) aspect fisură indusă;
- b) aspect fisură după 1 zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

## Compoziția T1 – Detaliul 1

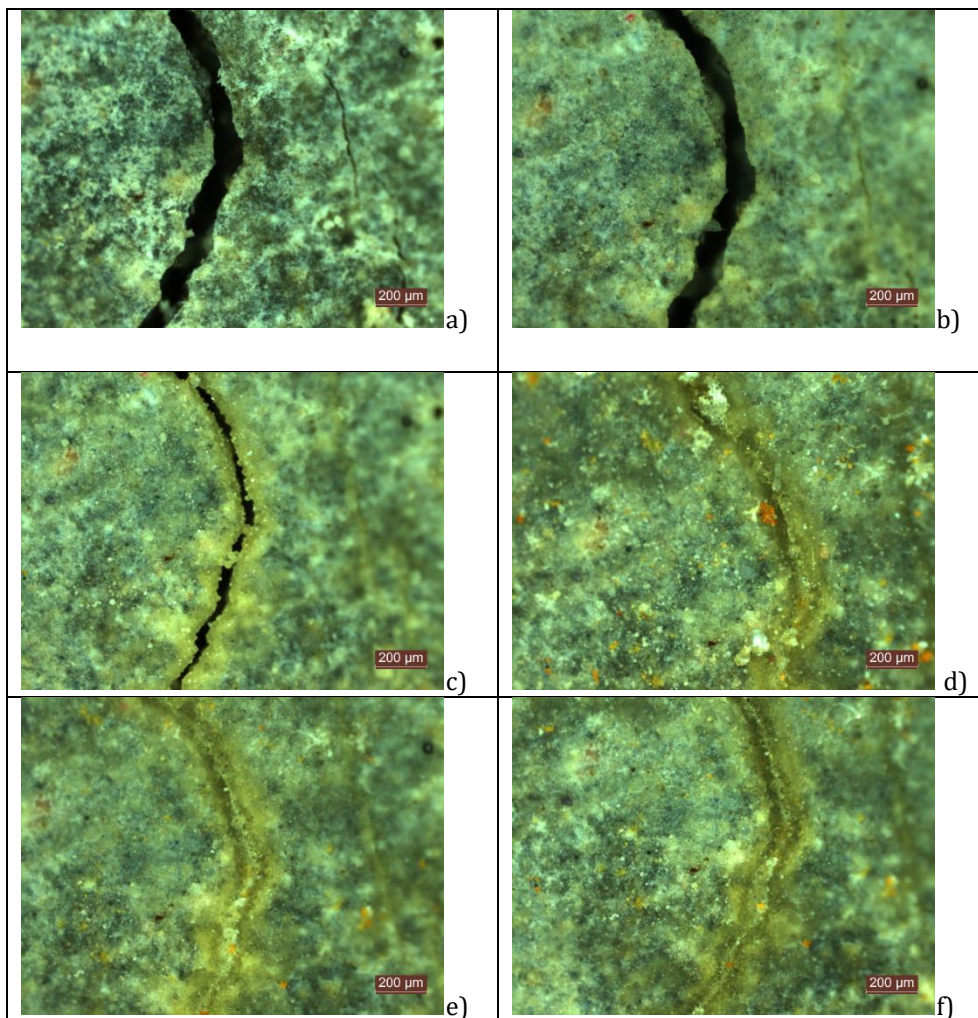


Fig. 7.4.2.10. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Detaliul 1): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

### **7.4.3 Evaluarea capacității de auto - vindecare pentru compoziția proiectată T2**

Pentru compoziția T2 în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării, la 1zi, la 4 zile, la 8 zile, la 14 zile și la 20 zile, suprafața prisme a fost împărțită în 20 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 6 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 10 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 11 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 12 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 13 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 14 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 15 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 16 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 17 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 18 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 19 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 20 cu 12 locuri de verificare;

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției T2 a fost supusă la cicluri de ud-uscat (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

#### **Zonele de evaluare 1-20**

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-20, respectiv a vitezei de închidere a microfisurilor sunt prezentate în Tab. 7.4.3..

Tab. 7.4.3. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T2 – Zonele de evaluare (1-20).

Caracteristica	Durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
<b>Zona 1</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	34	23,7	6,4	0	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	30,29	81,18	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	40	34	34	0	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	15,00	15,00	100	-	-
<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	55	46,5	35,8	28	0	-
$GV_f^m$ (%)	0	15,45	34,91	94,91	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	62	59	48	34	0	-
$GV_f^M$ (%)	0	4,84	22,58	45,16	100	-
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	43	32,5	27	2,4	0	-
$GV_f^m$ (%)	0	24,42	37,21	94,42	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	48	36	33	18	0	-
$GV_f^M$ (%)	0	25,00	31,25	100	100	-
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	41	33,6	25,75	1,86	1	-
$GV_f^m$ (%)	0	18,05	37,20	95,46	97,56	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	59	49	41	38	28	-
$GV_f^M$ (%)	0	16,95	30,51	52,54	52,54	-
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	41	31,3	23,57	2,14	1,02	1
$GV_f^m$ (%)	0	23,66	42,51	94,78	97,51	97,56
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	48	41	37	30	30	20
$GV_f^M$ (%)	0	14,58	22,92	37,50	37,50	58,33
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	46	35,5	29,7	19,92	13,2	9
$GV_f^m$ (%)	0	22,83	35,43	56,70	71,30	80,43
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	60	50	47	32	32	10
$GV_f^M$ (%)	0	9,09	14,55	41,82	41,82	81,82
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	36	22,86	18,93	13,2	7,87	6,4
$GV_f^m$ (%)	0	36,50	47,42	63,33	78,14	82,22
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	51	37	34	33	32	10
$GV_f^M$ (%)	0	27,45	33,33	35,29	37,25	80,39
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	33	30,8	10	0	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	6,67	69,70	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	45	45	34	0	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	0	24,44	100	-	-



<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	65	59	18	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	9,23	72,31	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	85	75	50	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	11,76	41,18	100	-	-
<b>Zona 10</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	48	39	9	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	18,75	81,25	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	58	55	30	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	5,17	48,28	100	-	-
<b>Zona 11</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	58	47	11	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	18,97	81,03	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	83	62	36	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	25,30	56,63	100	-	-
<b>Zona 12</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	50,3	49	2	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	2,58	96,02	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	60	58	29	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	3,33	51,67	100	-	-
<b>Zona 13</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	52	50	7	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	3,85	86,54	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	62	62	30	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	0	51,61	100	-	-
<b>Zona 14</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	37,9	33,5	4,6	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	11,61	87,86	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	57	50	10	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	12,28	82,46	100	-	-
<b>Zona 15</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	37,9	33,5	4,6	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	11,61	87,86	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	57	50	10	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	12,28	82,46	100	-	-
<b>Zona 16</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	33,1	31	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	6,34	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	41	36	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	12,20	100	-	-	-

Continuare Tab. 7.4.3.

<b>Zona 17</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	41	40	6	0	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	2,44	85,37	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	57	52	36	0	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	8,77	36,84	100	-	-
<b>Zona 18</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	34	33	0	-	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	2,94	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	54	49	0	-	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	9,26	100	-	-	-
<b>Zona 19</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	31,8	30	0	-	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	5,66	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	47	42	0	-	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	10,64	100	-	-	-
<b>Zona 20</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	31,9	30	0	-	-	-
$GV_f^m$ (%)	0	5,96	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	56	45	0	-	-	-
$GV_f^M$ (%)	0	19,94	100	-	-	-

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.3.1., Fig. 7.4.3.2., Fig. 7.4.3.3., Fig. 7.4.3.4.

Rezultatele sunt prezentate cumulativ pentru toate zonele analizate pe epruveta cu compoziție proiectată T2.

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama ciclurilor de condiționare ud-uscat, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 85  $\mu\text{m}$  la 40  $\mu\text{m}$ . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 65  $\mu\text{m}$  la 31,8  $\mu\text{m}$ , Fig. 7.4.3.1.

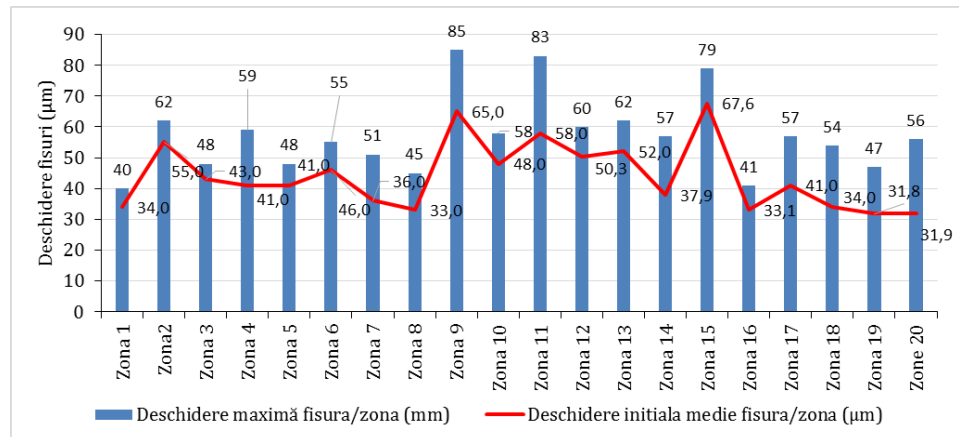


Fig. 7.4.3.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția T2

- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_t^M$ ), se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor) atingându-se maximul de vindecare (100%), după 4 zile în cazul zonelor 16, 18, 19 și 20, după 8 zile în cazul zonelor 1, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 și 17, după 14 zile în cazul zonei 2, după 20 zile în cazul zonei 4, rămânând neînchisă total fisura din zona 5 cu deschidere maximă de 48  $\mu\text{m}$ , zona 6 cu deschidere maximă de 60  $\mu\text{m}$ , zona 7 cu deschidere maximă de 51  $\mu\text{m}$  și zona 17 cu deschidere maximă de 79  $\mu\text{m}$ , Fig. 7.4.3.2..

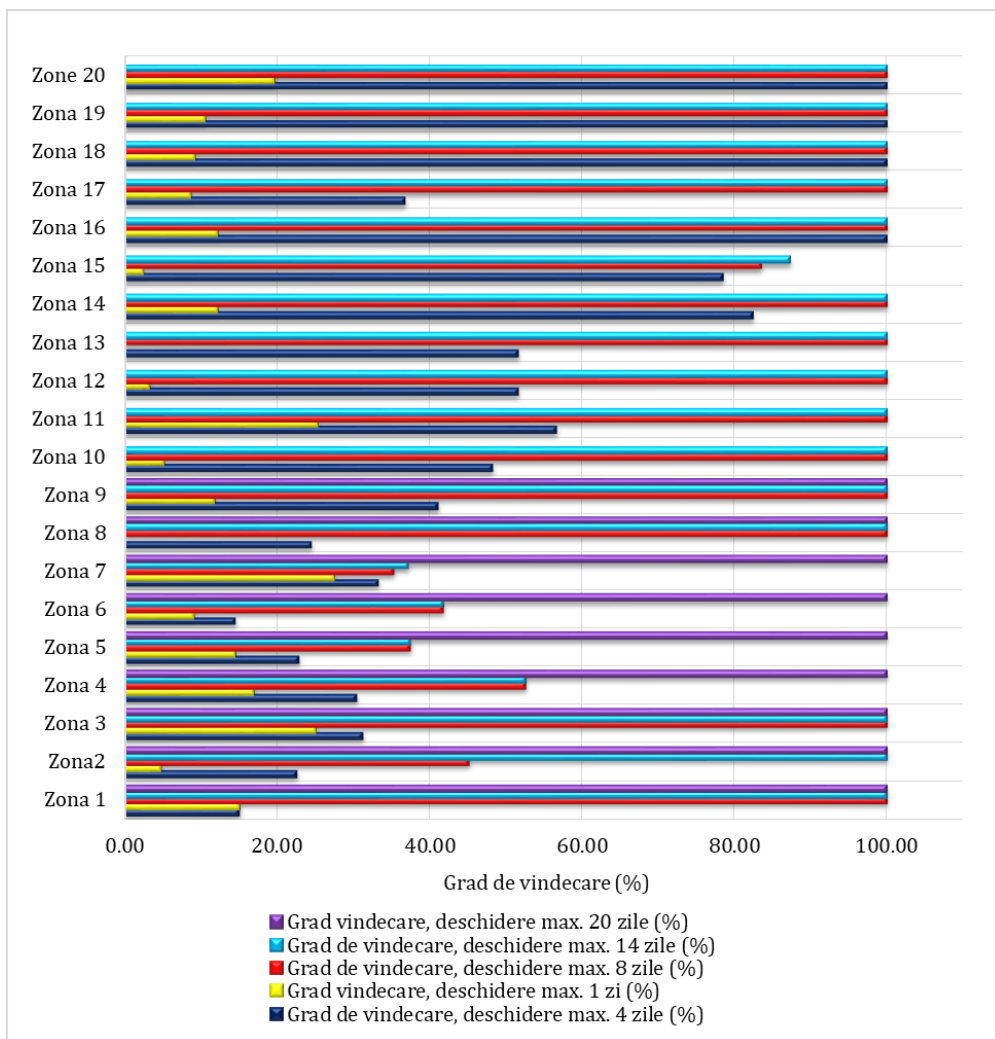


Fig. 7.4.3.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T2

- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, ( $GV_{f}^m$ ) se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), ajungându-se maximul de vindecare (100%), după 4 zile în cazul zonelor 16, 18, 19 și 20, după 8 zile în cazul zonelor 1, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 și 17, după 14 zile în cazul zonei 2, după 20 zile în cazul zonei 4, rămânând neînchisă total fisura din zona 5 cu gradul de vindecare mediu de 97,56%, zona 6 cu gradul de vindecare mediu de 80,43%, zona 7 cu gradul de vindecare

mediu de 82,22% și zona 17 cu gradul de vindecare mediu de 98,52%, Fig. 7.4.3.3.

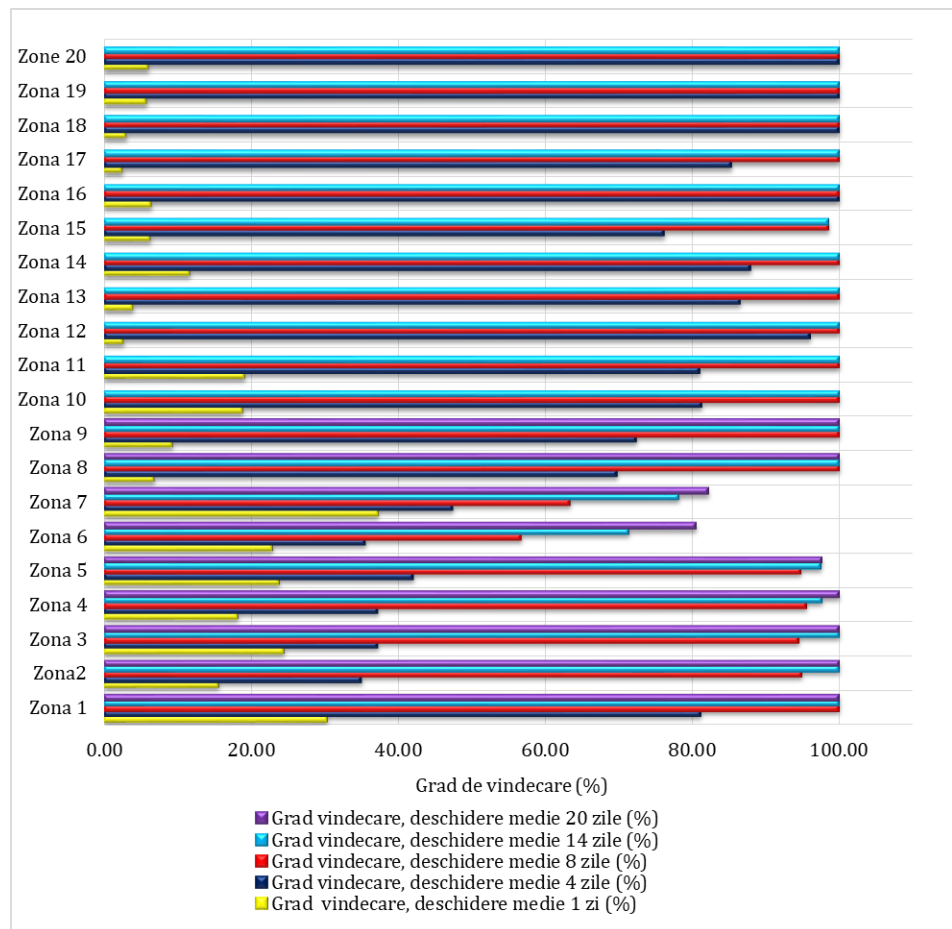


Fig. 7.4.3.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T2

Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare indică faptul că, în primele zile de condiționare (maxim 4zile) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, Fig. 7.4.3.4. Excepție de la această constatare se observă doar în cazul indicatorului calculat pentru Zona 5, Zona 6, Zona 7 și Zona 15. Acest comportament de întârziere din punct de vedere cinetic a procesului de închidere a fisurii a fost pus pe seama deschiderilor medii ale acestor fisuri caracterizate o o deschidere inițială medie de (48-79)  $\mu\text{m}$ .

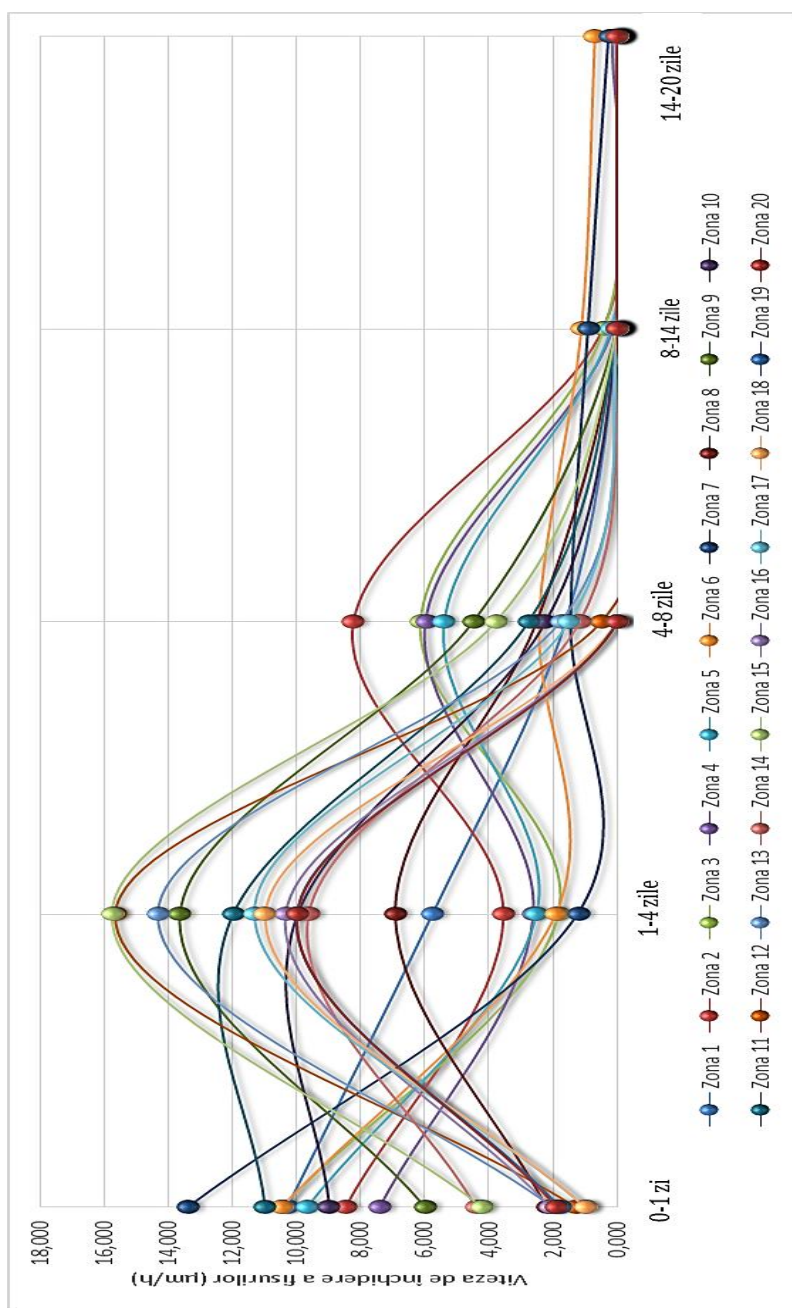


Fig. 7.4.3.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția T2

**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția T2**

Compoziția T2 – zona 1 și zona 2

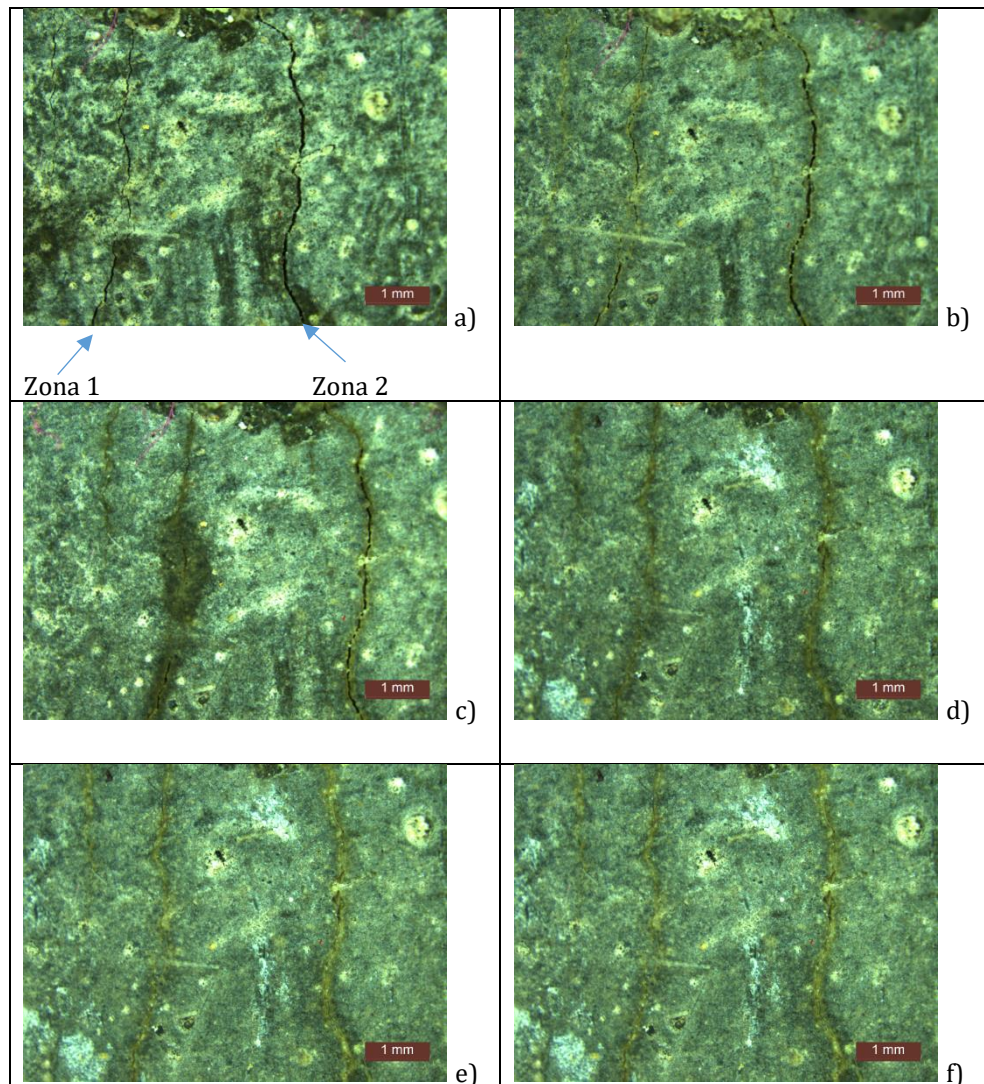


Fig. 7.4.3.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 1 și Zona 2): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.



### Compoziția T2 – zona 3 și zona 4

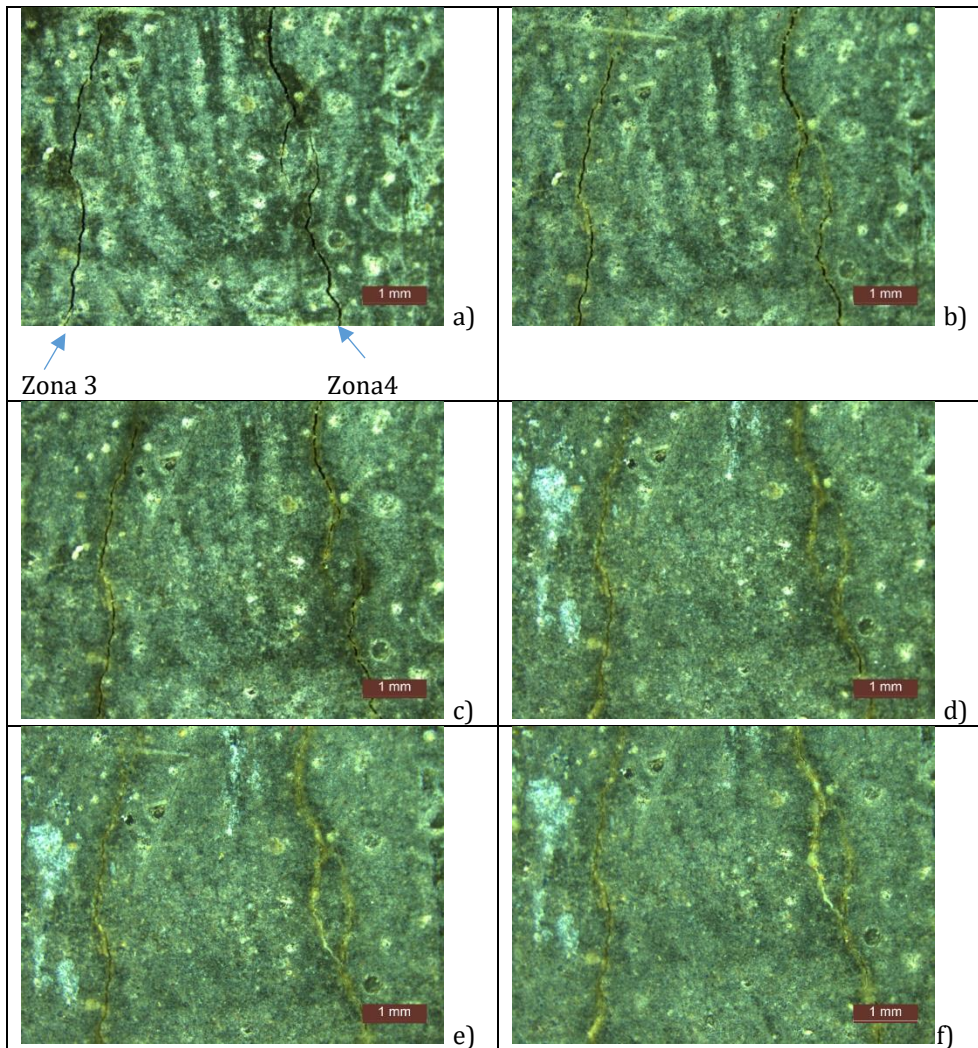


Fig. 7.4.3.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 3 și Zona 4): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.



### Compoziția T2 – zona 5 și zona 6

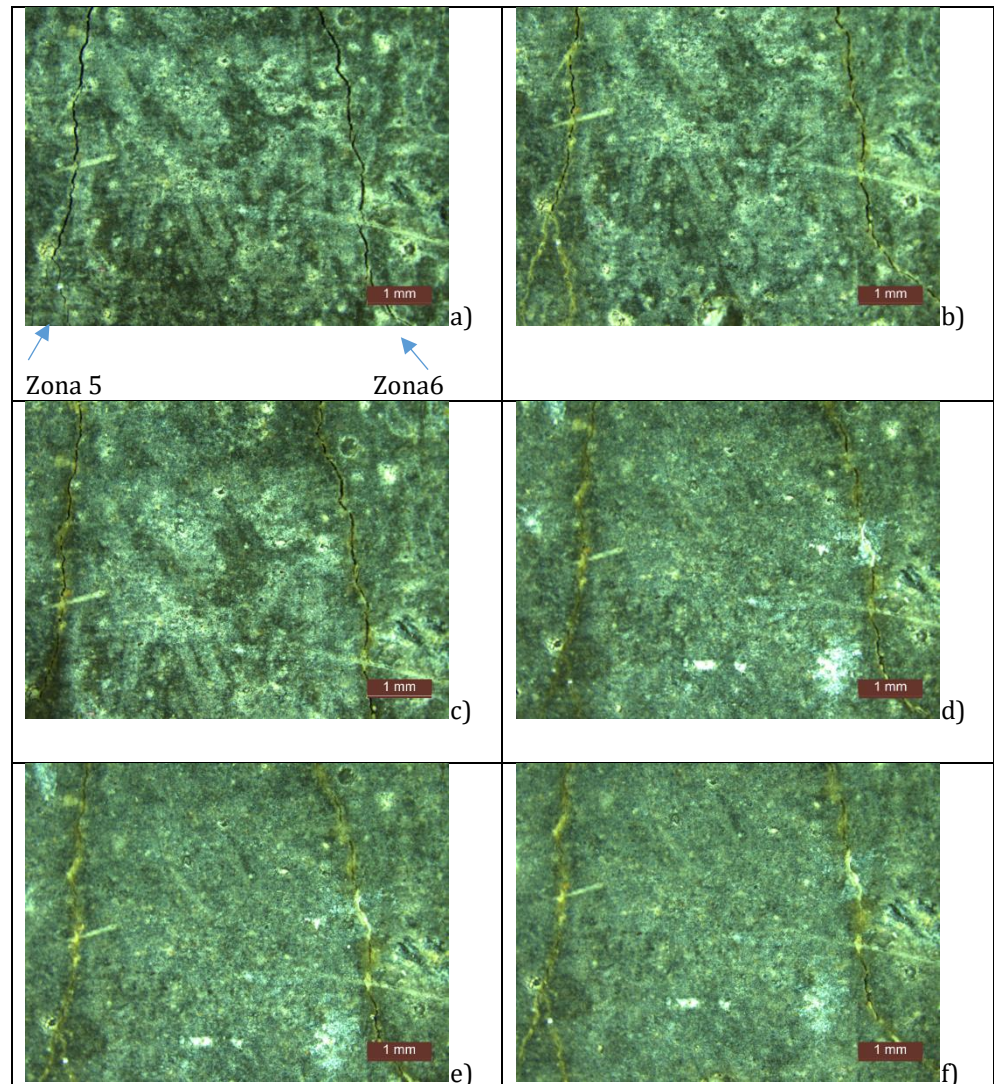


Fig. 7.4.3.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 5 și Zona 6): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare pentru autovindecare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

Compoziția T2 – zona 7

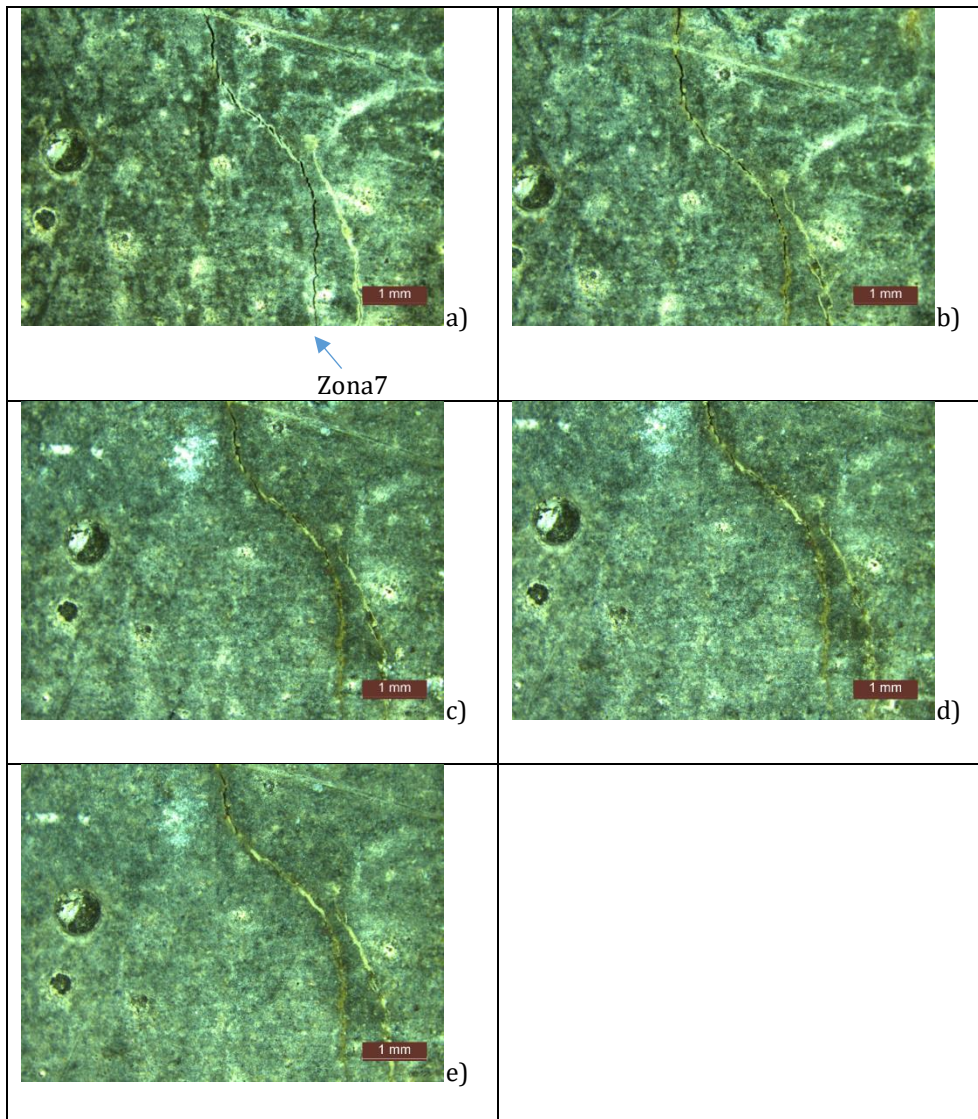


Fig. 7.4.3.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 7):  
a).aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare;  
c) aspect fisură după 4 zile condiționare;  
d) aspect fisură după 8 zile condiționare;  
e) aspect fisură după 14 zile condiționare;

#### 7.4.4. Evaluarea capacității de auto - vindecare pentru compoziția proiectată T3

Pentru compoziția T3 în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării la 1 zi, la 4 zile, la 8 zile, la 14 zile și la 20 zile, suprafața prisme a fost împărțită în 13 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 6 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 10 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 11 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 12 cu 17 locuri de verificare;
- Zona 13 cu 15 locuri de verificare;

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției T3 a fost supusă la cicluri de ud-uscat (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

#### Zonele de evaluare 1-13

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-13, respectiv a vitezei de închidere a microfisurilor sunt prezentate în Tab. 7.4.4..

Tab. 7.4.4. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T3 - Zonele de evaluare (1-13).

Caracteristica	Durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
<b>Zona 1</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	16,5	3	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	81,82	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	25	15	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	40,00	100	-	-	-
<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	16,5	3	0	-	-	-

Continuare Tab. 7.4.4.

$GV_t^m$ (%)	0	76,47	100	-	-	-
$D_0^M$ (mm)	44	28	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	36,36	100	-	-	-
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	25,6	14	1	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	45,31	96,09	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	35	30	15	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	14,29	57,14	100	-	-
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	30,4	21,3	10,4	1,5	1,4	1,2
$GV_t^m$ (%)	0	29,93	65,79	95,07	95,39	96,05
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	37	28	26	23	20	16
$GV_t^M$ (%)	0	24,32	29,73	37,84	45,95	56,76
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	19,6	5,6	2,3	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	71,43	88,27	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	24	24	15	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	0	37,5	100	-	-
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	14,4	4	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	97,22	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	16	16	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	0	100	-	-	-
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	39,7	11	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	72,29	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	49	32	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	34,69	100	-	-	-
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	43,5	10,5	1,7	1,7	1	1
$GV_t^m$ (%)	0	75,86	96,09	96,09	97,70	97,70
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	56	41	30	30	25	20
$GV_t^M$ (%)	0	26,79	46,43	46,43	55,36	64,29
<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	34,8	16,1	2,4	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	53,74	93,10	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	50	28	12	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	44,00	76,00	100	-	-
<b>Zona 10</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu$ m)	37,5	13,3	4	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	64,53	89,33	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu$ m)	58	41	30	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	29,31	48,28	100	-	-

Zona 11						
$D_{av}^m (\mu m)$	49,9	13,4	8,1	3,6	0	-
$GV_t^m (\%)$	0	73,15	83,77	92,79	100	-
$D_{av}^M (\mu m)$	54	48	48	30	0	-
$GV_t^M (\%)$	0	11,11	11,11	44,44	100	-
Zona 12						
$D_{av}^m (\mu m)$	49,4	5,9	4	0	-	-
$GV_t^m (\%)$	0	88,06	91,90	100	-	-
$D_{av}^M (\mu m)$	60	41	34	0	-	-
$GV_t^M (\%)$	0	31,67	43,33	100	-	-
Zona 13						
$D_{av}^m (\mu m)$	45,1	9,3	2,4	0	-	-
$GV_t^m (\%)$	0	79,38	94,68	100	-	-
$D_{av}^M (\mu m)$	56	52	36	0	-	-
$GV_t^M (\%)$	0	7,14	35,71	100	-	-

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.4.1., Fig. 7.4.4.2., Fig. 7.4.4.3., Fig. 7.4.4.4..

Rezultatele sunt prezentate cumulativ pentru toate zonele analizate pe epruveta cu compoziție proiectată T3.

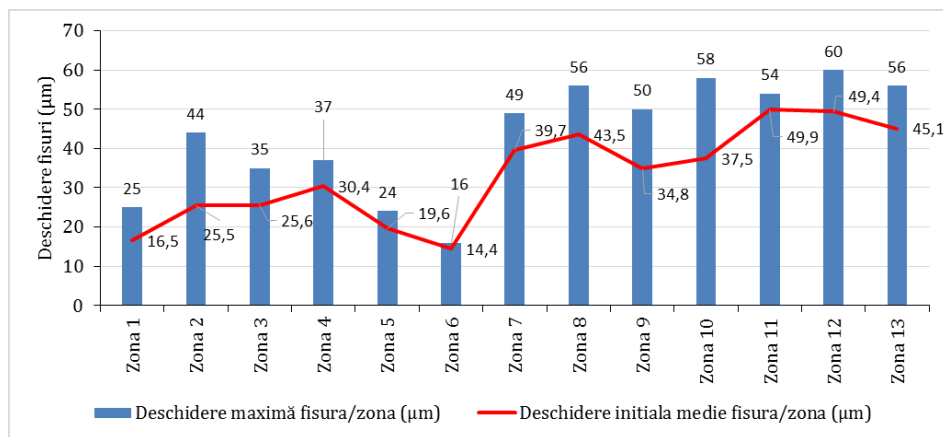


Fig. 7.4.4.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția T3

Se observă că:

- Pe măsura ce se parcurge diagrama ciclurilor de condiționare ud-uscat, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 60



$\mu\text{m}$  la  $16 \mu\text{m}$ . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de la  $49,9 \mu\text{m}$  la  $14,4 \mu\text{m}$ , Fig. 7.4.4.1..

- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_t^M$ ) se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 4 zile în cazul zonelor 1, 2, 6 și 7, după 8 zile în cazul zonelor 3, 5, 9, 10, 12 și 13, după 14 zile în cazul zonei 11, după 20 zile în cazul zonei 4, rămânând neînchisă total fisura cu deschidere maximă de  $0,037 \text{ mm}$  și în cazul zonei 8, rămânând neînchisă total fisura cu deschidere maximă de  $56 \mu\text{m}$ , și este reprezentat în Fig.7.4.4.2..

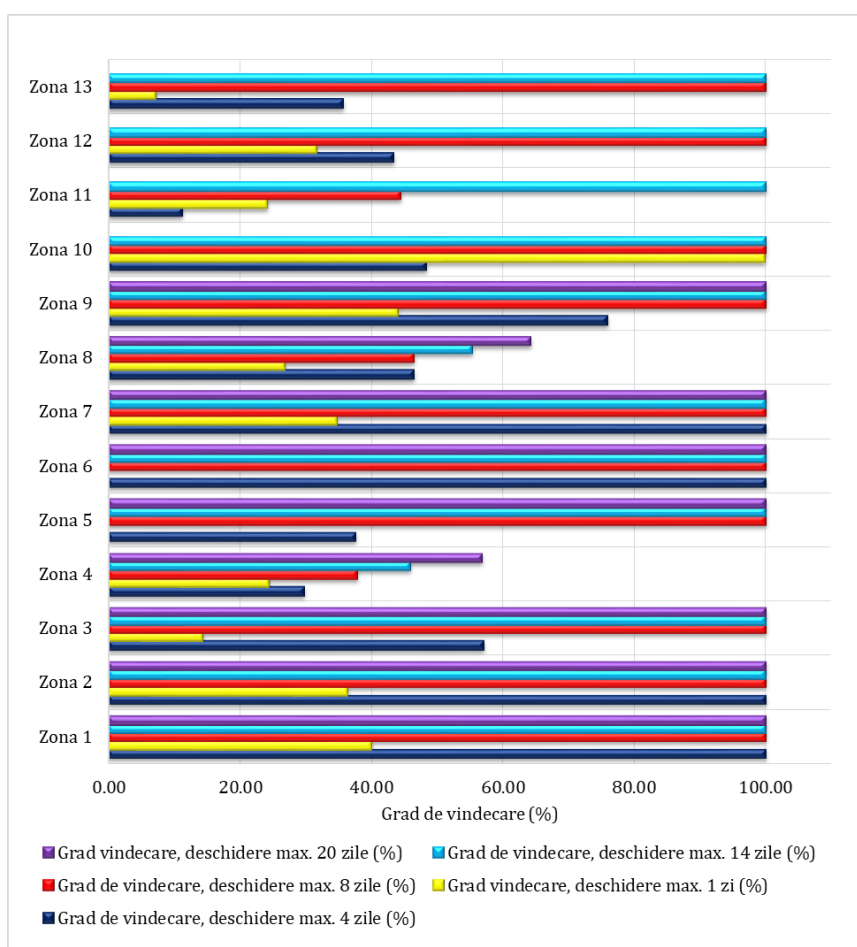


Fig. 7.4.4.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T3

- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, ( $GV^m$ ), se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 4 zile în cazul zonelor 1, 2, 6 și 7, după 8 zile în cazul zonelor 3, 5, 9, 10, 12 și 13, după 14 zile în cazul zonei 11, după 20 zile în cazul zonei 4, rămânând neînchisă total fisura, cu gradul de vindecare mediu final de 96,05 % și în cazul zonei 8, rămânând neînchisă total fisura, cu gradul de vindecare mediu final de 97,70 % , Fig.7.4.4.3.
- Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare indică faptul că, în primele zile de condiționare (maxim 4 zile) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, Fig. 7.4.4.4.. Excepție de la această constatare se observă doar în cazul indicatorului calculat pentru Zona 4 și Zona 8. Aceast comportament de întârziere din punct de vedere cinetic a procesului de închidere a fisurii a fost pus pe seama deschiderilor medii ale acestor fisuri caracterizate o o deschidere inițială medie de (37-56)  $\mu\text{m}$ .

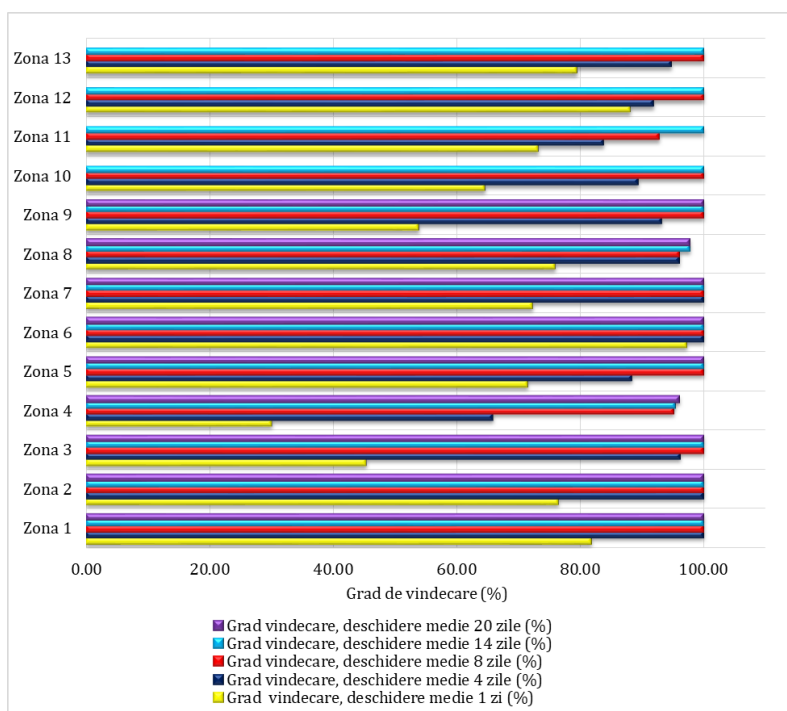


Fig. 7.4.4.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T3

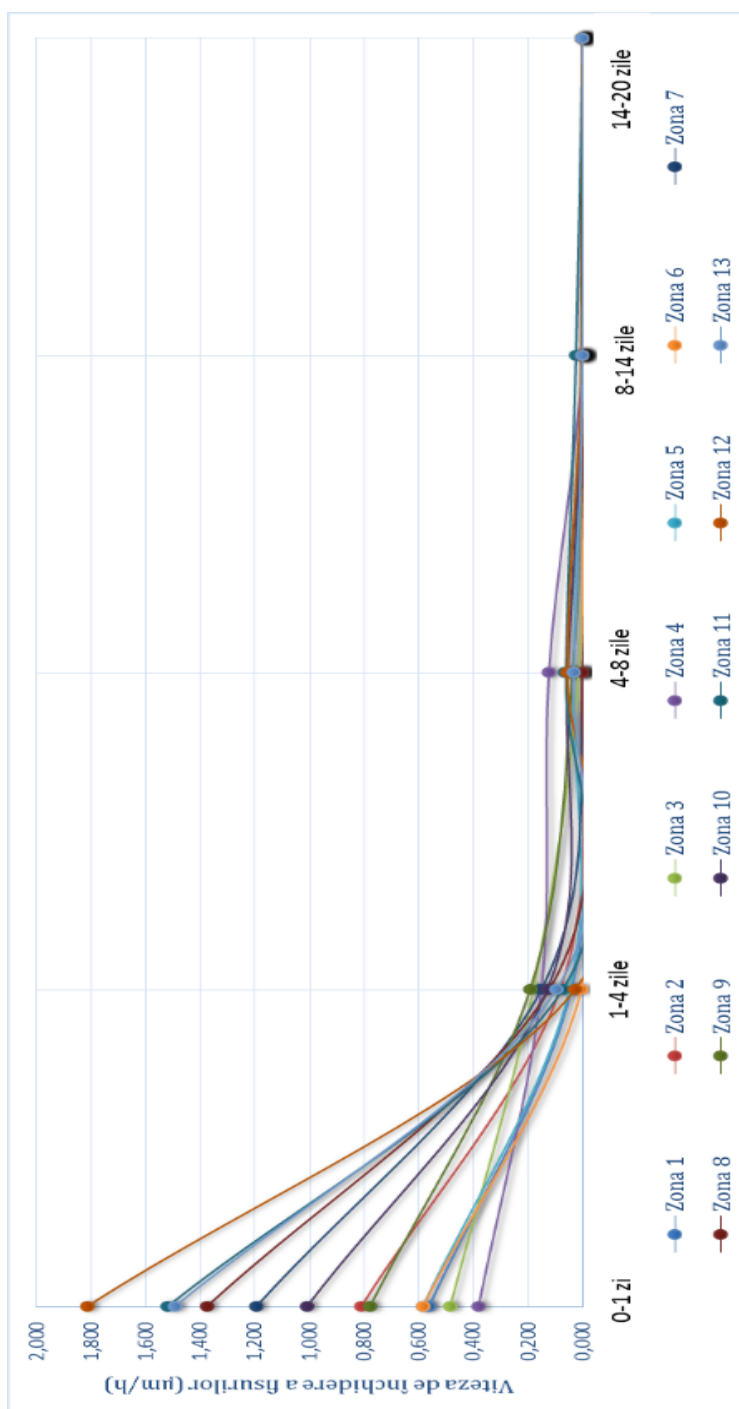


Fig. 7.4.4.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția T3



**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția T3**

Compoziția T3 - zona 7

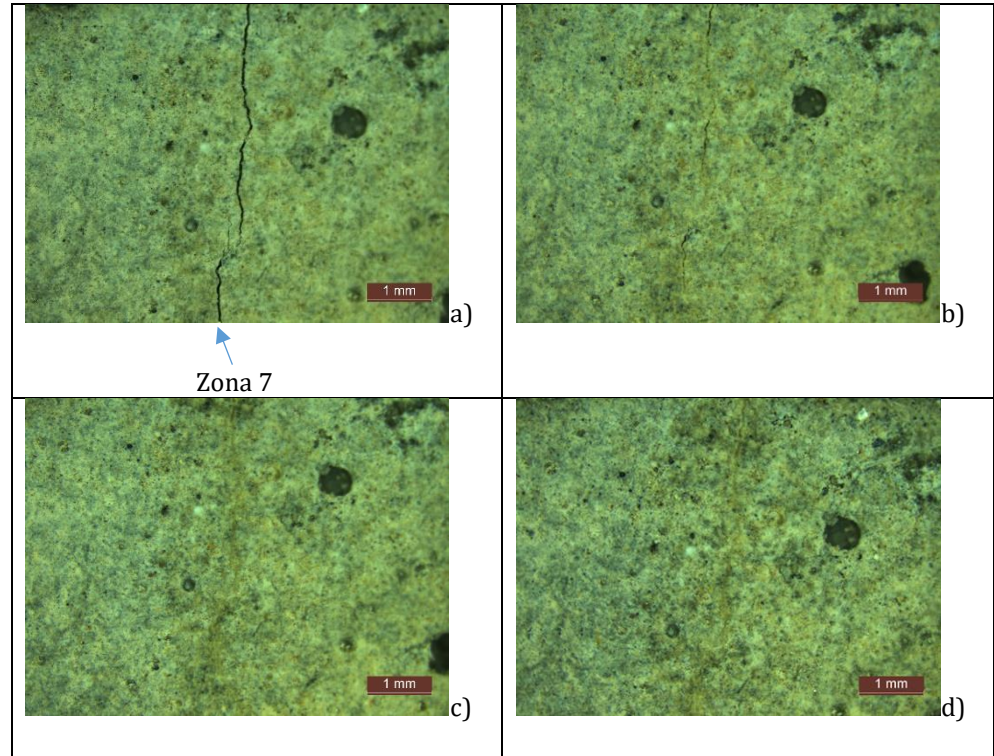


Fig. 7.4.4.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 7):  
a) aspect fisură indusă;  
b) aspect fisură după 1 zi condiționare;  
c) aspect fisură după 4 zile condiționare;  
d) aspect fisură după 8 zile condiționare.

## Compoziția T3 – zona 8

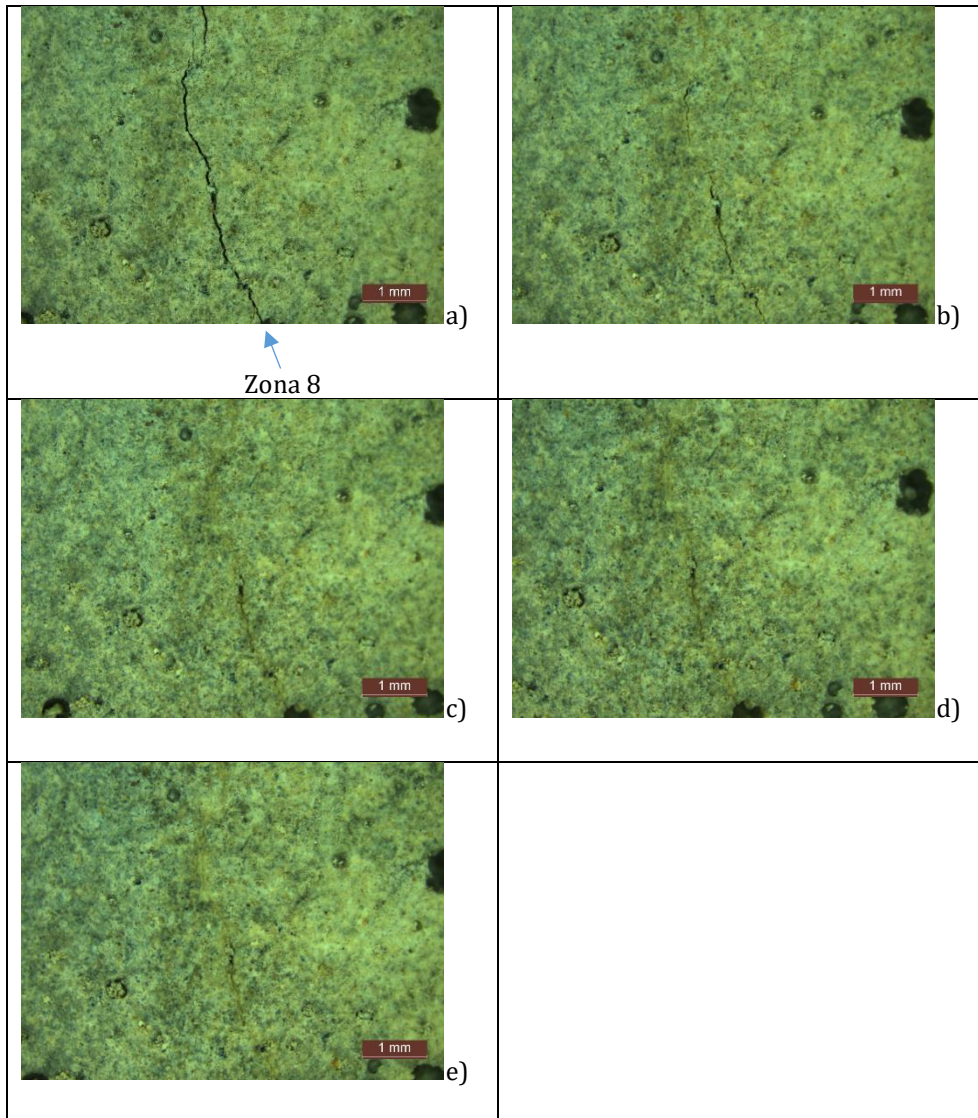


Fig. 7.4.4.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 8):  
a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare;  
c) aspect fisură după 4 zile condiționare pentru autovindecare;  
d) aspect fisură după 8 zile condiționare;  
e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

Compoziția T3 – zona 9

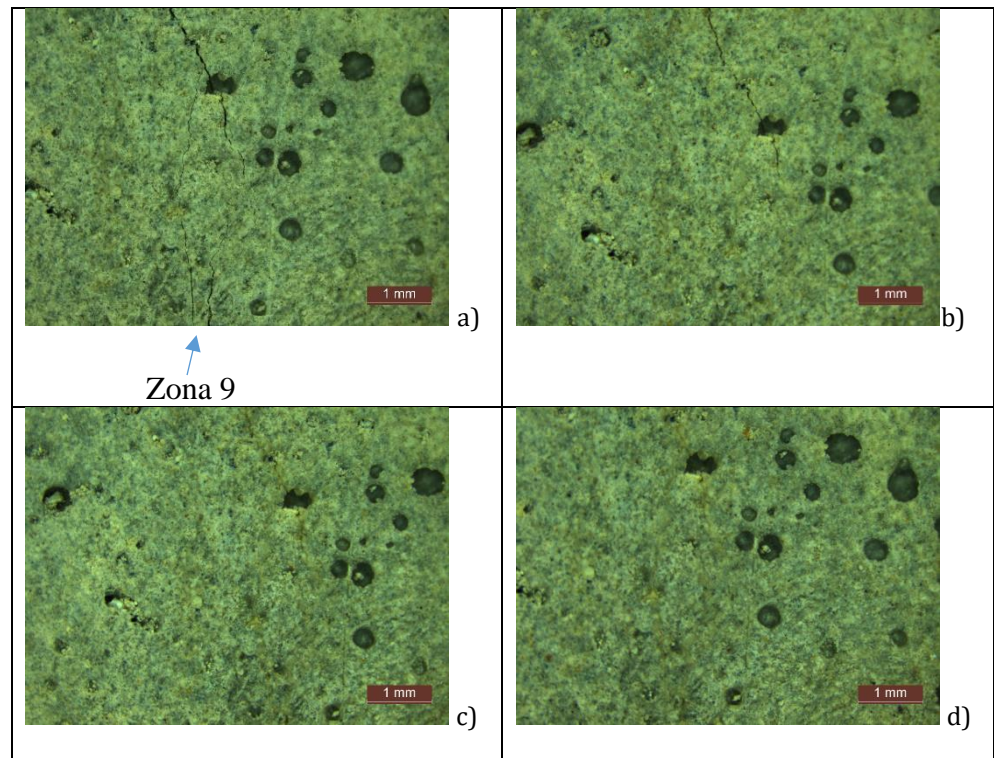
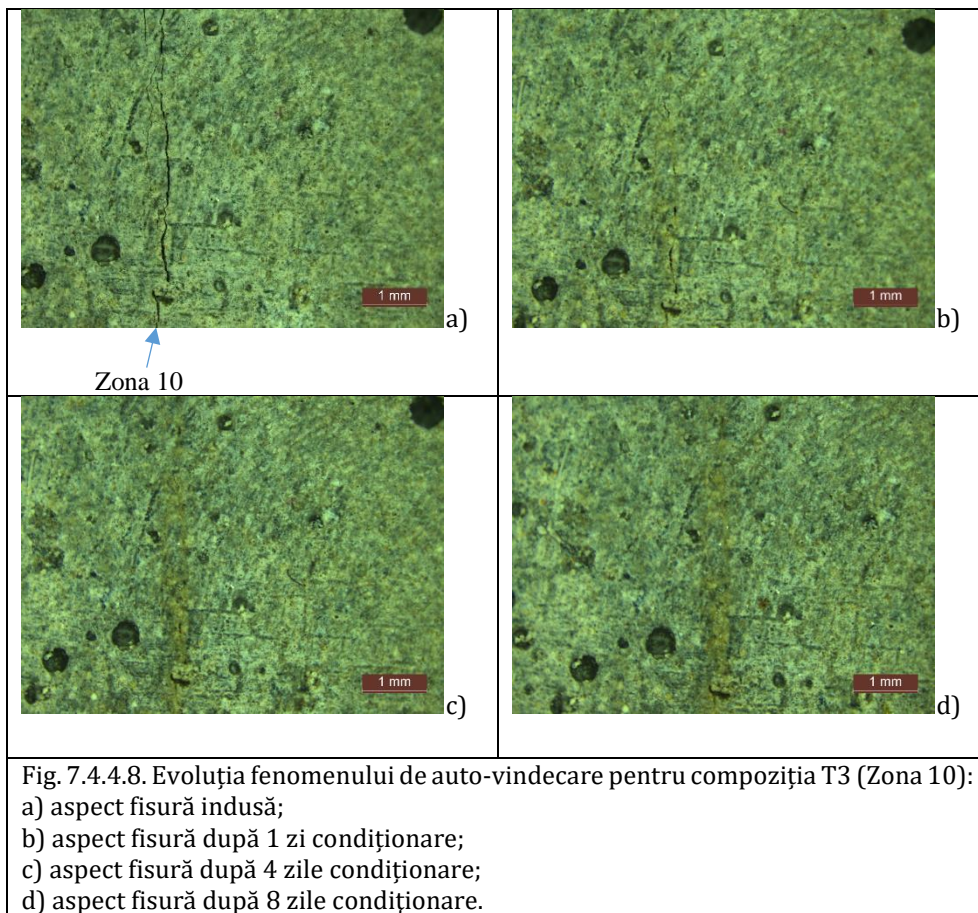


Fig. 7.4.4.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 9):  
a) aspect fisură indusă;  
b) aspect fisură după 1 zi condiționare;  
c) aspect fisură după 4 zile condiționare;  
d) aspect fisură după 8 zile condiționare.



## Compoziția T3 – zona 10



### Compoziția T3 – zona 11

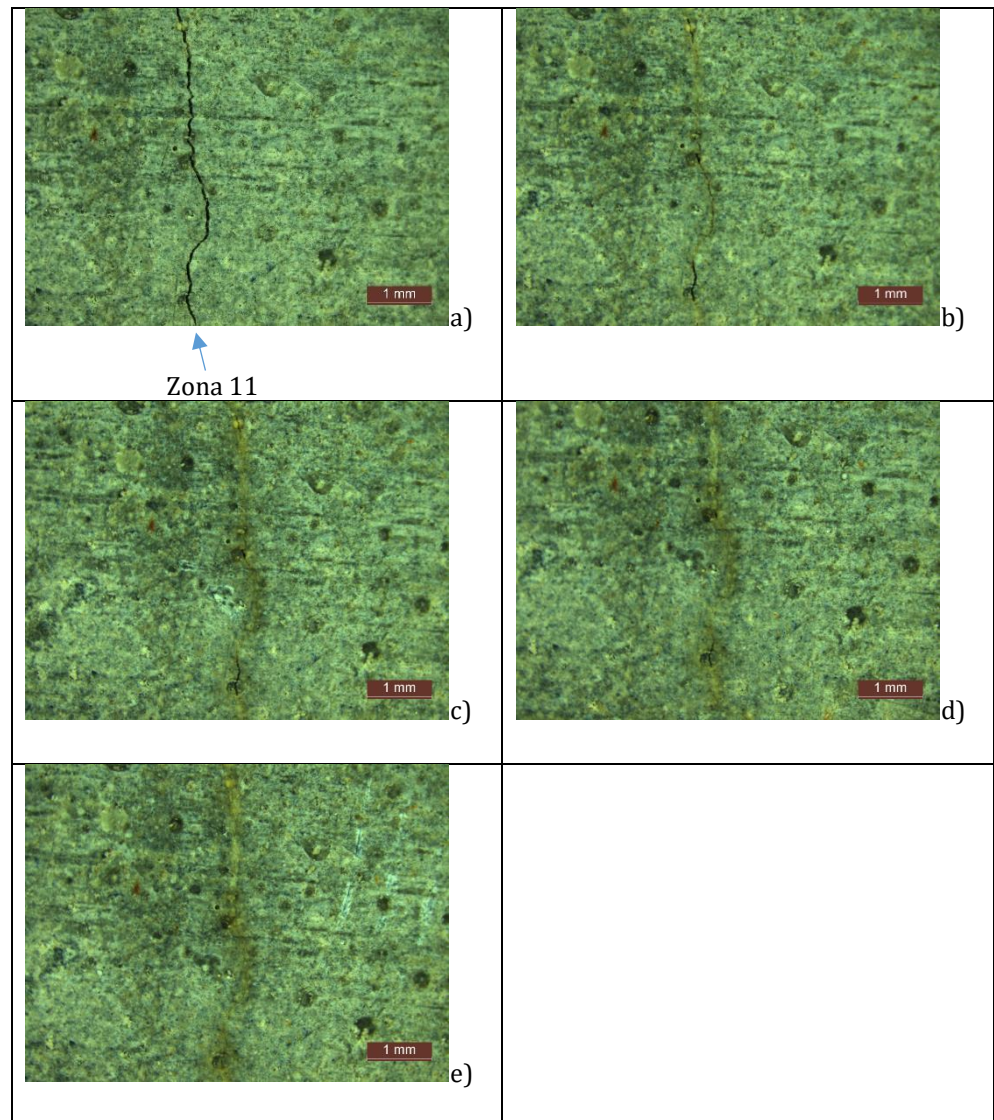
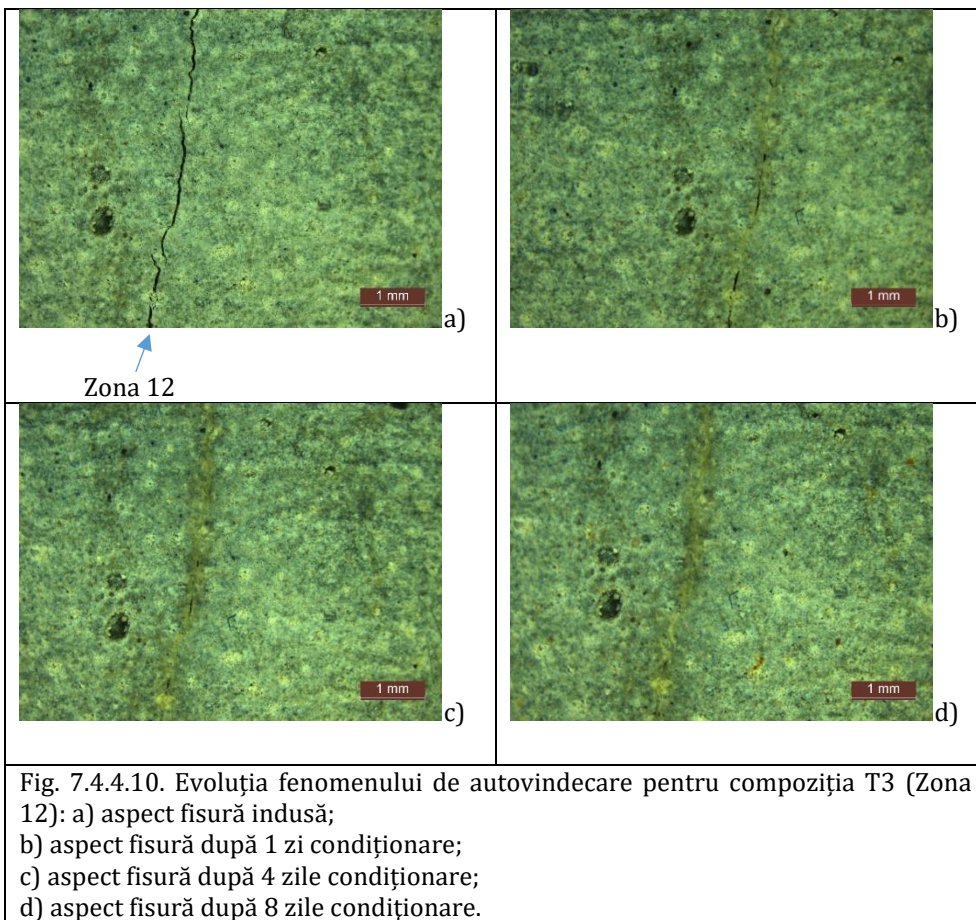


Fig. 7.4.4.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 11):  
a). aspect fisură indusă;  
b) aspect fisură după 1 zi condiționare;  
c) aspect fisură după 4 zile condiționare;  
d) aspect fisura după 8 zile condiționare;  
e) aspect fisura după 14 zile condiționare.

Compoziția T3 – zona 12





### Compoziția T3 – zona 13

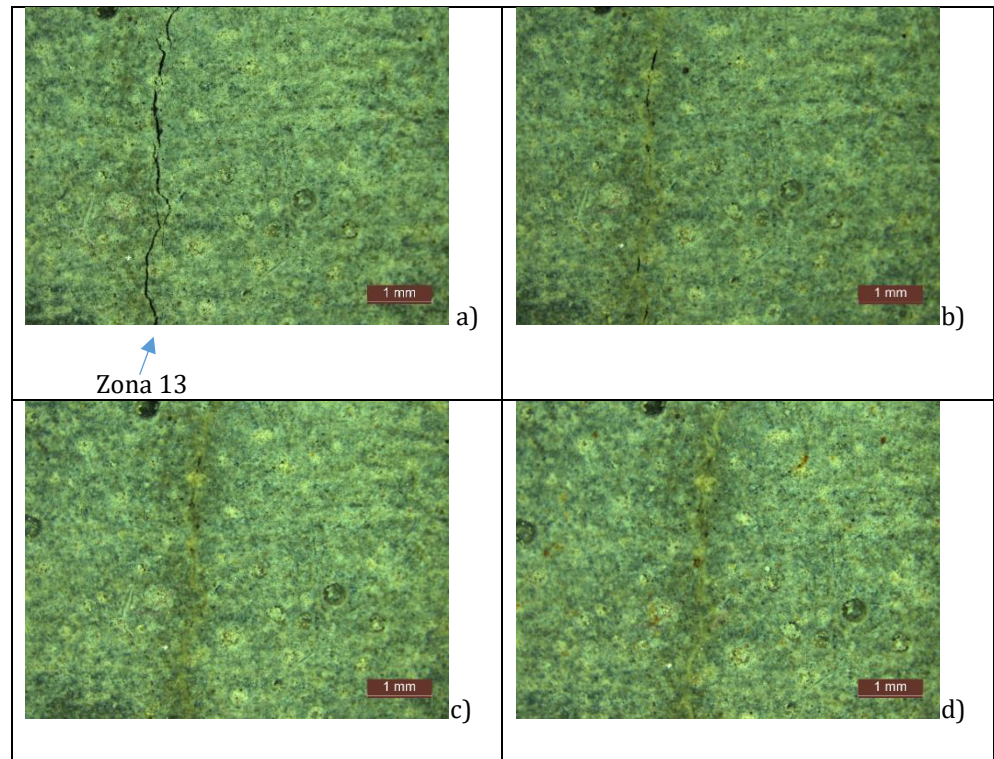


Fig. 7.4.4.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 13): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 24 h condiționare; c) aspect fisură după 96 h condiționare; d) aspect fisură după 192 h condiționare.

## Compoziția T3 – detaliul 1

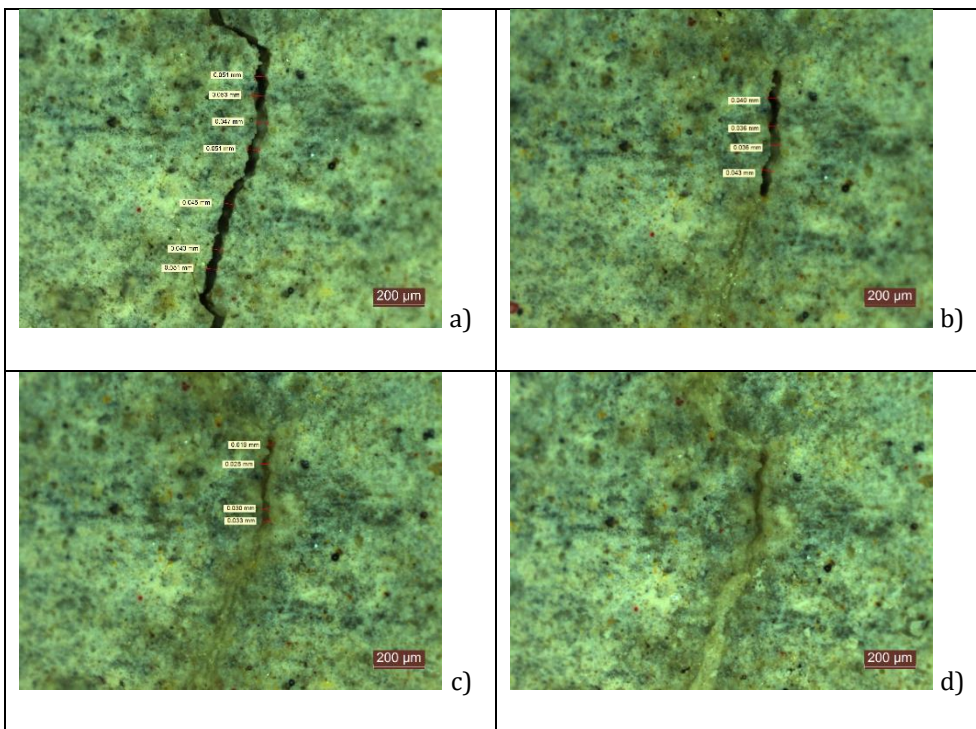
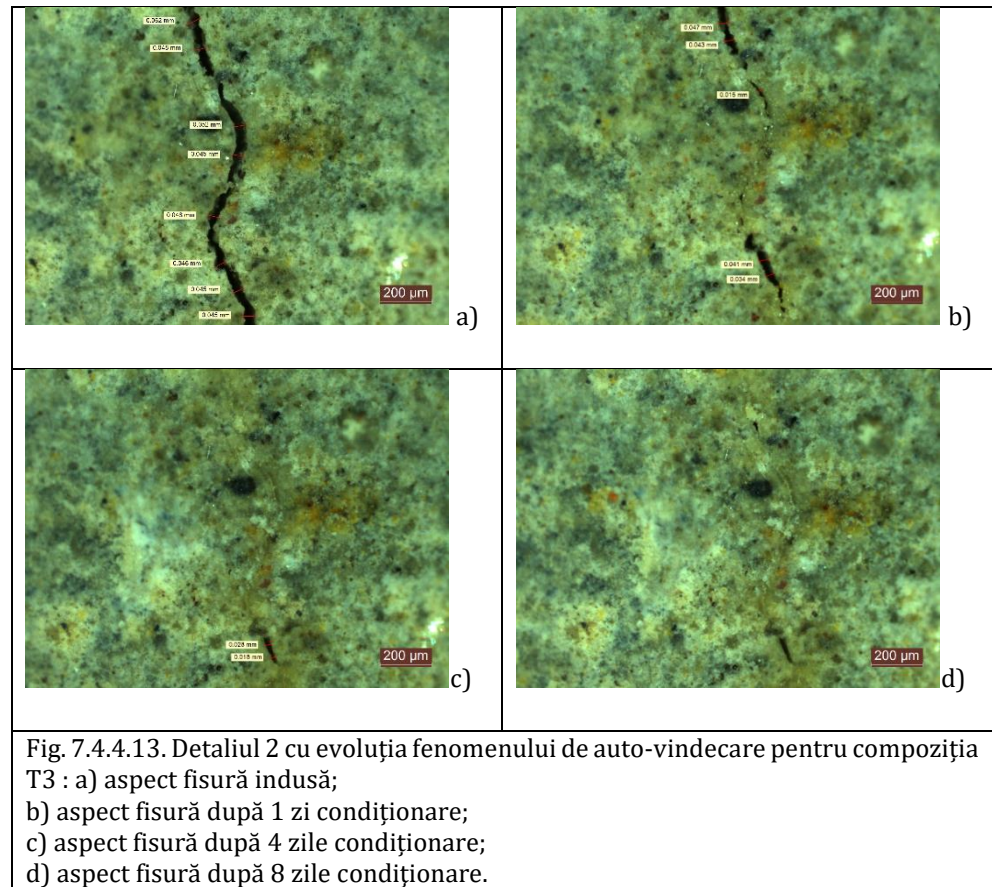


Fig. 7.4.4.12. Detaliul 1 cu evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 : a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare.



## Compoziția T3 – detaliul 2



#### 7.4.5 Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată $TM_{\text{nisip standard}}$

Pentru compoziția  $TM_{\text{nisip standard}}$  în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării la 1 zi, la 4 zile, la 8 zile, la 14 zile și la 20 zile, suprafața prisme a fost împărțită în 16 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 8 locuri de verificare;
- Zona 6 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 10 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 11 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 12 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 13 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 14 cu 6 locuri de verificare;
- Zona 15 cu 8 locuri de verificare;
- Zona 16 cu 16 locuri de verificare.

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției  $TM_{\text{nisip standard}}$  a fost supusă la cicluri de ud-uscat (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

##### **Zonele de evaluare 1-16**

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-16, respectiv a vitezei de închidere a microfisurilor sunt prezentate în Tab. 7.4.5..

Tab. 7.4.5. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția  $TM_{\text{nisip standard}}$  - Zonele de evaluare (1-16).

Caracteristica	Zona 1 - durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
$D_{av}^m (\mu m)$	47,8	47,2	24	12	11	10
$GV_t^m (\%)$	-	1,26	49,79	74,90	76,99	79,08
$D_{av}^M (\mu m)$	65	63	37	31	28	26
$GV_t^M (\%)$	-	3,08	43,08	52,31	56,92	60,00

<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	54,7	54,2	19	11	9	9
$GV_t^m$ (%)	-	0,91	65,27	79,89	83,55	83,55
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	75	70	38	22	17	12
$GV_t^M$ (%)	-	6,67	49,33	70,67	77,33	84,00
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	27,7	22	7	1	0	-
$GV_t^m$ (%)	-	20,58	74,73	96,39	100,00	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	34	30	27	20	0	-
$GV_t^M$ (%)	-	11,76	20,59	41,18	100	-
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	65	65	28,9	16	8	6
$GV_t^m$ (%)	-	0,00	55,54	75,38	87,69	90,77
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	87	87	69	33	17	17
$GV_t^M$ (%)	-	0,00	20,69	62,07	80,46	80,46
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	76,4	76,4	31,5	21	8	4
$GV_t^m$ (%)	-	0,00	58,77	72,51	89,53	94,76
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	99	78	48	22	13	12
$GV_t^M$ (%)	-	21,21	51,52	77,78	86,87	87,88
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	52	50	21	10	0	-
$GV_t^m$ (%)	-	3,85	59,62	80,77	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	63	62	25	21	0	-
$GV_t^M$ (%)	-	1,59	60,32	66,67	100	-
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	47	47	16	11	0	-
$GV_t^m$ (%)	-	0,00	65,96	76,60	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	59	57	34	30	0	-
$GV_t^M$ (%)	-	3,39	42,37	49,15	100	-
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	72,1	72	19	18	17	15
$GV_t^m$ (%)	-	0,14	73,65	75,03	76,42	79,20
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	88	88	58	47	24	22
$GV_t^M$ (%)	-	0,00	34,09	46,59	72,73	75,00
<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	33,2	27	20	15	7	0
$GV_t^m$ (%)	-	18,67	39,76	54,82	78,92	100
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	43	41	22	18	10	0
$GV_t^M$ (%)	-	4,65	48,84	58,14	76,74	100
<b>Zona 10</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	31,5	24	19	5	3	0
$GV_t^m$ (%)	-	23,81	39,68	84,13	90,48	100

Continuare Tab. 7.4.5.

$D_{av}^M (\mu m)$	47	44	24	21	12	0
$GV_f^M (\%)$	-	6,38	48,94	55,32	74,47	100
<b>Zona 11</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	94,4	85	44	24	14	14
$GV_f^m (\%)$	-	9,96	53,39	74,58	85,17	85,17
$D_{av}^M (\mu m)$	114	92	49	32	30	30
$GV_f^M (\%)$	-	19,30	57,02	71,93	73,68	73,68
<b>Zona 12</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	52	51	25	18	9	0
$GV_f^m (\%)$	-	1,92	51,92	65,38	82,69	100
$D_{av}^M (\mu m)$	68	61	36	34	14	0
$GV_f^M (\%)$	-	10,29	47,06	50,00	79,41	100
<b>Zona 13</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	19	12	4	4	0	-
$GV_f^m (\%)$	-	36,84	78,95	78,95	100	-
$D_{av}^M (\mu m)$	29	24	17	11	0	-
$GV_f^M (\%)$	-	17,24	41,38	62,07	100,00	-
<b>Zona 14</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	58	48	24	15	5	5
$GV_f^m (\%)$	-	17,24	58,62	74,14	91,38	91,38
$D_{av}^M (\mu m)$	77	75	38	19	17	10
$GV_f^M (\%)$	-	2,60	50,65	75,32	77,92	87,01
<b>Zona 15</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	31,1	24	19	10	0	-
$GV_f^m (\%)$	-	22,83	38,91	67,85	100	-
$D_{av}^M (\mu m)$	41	39	33	18	0	-
$GV_f^M (\%)$	-	4,88	19,51	56,10	100	-
<b>Zona 16</b>						
$D_{av}^m (\mu m)$	75,5	75,1	40,2	35,1	13	6
$GV_f^m (\%)$	-	0,53	46,75	53,51	82,78	92,05
$D_{av}^M (\mu m)$	91	90	65	34	23	20
$GV_f^M (\%)$	-	1,10	28,57	62,64	74,73	78,02

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.5.1., Fig. 7.4.5.2., Fig. 7.4.5.3., Fig. 7.4.5.4..

Rezultatele sunt prezentate cumulativ pentru toate zonele analizate pe epruveta cu compoziție proiectată  $TM_{nisip}$  standard.

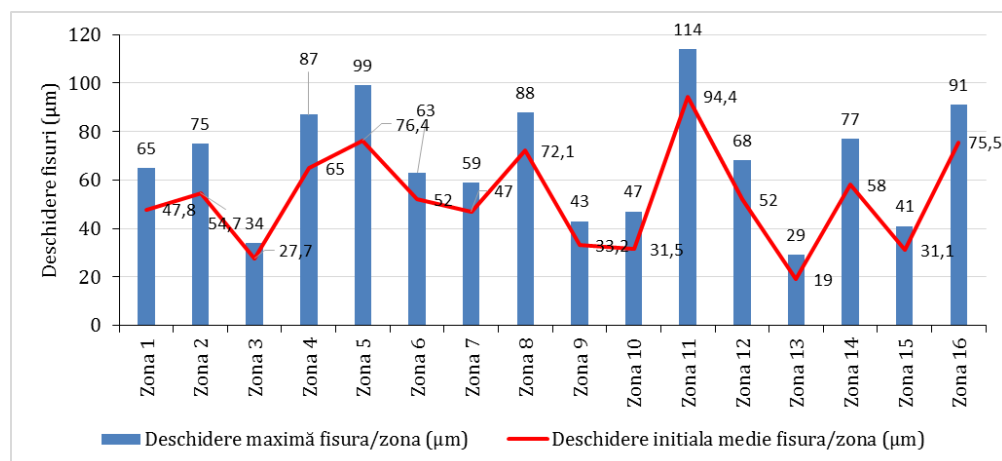


Fig. 7.4.5.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția  $TM_{nisip\ standard}$

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama de cicluri de condiționare ud-uscat, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de  $114\ \mu m$  la  $29\ \mu m$ . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la o valoare inițială de  $94,9\ \mu m$  la  $19\ \mu m$ , Fig. 7.4.5.1..
- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_t^M$ ) este reprezentat în Fig.4.7.4.5.2., se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 14 zile în cazul zonelor 3, 6, 7, 13 și 15, după 20 zile în cazul zonelor 9, 10 și 12, rămânând parțial deschise fisurile cu deschiderile prezentate în Tab. 7.4.5.1..

Tab. 7.4.5.1. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția  $TM_{nisip\ standard}$

Nr. zonă	Deschidere inițială fisură (µm)	Deschidere finală fisură (µm)
1	65	26
2	75	12
4	87	17
5	99	12
8	88	22
11	114	30
14	77	10
16	91	20

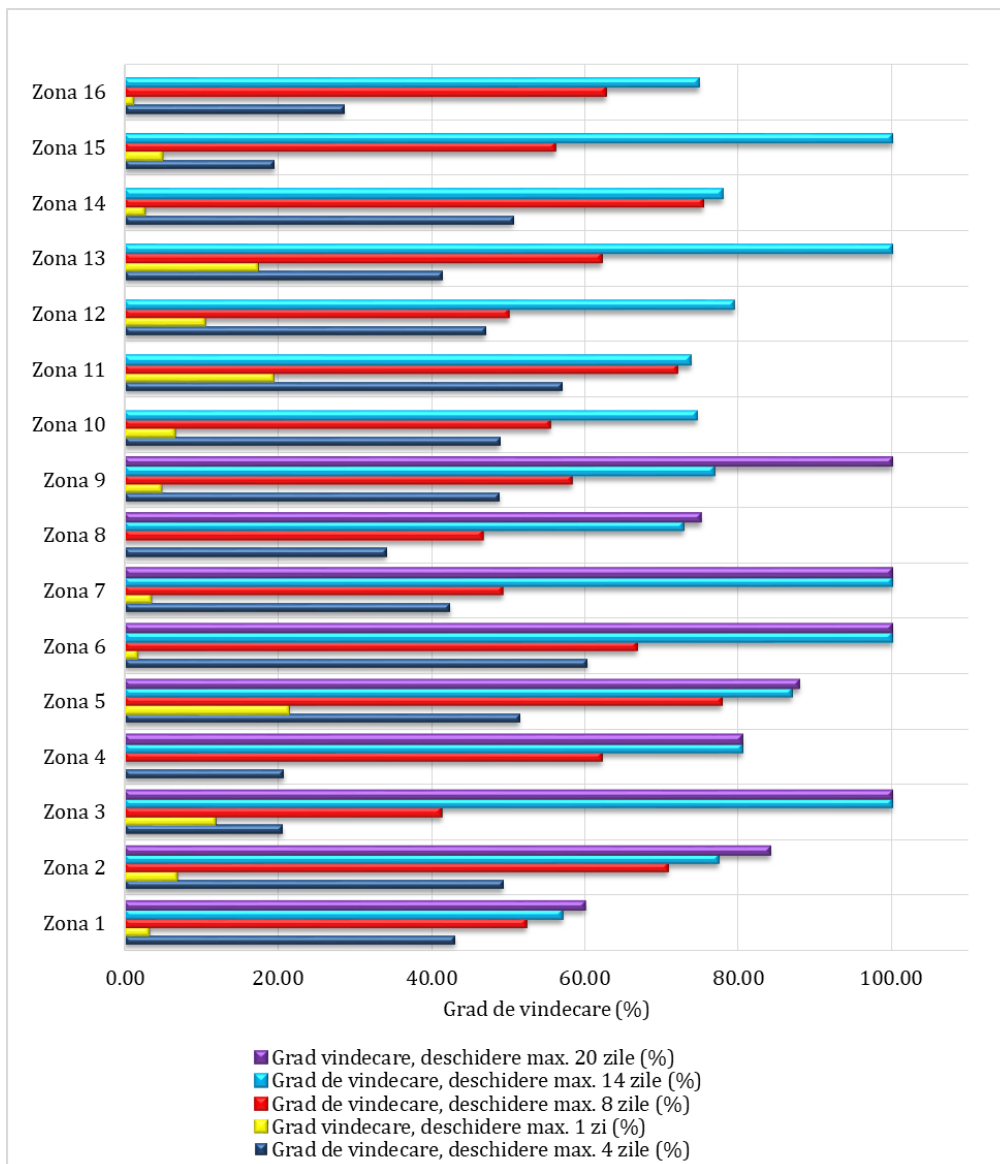


Fig. 7.4.5.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția  $TM_{nisip}$  standard

- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, ( $GV_t^m$ ), este reprezentat în Fig. 7.4.5.3., se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 14 zile în cazul zonelor 3, 6,

7, 13 și 15, după 20 zile în cazul zonelor 9, 10 și 12, rămânând neînchisă total pentru fisurile cu gradul de vindecare mediu final deschiderile prezentate în Tab. 7.4.5.2.

Tab. 7.4.5.2. Evoluția deschiderii fisurii rămasă parțial deschise pentru compoziția  $TM_{nisip\ standard}$

Nr. zonă	$GV_t^m$ (%)
1	79,08
2	83,55
4	90,77
5	94,76
8	79,20
11	85,17
14	91,38
16	92,05

- Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare indică faptul că, în primele zile de condiționare (maxim 4 zile) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, Fig. 7.4.5.4.

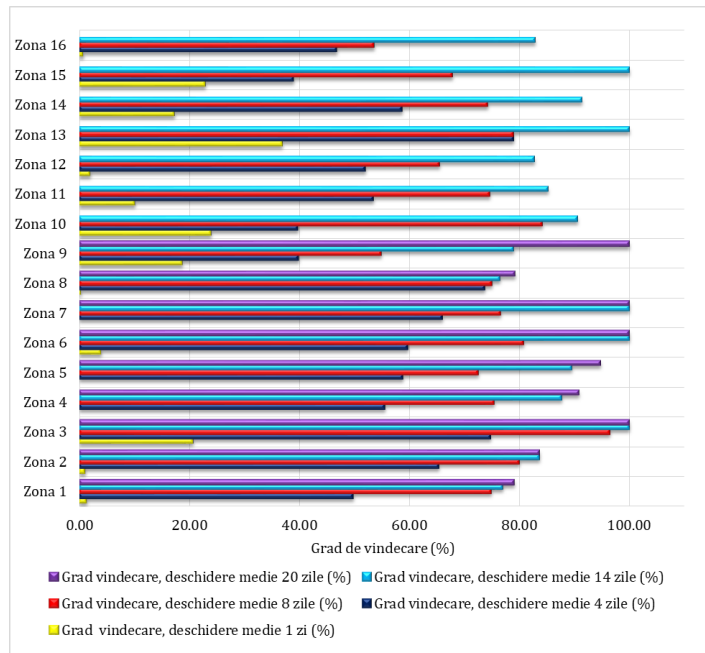


Fig. 7.4.5.3 Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării  $TM_{nisip\ standard}$

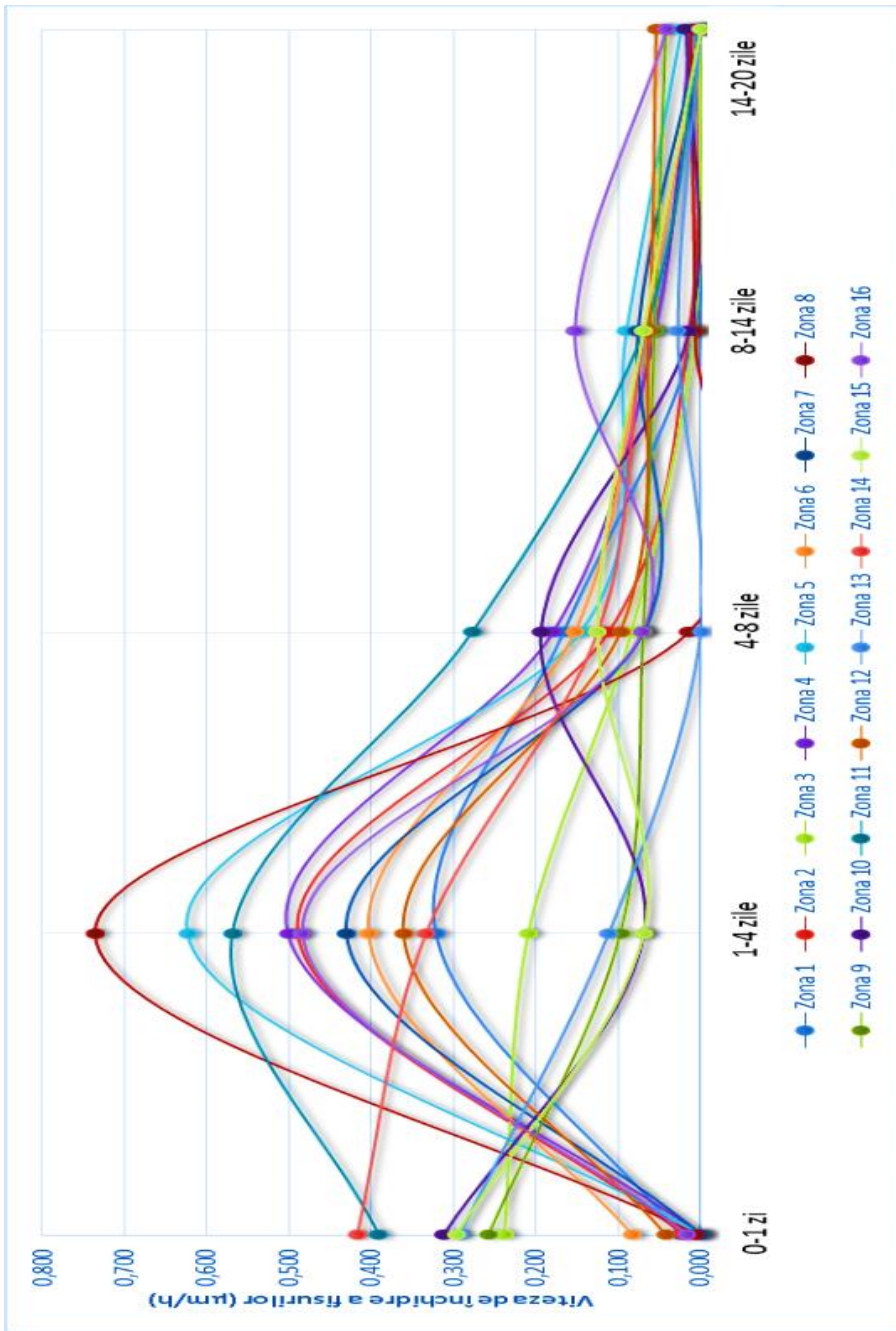


Fig. 7.4.5.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare  $TM_{nisp}$  standard



**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția TM<sub>nisip standard</sub>**

Compoziția TM<sub>nisip standard</sub> – zona 1

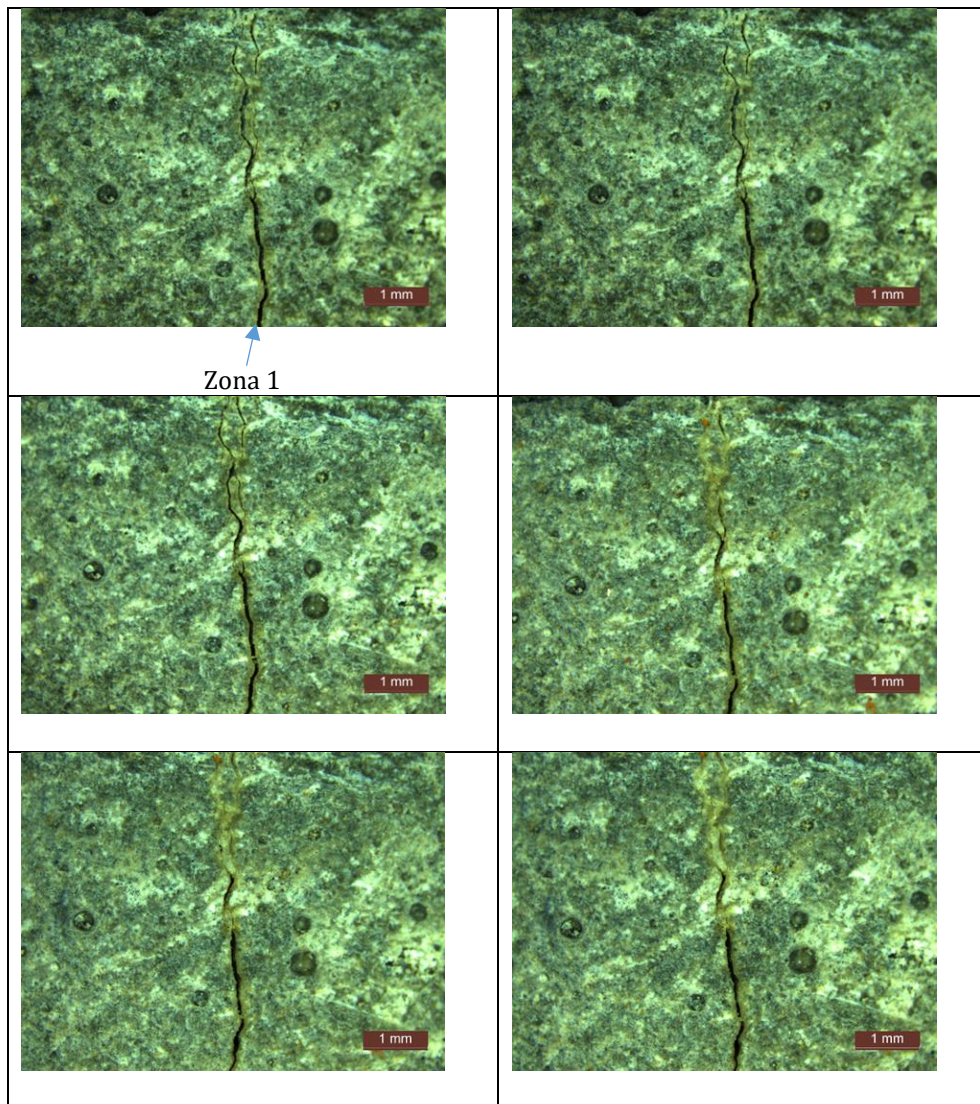


Fig. 7.4.5.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția TM<sub>nisip standard</sub> (Zona 1): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

## Compoziția $TM_{nisip}$ standard – zona 2

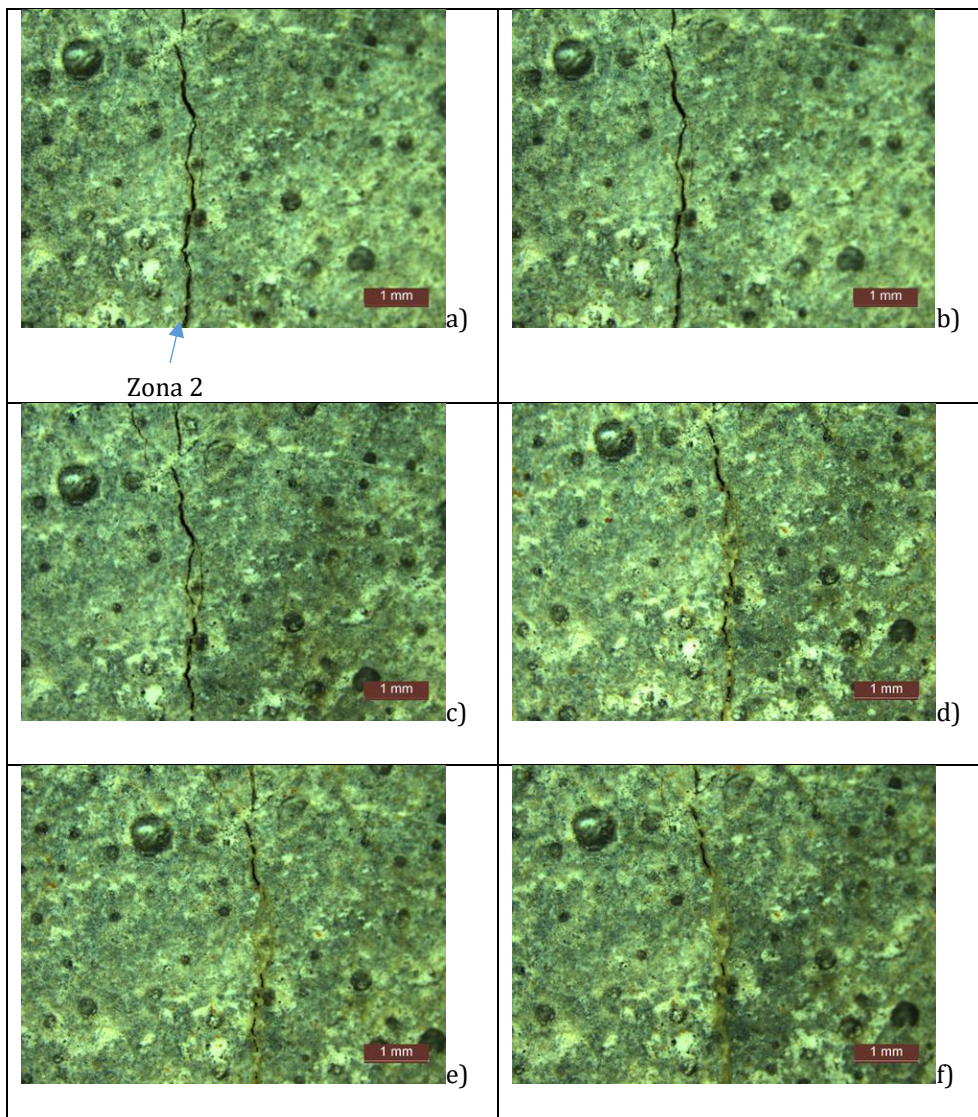


Fig. 7.4.5.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția  $TM_{nisip}$  standard (Zona 2): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.



#### Compoziția $TM_{\text{nisip standard}}$ – zona 4

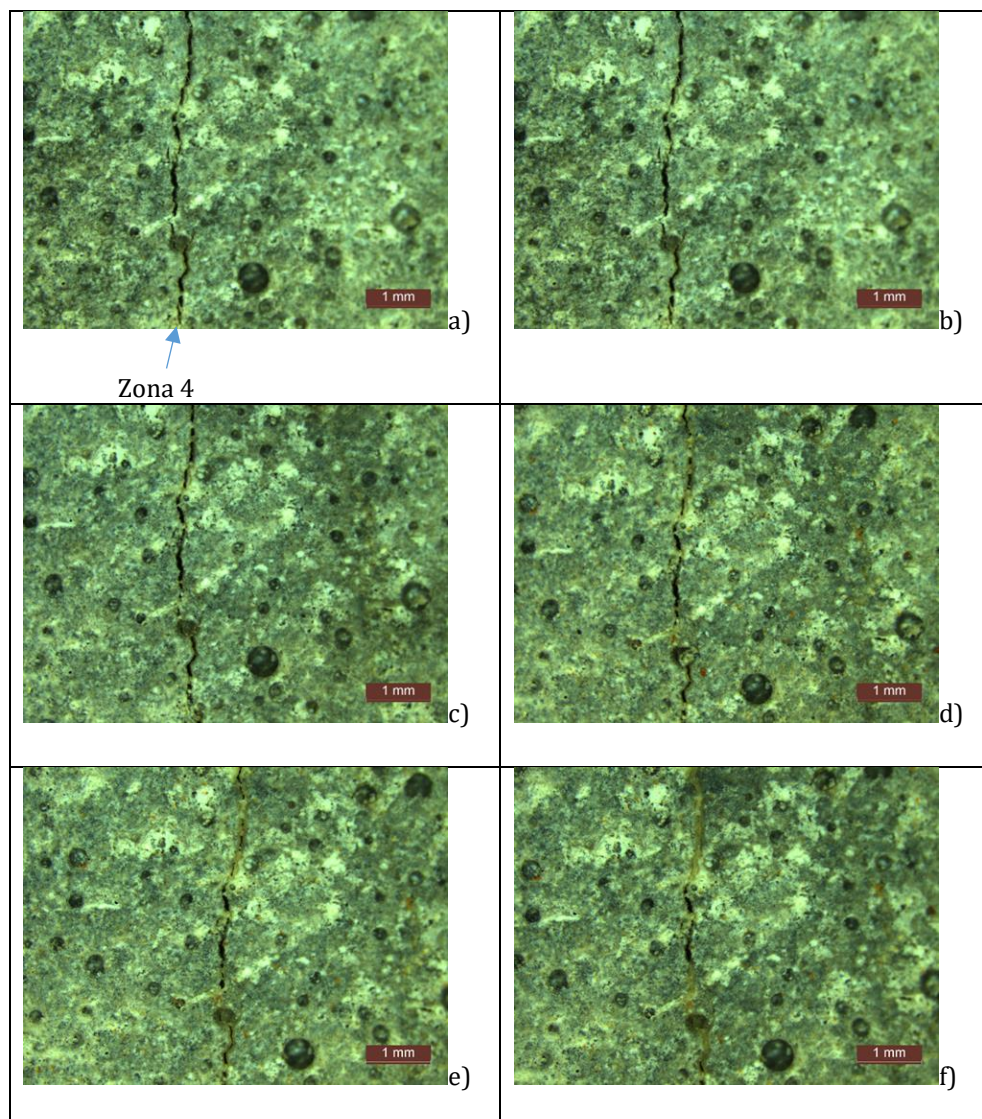


Fig. 7.4.5.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția  $TM_{\text{nisip standard}}$  (Zona 4): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

## Compoziția $TM_{nisip}$ standard – zona 11

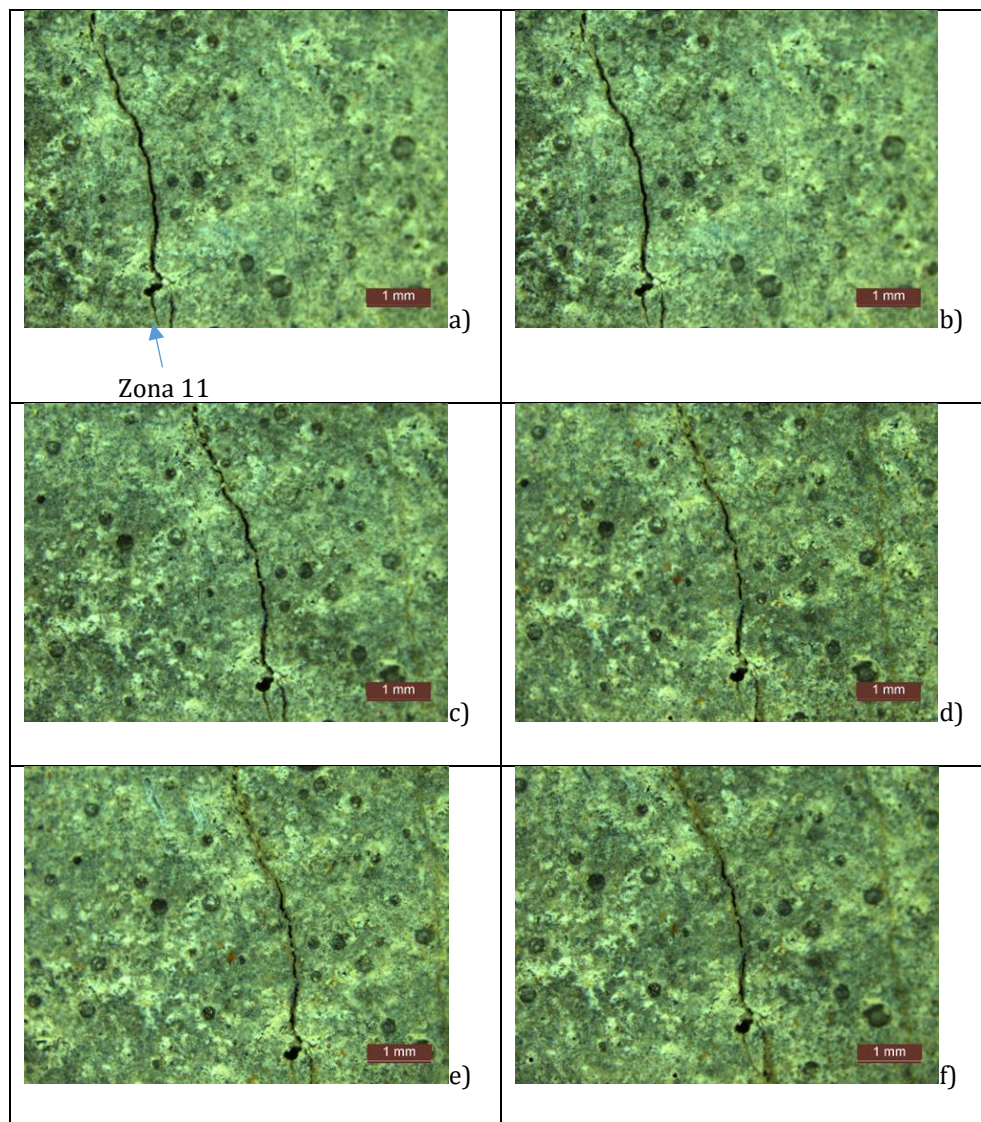


Fig. 7.4.5.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția  $TM_{nisip}$  standard (Zona 11): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

#### 7.4.6. Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T4

Pentru compoziția T4 în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării la 24 ore, la 92 ore, la 192 ore, la 336 ore și la 480 ore, suprafața prisme a fost împărțită în 16 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 6 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 8 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 10 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 11 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 12 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 13 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 14 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 15 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 16 cu 13 locuri de verificare;

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției T4 a fost supusă la cicluri de ud-uscăt (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

#### Zonele de evaluare 1-16

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-16, respectiv a vitezei de închidere a microfisurilor sunt prezentate în Tabelul nr. 7.4.6.

Tab. 7.4.6. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T4- Zonele de evaluare (1-16).

Caracteristica	Zona 1 - durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
$D_{av}^m (\mu m)$	45,4	41,6	36,7	6,8	3	3
$GV_f^m (\%)$	0	8,37	19,16	85,02	93,39	93,39
$D_{av}^M (\mu m)$	60	52	50	31	30	30
$GV_f^M (\%)$	0	13,33	16,67	48,33	50,00	50,00

Continuare Tab. 7.4.6.

<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	37,3	36,3	29,45	7,8	1	1
$GV_t^m$ (%)	0	2,68	21,05	79,09	97,32	97,32
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	70	70	59	51	49	22
$GV_t^M$ (%)	0	0	15,71	27,14	30,00	68,57
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	42,9	38,9	35,6	14,3	7	7
$GV_t^m$ (%)	0	9,32	17,02	66,67	83,68	83,68
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	53	47	42	30	24	24
$GV_t^M$ (%)	0	11,32	20,75	43,40	54,72	54,72
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	32,1	29,3	28,9	15,25	5	4
$GV_t^m$ (%)	0	8,72	9,97	52,34	84,42	87,54
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	46	44	44	44	41	27
$GV_t^M$ (%)	0	4,35	4,35	4,35	10,87	41,30
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	29,7	24,7	23,5	3,4	0	-
$GV_t^m$ (%)	0	16,84	20,88	88,55	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	48	46	44	30	0	-
$GV_t^M$ (%)	0	4,17	8,33	37,50	100	-
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	38,1	37,4	36,8	10,8	7	7
$GV_t^m$ (%)	0	1,84	3,41	71,65	81,63	81,63
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	52	52	51	48	48	30
$GV_t^M$ (%)	0	0	1,92	7,69	7,69	42,31
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	22,1	21,6	21	6	0	-
$GV_t^m$ (%)	0	2,26	4,98	72,85	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	42	38	34	30	0	-
$GV_t^M$ (%)	0	9,52	19,05	28,57	100	-
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	41,2	40,5	39,7	13,9	9	7
$GV_t^m$ (%)	0	1,70	3,64	66,26	78,16	83,01
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	57	43	43	43	33	29
$GV_t^M$ (%)	0	24,56	24,56	24,56	42,11	49,12
<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	22,4	11,4	10,3	3	2	0
$GV_t^m$ (%)	0	49,11	54,02	86,61	91,07	100
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	24	18	18	18	17	0
$GV_t^M$ (%)	0	25,00	25,00	25,00	29,17	100
<b>Zona 10</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	31,5	13,7	11,4	5	3	0
$GV_t^m$ (%)	0	56,51	63,81	84,13	90,48	100
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	36	36	30	24	24	0

Continuare Tab. 7.4.6.

$GV_f^M(\%)$	0	0	16,67	33,33	33,33	100
<b>Zona 11</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	22,7	21,2	17,7	9	7	2
$GV_f^m(\%)$	0	6,61	22,03	60,35	69,16	91,19
$D_{av}^M(\mu m)$	26	24	22	18	18	10
$GV_f^M(\%)$	0	7,69	15,38	30,77	30,77	61,54
<b>Zona 12</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	35,7	32,79	30,5	16	10	10
$GV_f^m(\%)$	0	8,15	14,57	55,18	71,99	71,99
$D_{av}^M(\mu m)$	44	41	36	27	24	24
$GV_f^M(\%)$	0	6,82	18,18	38,64	45,45	45,45
<b>Zona 13</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	15	5,9	4	0	-	-
$GV_f^m(\%)$	0	60,67	73,33	100	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	20	20	10	0	-	-
$GV_f^M(\%)$	0	0	50,00	100	-	-
<b>Zona 14</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	41,2	38,9	35,8	3,9	2	0
$GV_f^m(\%)$	0	5,58	13,11	90,53	95,15	100
$D_{av}^M(\mu m)$	78	75	47	19	17	0
$GV_f^M(\%)$	0	3,85	39,74	75,64	78,21	100
<b>Zona 15</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	30,2	30,1	28,5	2,5	2	0
$GV_f^m(\%)$	0	0,33	5,63	91,72	93,38	100
$D_{av}^M(\mu m)$	45	44	44	25	25	0
$GV_f^M(\%)$	0	2,22	2,22	44,44	44,44	100
<b>Zona 16</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	30,6	27,3	18,6	12	7	3
$GV_f^m(\%)$	0	10,78	39,22	60,78	77,12	90,20
$D_{av}^M(\mu m)$	39	31	30	29	18	18
$GV_f^M(\%)$	0	20,51	23,08	25,64	53,85	53,85

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.6.1., Fig. 7.4.6.2., Fig. 7.4.6.3., Fig. 7.4.6.4.

Rezultatele sunt prezentate cumulativ pentru toate zonele analizate pe epruveta cu compoziție proiectată T4.

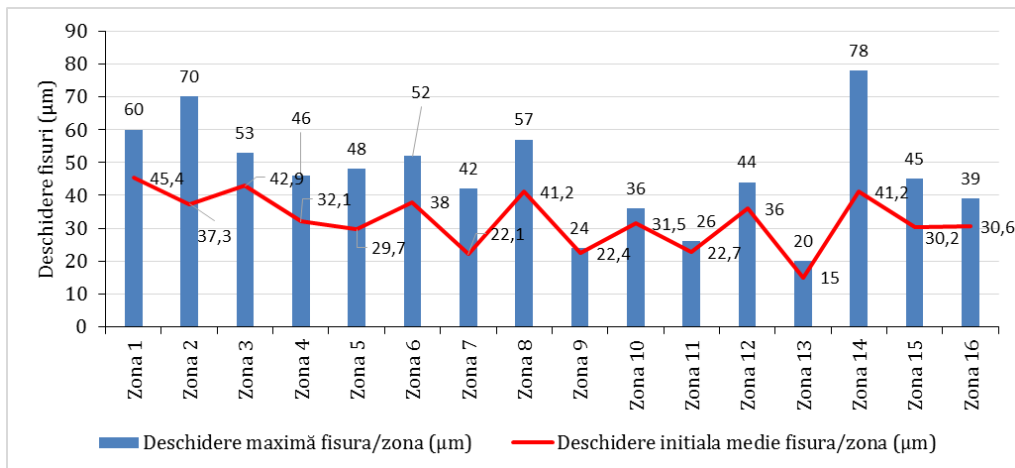


Fig. 7.4.6.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția T4

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama ciclurilor de condiționare ud-uscă, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 78 µm la 20 µm. În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 45,4 µm la 15 µm, Fig. 7.4.6.1..
- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_t^M$ ) este reprezentat în Fig. 4.7.4.6.2., se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscă (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor) atingându-se maximul de vindecare (100%), după 8 zile în cazul zonelor 14, după 14 zile în cazul zonei 5 și 7, după 20 zile în cazul zonelor 9, 10, 14 și 15, rămânând parțial deschise fisurile cu deschiderile prezentate în Tab. 7.4.6.1..

Tab. 7.4.6.1. Evoluția deschiderii fisurii rămasă parțial deschise pentru compoziția T4

Nr. zonă	Deschidere inițială fisură (µm)	Deschidere finală fisură (µm)
1	60	30
2	70	22
3	53	24
4	46	27
6	52	30
8	57	29



Continuare Tab. 7.4.6.1.

11	26	10
12	44	24
16	39	18

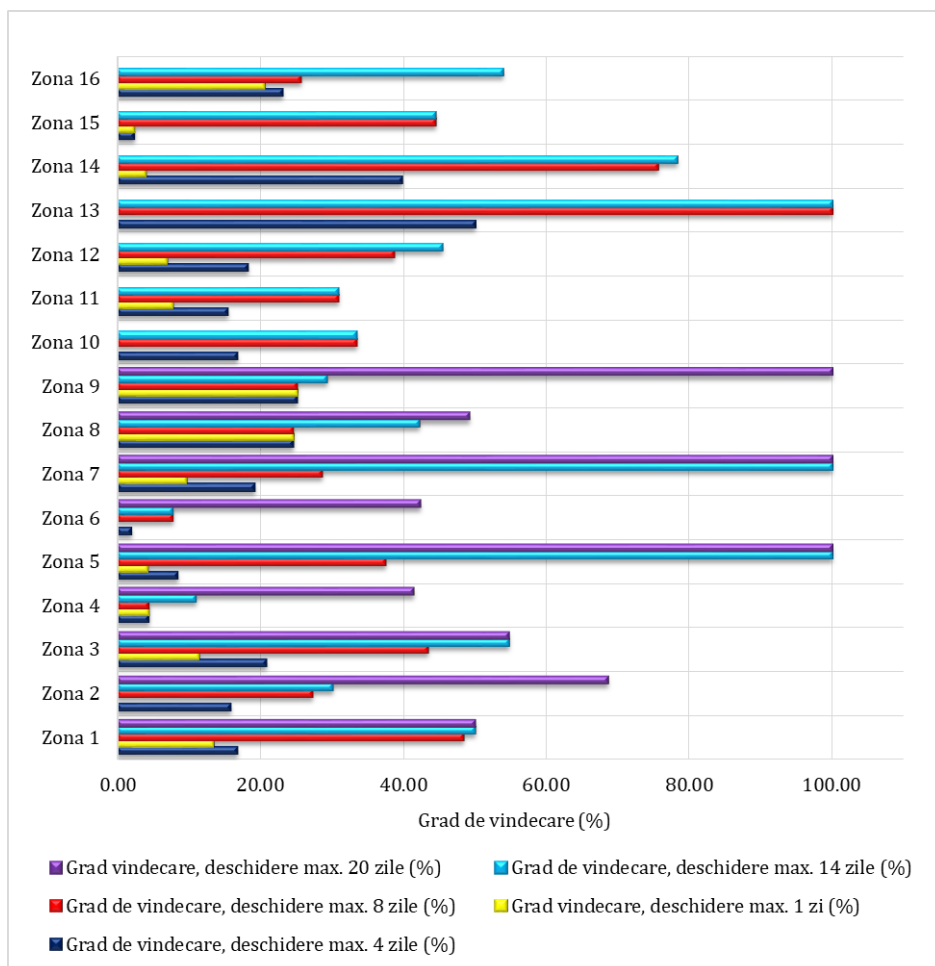


Fig. 7.4.6.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T4

- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, ( $GV_t^m$ ), este reprezentat în Fig. 7.4.6.3., se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor) atingându-se maximul de vindecare (100%), după 8 zile în cazul zonelor 14, după 14 zile în cazul zonei 5 și 7, după 20 zile în cazul zonelor 9,

10, 14 și 15, rămânând parțial deschise pentru fisurile cu gradul de vindecare mediu final deschiderile prezentate în Tab. 7.4.6.2.

Tab. 7.4.6.2. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția T4

Nr. zonă	$GV_t^m$ (%)
1	93,39
2	97,32
3	83,68
4	87,54
6	81,58
8	83,01
11	91,19
12	72,22
16	90,20

- Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare indică faptul că, în primele zile de condiționare (maxim 8 zile) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, Fig. 7.4.6.4.

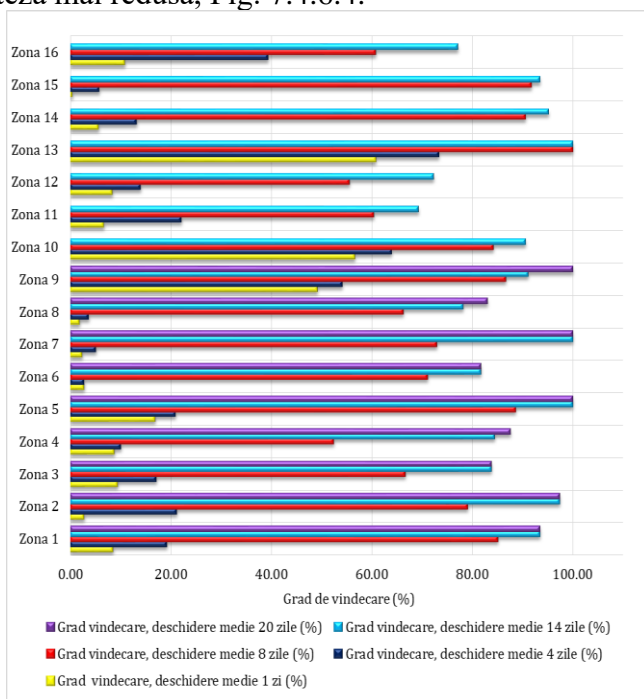


Fig.7.4.6.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T4

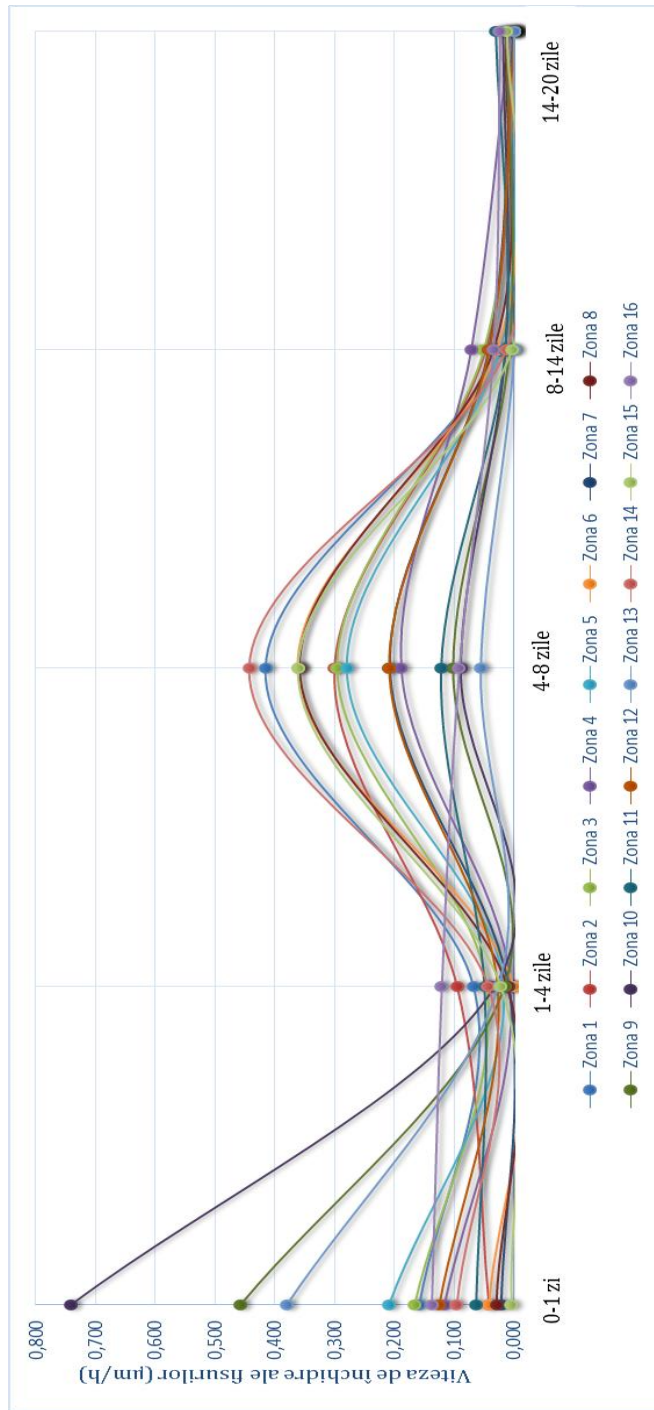


Fig.7.4.6.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția T4

**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția T4**

Compoziția T4 - zona 1 și zona 2

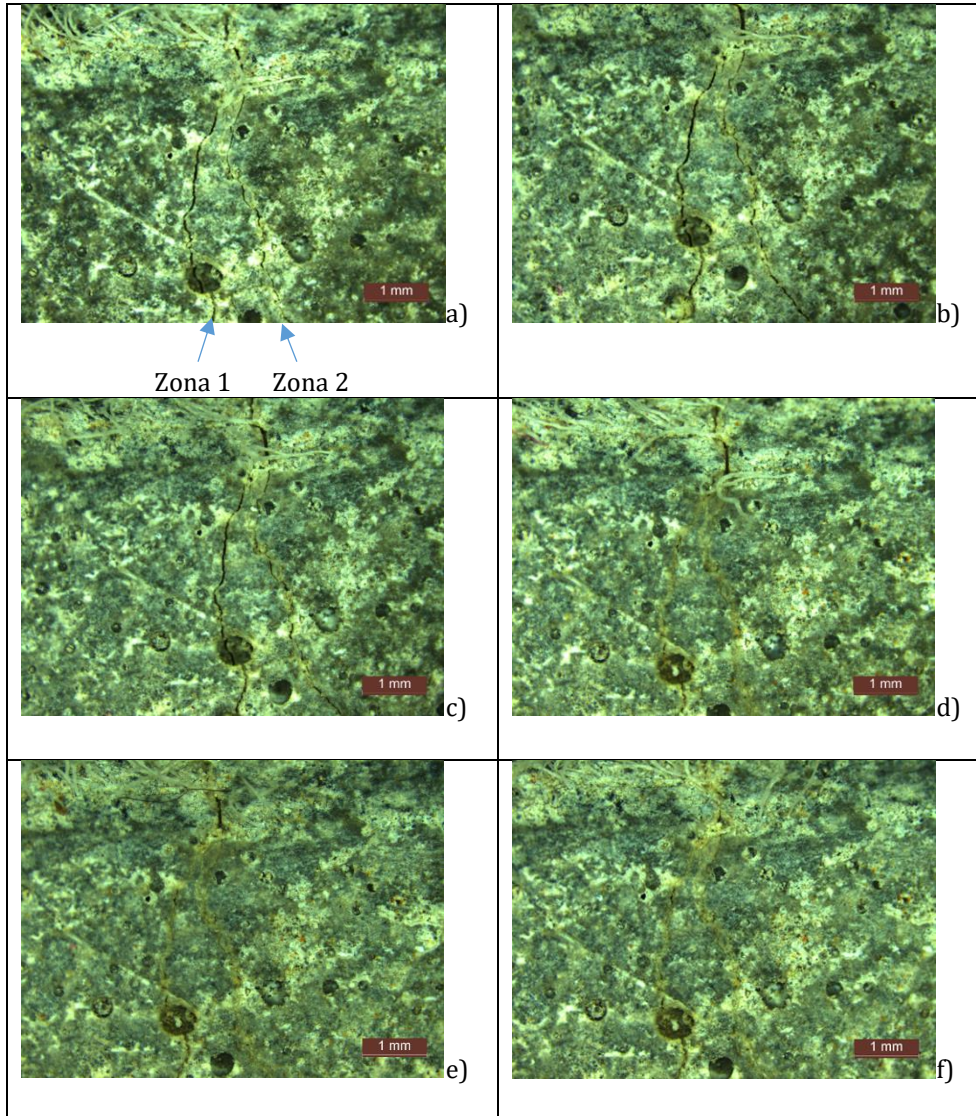


Fig. 7.4.6.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 1 și Zona 2): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisura după 20 zile condiționare.



### Compoziția T4 – zona 3 și zona 4

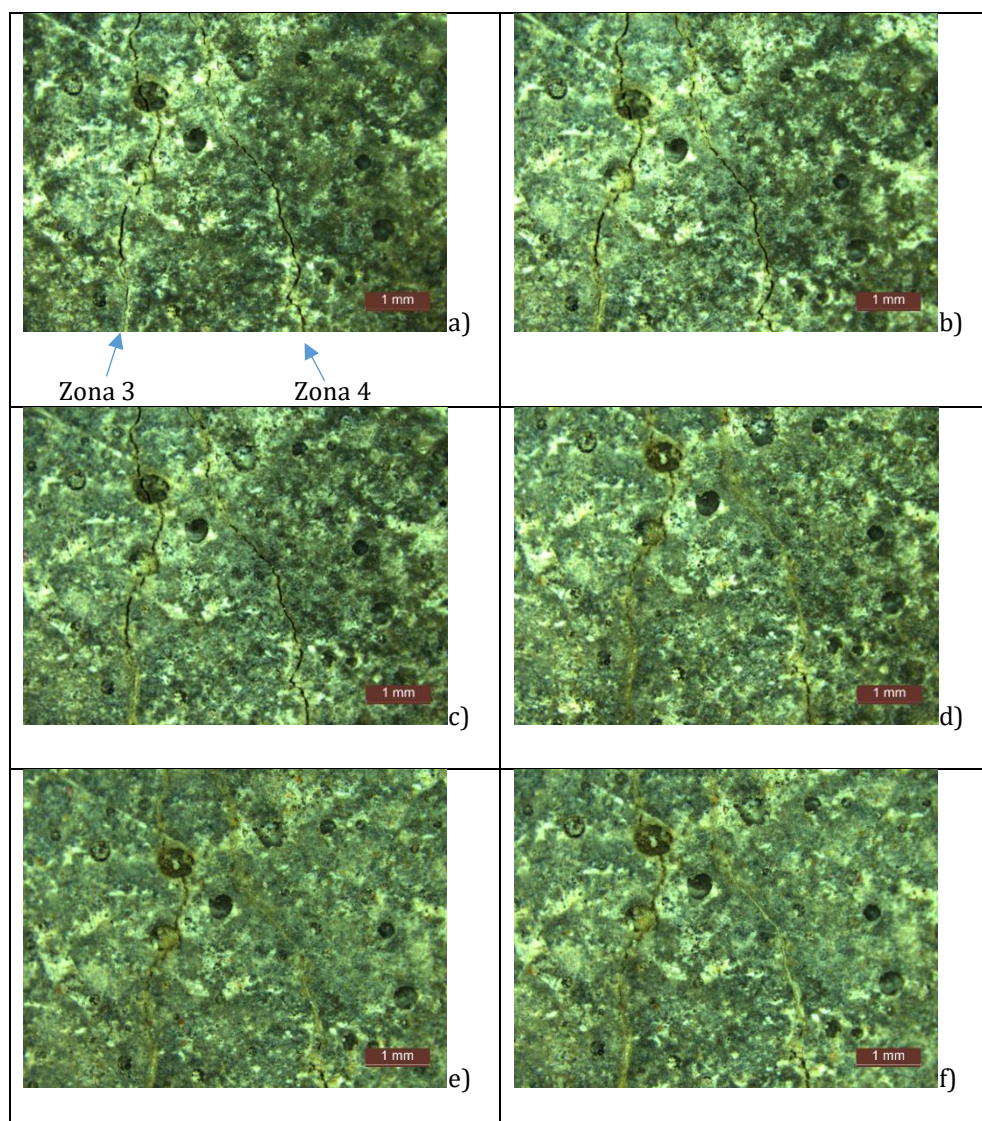


Fig. 7.4.6.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 3 și Zona 4): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

Compoziția T4 – zona 5 și zona 6

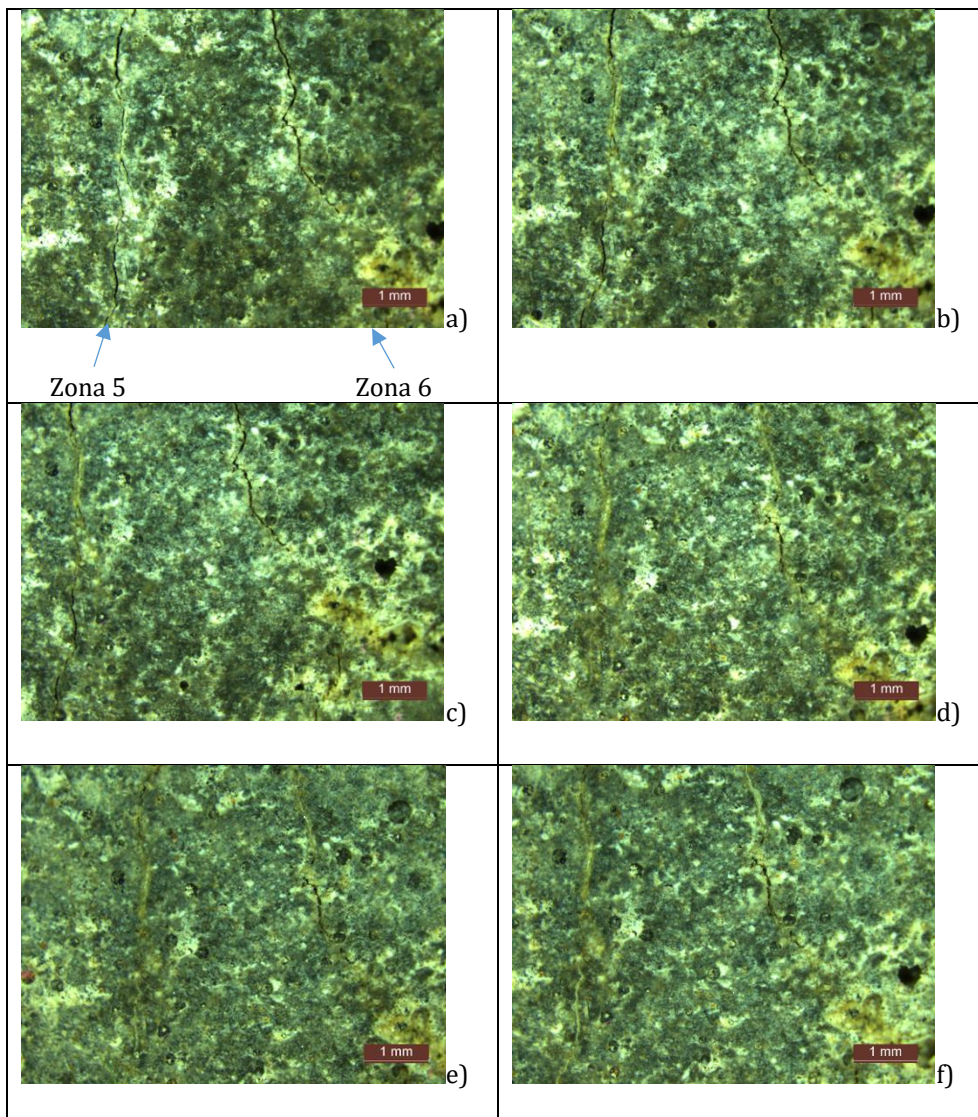


Fig. 7.4.6.7. Evoluția fenomenului de autovindecare pentru compoziția T4 (Zona 5 și Zona 6): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.



Compoziția T4 – zona 7 și zona 8

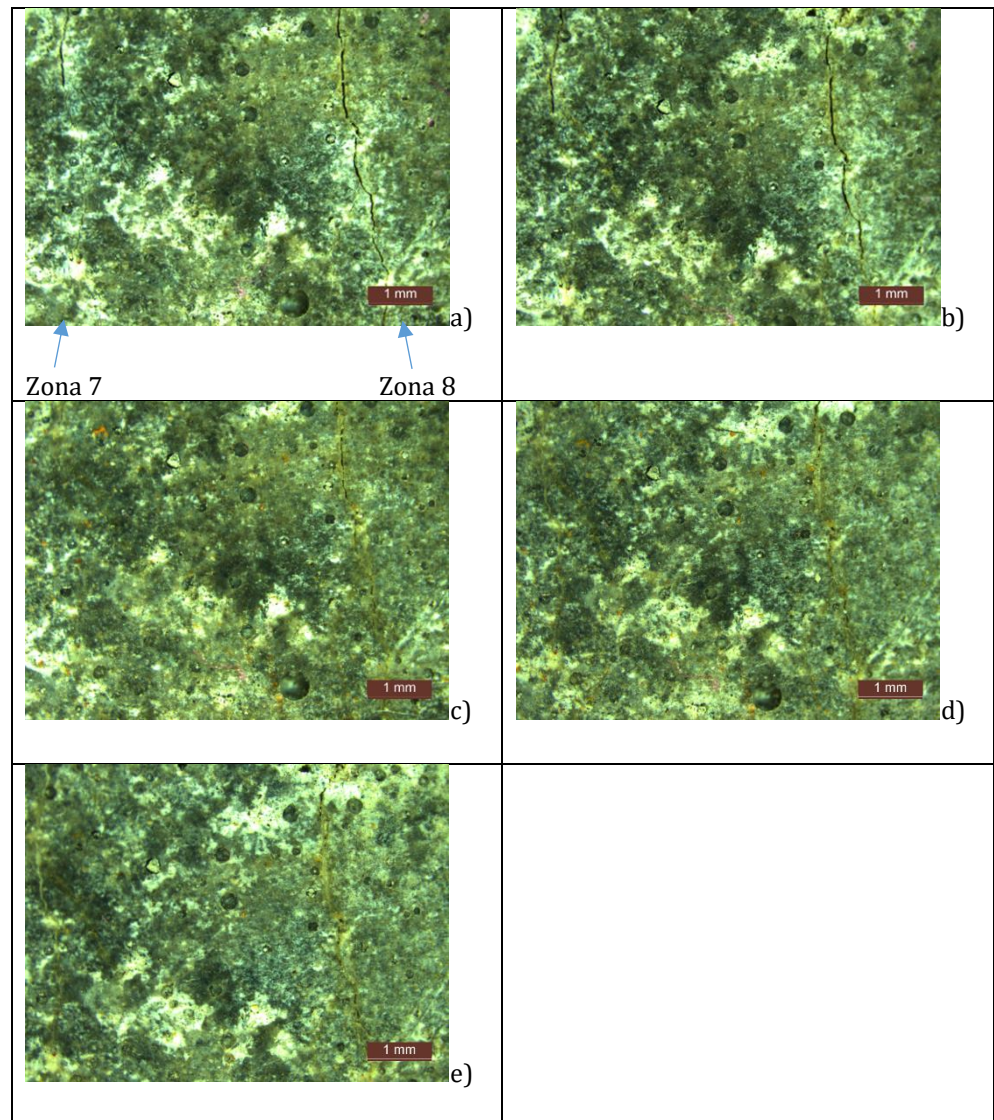


Fig. 7.4.6.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 7 și Zona 8): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

Compoziția T4 – zona 9 și zona 10

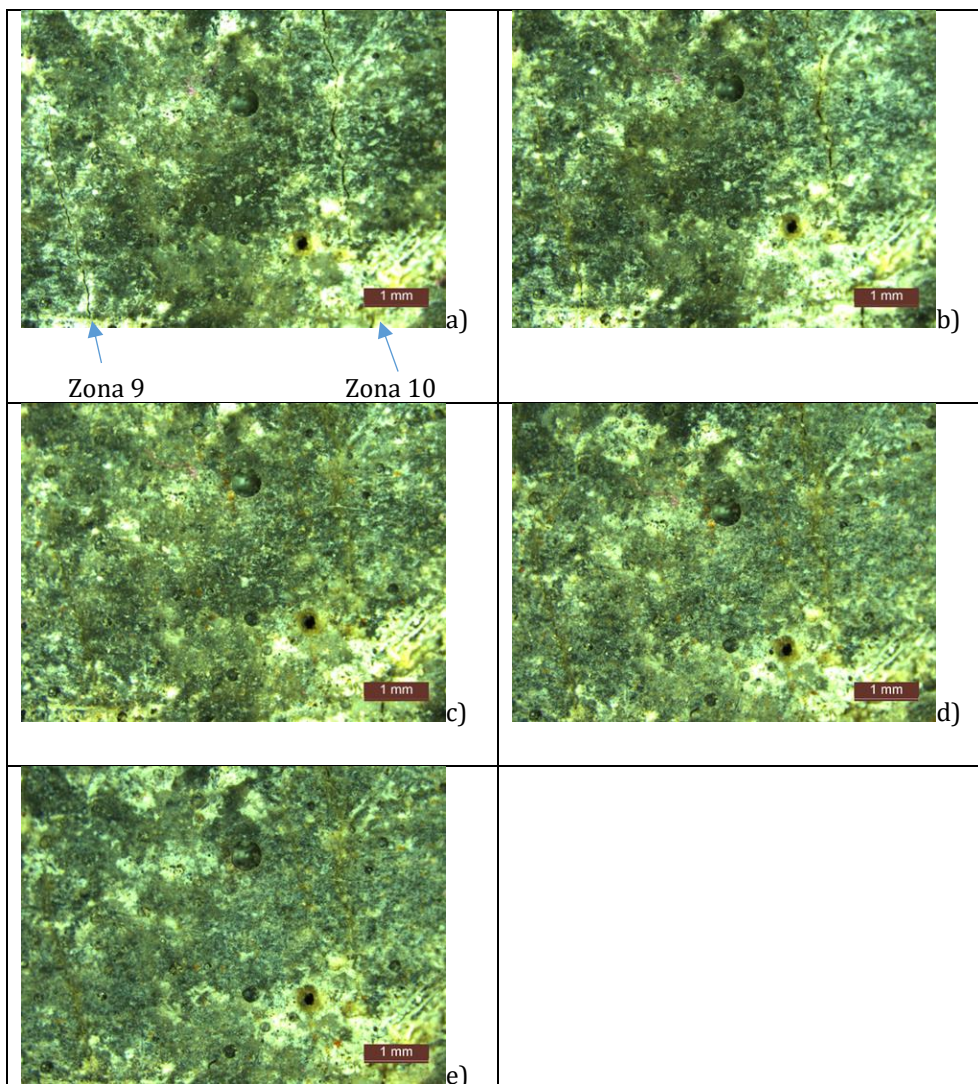


Fig. 7.4.6.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 9 și Zona 10):

- a) aspect fisură indusă;
- b) aspect fisură după 1 zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare.



### Compoziția T4 – zona 11 și zona 12

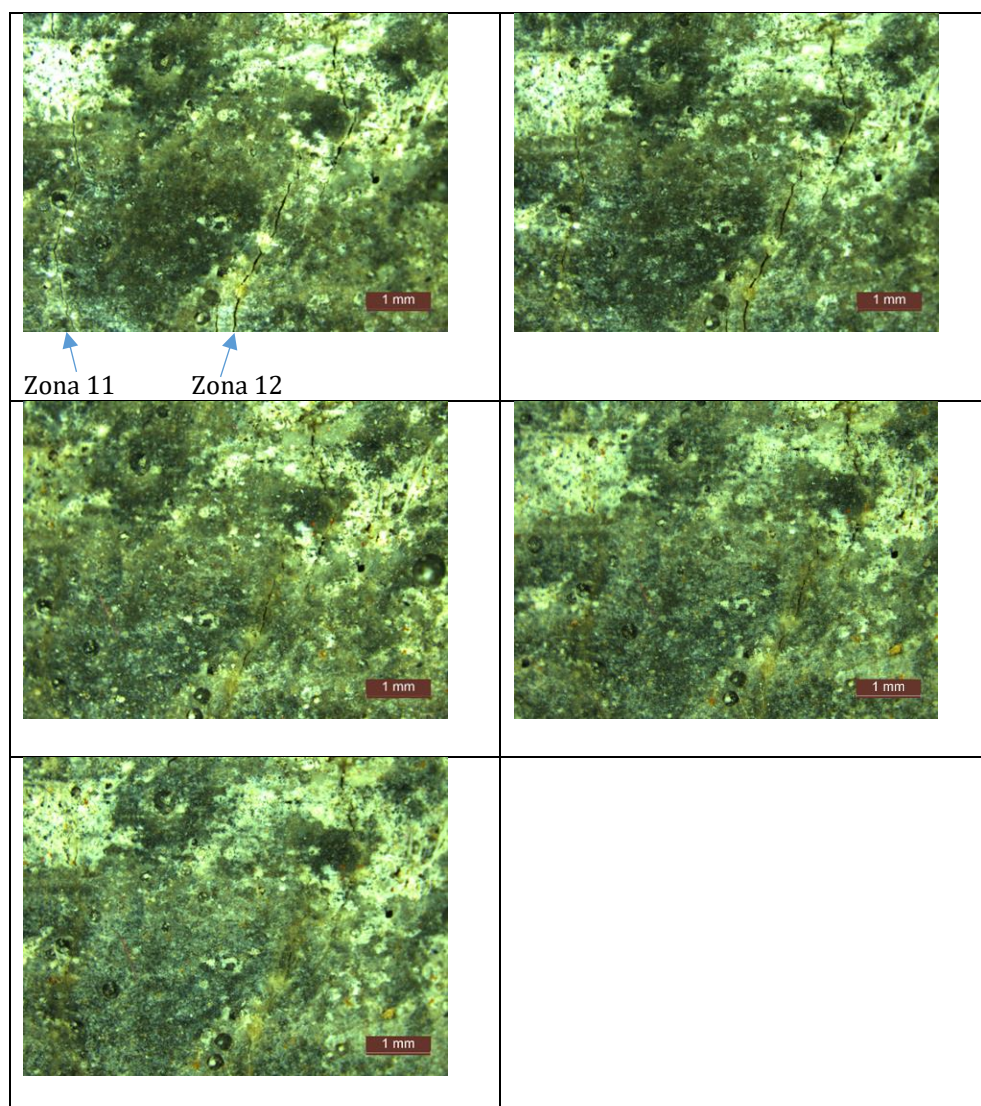


Fig. 7.4.6.10. Evoluția fenomenului de autovindecare pentru compoziția T4 (Zona 11 și Zona 12): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

## Compoziția T4 – zona 13 și zona 14

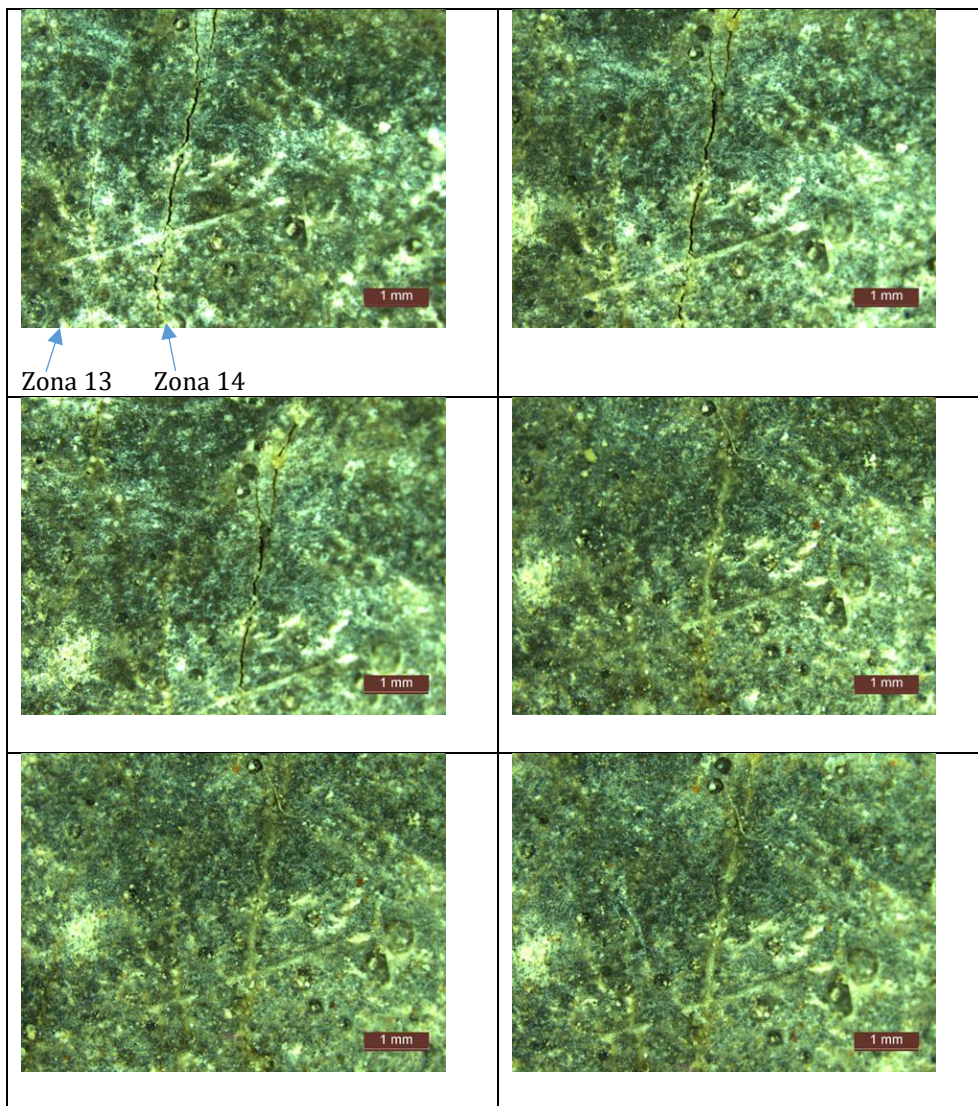


Fig. 7.4.6.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 13 și Zona 14):

- a). aspect fisură indusă;
- b) aspect fisură după 1 zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare;
- f) aspect fisura după 20 zile condiționare.



### Compoziția T4 – zona 15

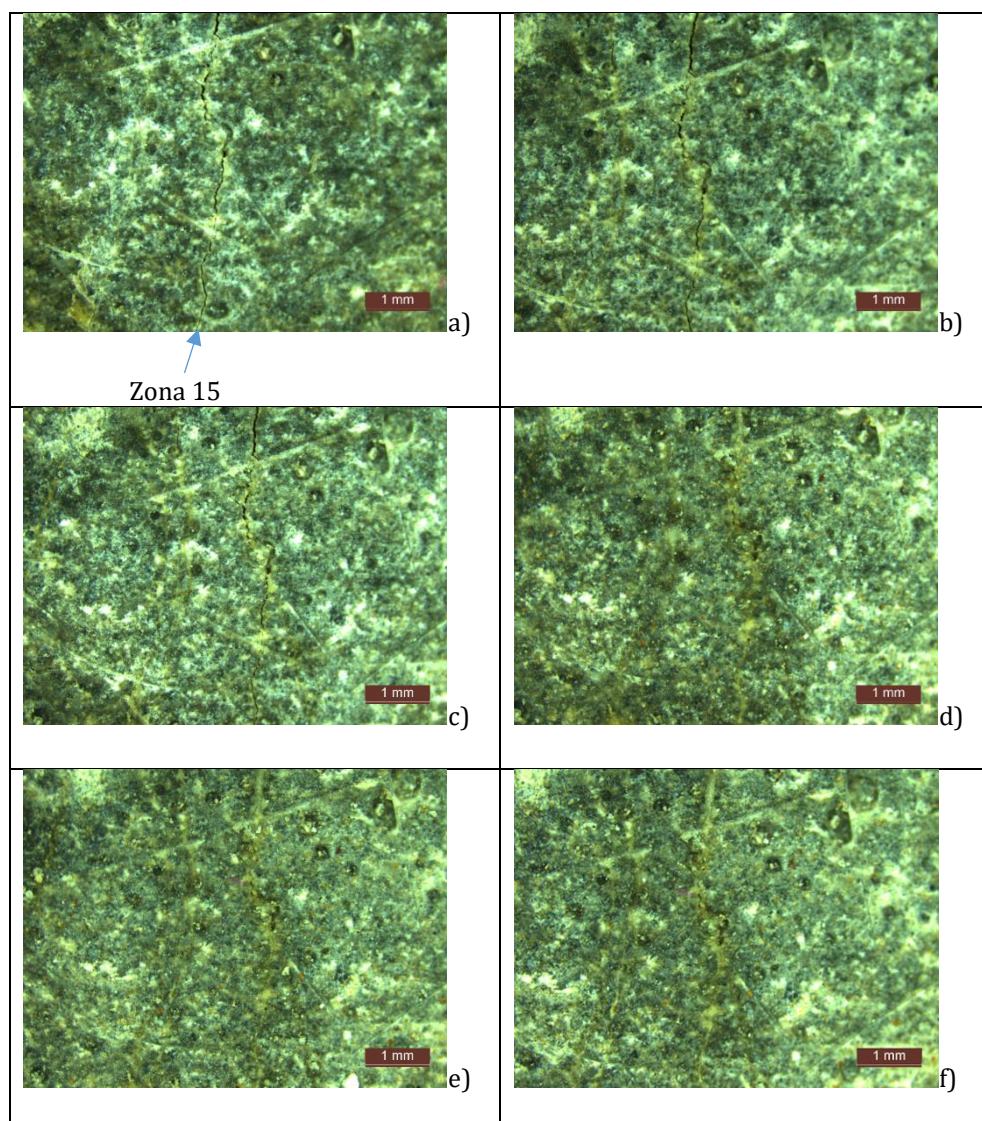


Fig. 7.4.6.12 Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 15):

- a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare;
- f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

## Compoziția T4 - zona 16

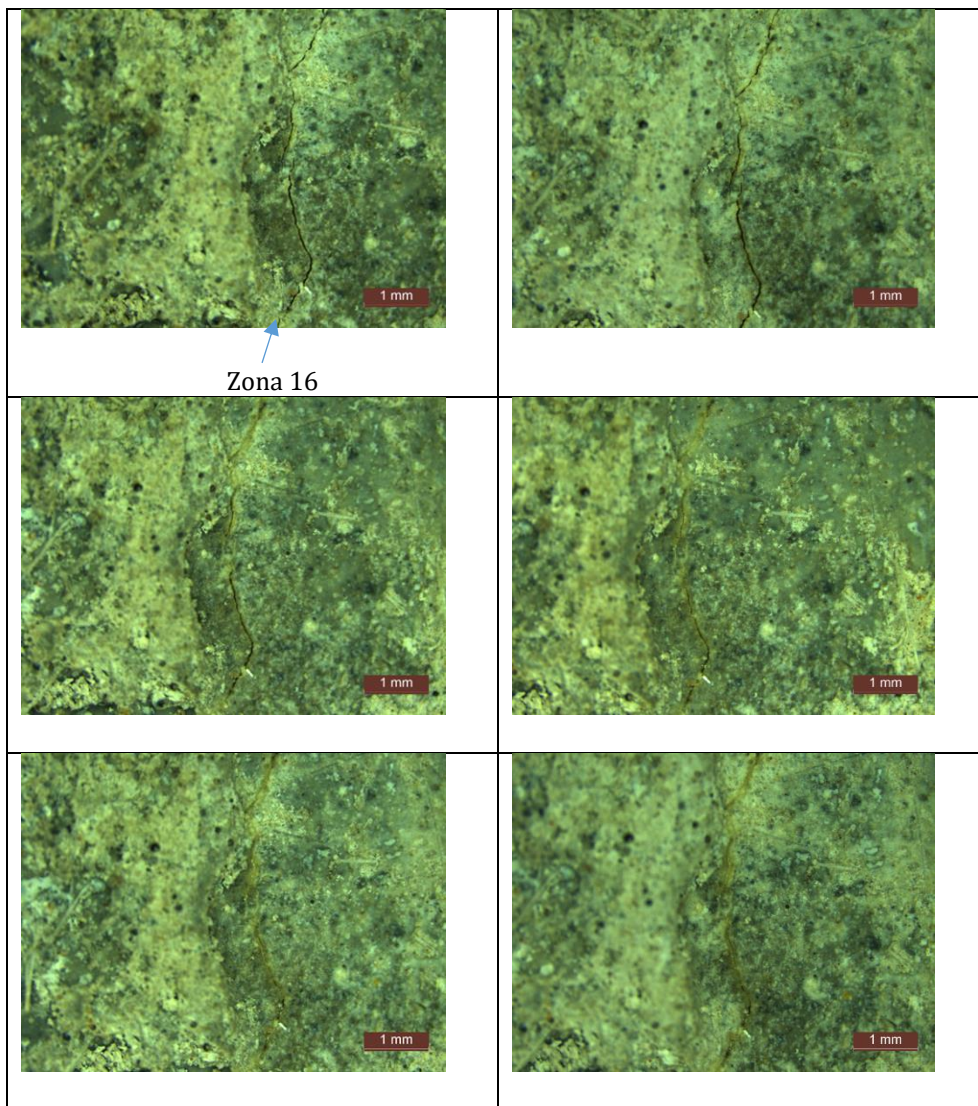


Fig. 7.4.6.13. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 16):

- a) aspect fisură indusă;
- b) aspect fisură după 1 zi condiționare;
- c) aspect fisură după 4 zile condiționare;
- d) aspect fisură după 8 zile condiționare;
- e) aspect fisură după 14 zile condiționare;
- f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

#### 7.4.7 Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T5

Pentru compoziția T5 în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării la 1 zi, la 4 zile, la 8 zile, la 14 zile și la 20 zile, suprafața prisme a fost împărțită în 15 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 16 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 16 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 6 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 9 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 16 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 10 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 11 cu 9 locuri de verificare;
- Zona 12 cu 11 locuri de verificare;
- Zona 13 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 14 cu 16 locuri de verificare;
- Zona 15 cu 15 locuri de verificare;

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției T5 a fost supusă la cicluri de ud-uscat (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

#### Zonele de evaluare 1-15

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-15, respectiv a vitezei de închidere a microfisurilor sunt prezentate în Tabelul nr. 7.4.7.

Tab. 7.4.7. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T5- Zonele de evaluare (1-15).

Caracteristica	Zona 1 - durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
$D_{av}^m (\mu m)$	75,1	75	57,9	46,5	13,8	13,7
$GV_t^m (\%)$	0	0,13	22,90	38,08	81,62	81,76
$D_{av}^M (\mu m)$	140	140	140	84	81	81
$GV_t^M (\%)$	0	0	0	40,00	42,14	42,14

Continuare Tab. 7.4.7.

<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	47,9	47,7	31,5	13,1	3	0
$GV_t^m$ (%)	0	0,42	34,24	72,65	93,74	100
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	74	74	59	44	22	0
$GV_t^M$ (%)	0	0	20,27	40,54	70,27	100
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	21,4	8,7	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	59,35	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	25	22	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	12,00	100	-	-	-
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	37,06	33	11,3	10,5	3,8	3,4
$GV_t^m$ (%)	0	10,96	69,51	71,67	89,75	90,83
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	54	52	50	50	32	27
$GV_t^M$ (%)	0	3,70	7,41	7,41	40,74	50,00
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	26,2	25,3	2	1	0	-
$GV_t^m$ (%)	0	3,44	92,37	96,18	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	37	37	16	16	0	-
$GV_t^M$ (%)	0	0,00	56,76	56,76	100	-
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	18,65	16,94	1	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	9,17	94,64	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	25	23	9	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	8,00	64,00	100	-	-
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	16	6	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	0	62,50	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	19	15	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	0	21,05	100	-	-	-
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	69,4	68,9	51,7	39	34	28
$GV_t^m$ (%)	0	0,72	25,50	43,80	51,01	59,65
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	109	104	102	92	89	84
$GV_t^M$ (%)	0	4,59	6,42	15,60	18,35	22,94
<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	37,8	36,9	36	17	9	2
$GV_t^m$ (%)	0	2,38	4,76	55,03	76,19	94,71
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	50	50	50	40	39	29
$GV_t^M$ (%)	0	0,00	0,00	20,00	22,00	42,00
<b>Zona 10</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	23	23	22	9	0	-
$GV_t^m$ (%)	0	0,00	4,35	60,87	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	31	31	30	18	0	-

Continuare Tab. 7.4.7.

$GV_f^M(\%)$	0	0	3,23	41,94	100	-
<b>Zona 11</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	36,4	36,3	35,9	7	4	2
$GV_f^m(\%)$	0	0,27	1,37	80,77	89,01	94,51
$D_{av}^M(\mu m)$	37	37	37	20	18	17
$GV_f^M(\%)$	0	0	0	45,95	51,35	54,05
<b>Zona 12</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	39	38,8	38,7	11	11	11
$GV_f^m(\%)$	0	0,26	0,51	71,72	71,72	71,72
$D_{av}^M(\mu m)$	65	65	65	39	39	39
$GV_f^M(\%)$	0	0	0	40,00	40,00	40,00
<b>Zona 13</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	57,5	57,3	52,5	31,7	29,7	13,4
$GV_f^m(\%)$	0	0,35	8,70	44,87	48,35	76,70
$D_{av}^M(\mu m)$	72	72	72	59	59	46
$GV_f^M(\%)$	0	0	0	18,06	18,06	36,11
<b>Zona 14</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	66,3	66,1	43,3	34,1	25,8	10,8
$GV_f^m(\%)$	0	0,30	34,69	48,57	61,09	83,71
$D_{av}^M(\mu m)$	95	95	76	71	63	63
$GV_f^M(\%)$	0	0	20,00	25,26	33,68	33,68
<b>Zona 15</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	66,8	66,1	52,7	37,4	23,1	22,8
$GV_f^m(\%)$	0	1,05	21,11	44,01	65,42	65,87
$D_{av}^M(\mu m)$	72	72	72	63	63	51
$GV_f^M(\%)$	0	0	0	12,50	12,50	29,17

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.7.1., Fig. 7.4.7.2., Fig. 7.4.7.3. și Fig. 7.4.7.4.

Rezultatele sunt prezentate cumulativ pentru toate zonele analizate pe epruveta cu compoziție proiectată T5.

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama ciclurilor de condiționare ud-uscat, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 140  $\mu m$  la 19  $\mu m$  . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la o valoare inițială de 75,1  $\mu m$  la 16  $\mu m$ , Fig. 7.4.7.1..



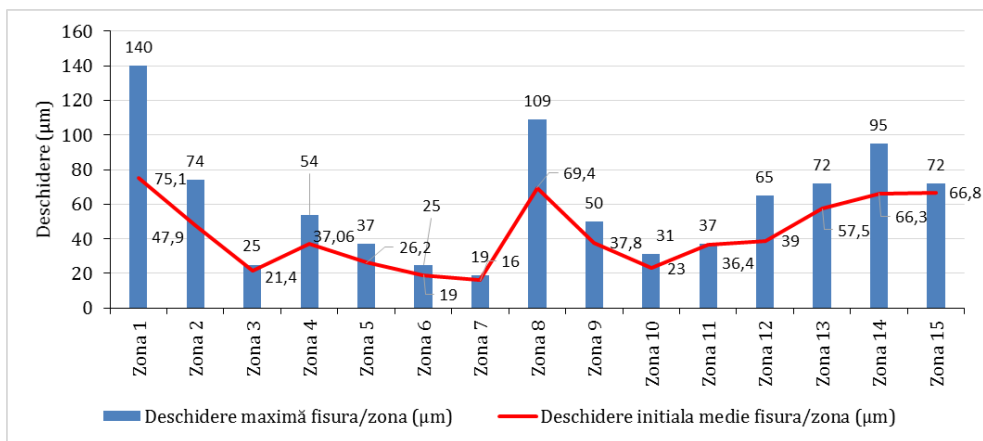


Fig. 7.4.7.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția proiectată T5

- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_t^M$ ) este reprezentat în Fig. 7.4.7.2., și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscă (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 8 zile în cazul zonelor 14, după 14 zile în cazul zonei 5 și 7, după 20 zile în cazul zonelor 9, 10, 14 și 15, rămânând parțial deschise fisurile cu deschiderile prezentate în Tab. 7.4.7.1..

Tab. 7.4.7.1. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția proiectată T5

Nr. zonă	Deschidere inițială fisură (µm)	Deschidere finală fisură (µm)
1	140	80
4	54	27
8	109	84
9	50	29
11	37	17
12	65	39
13	72	46
14	95	63
15	72	51

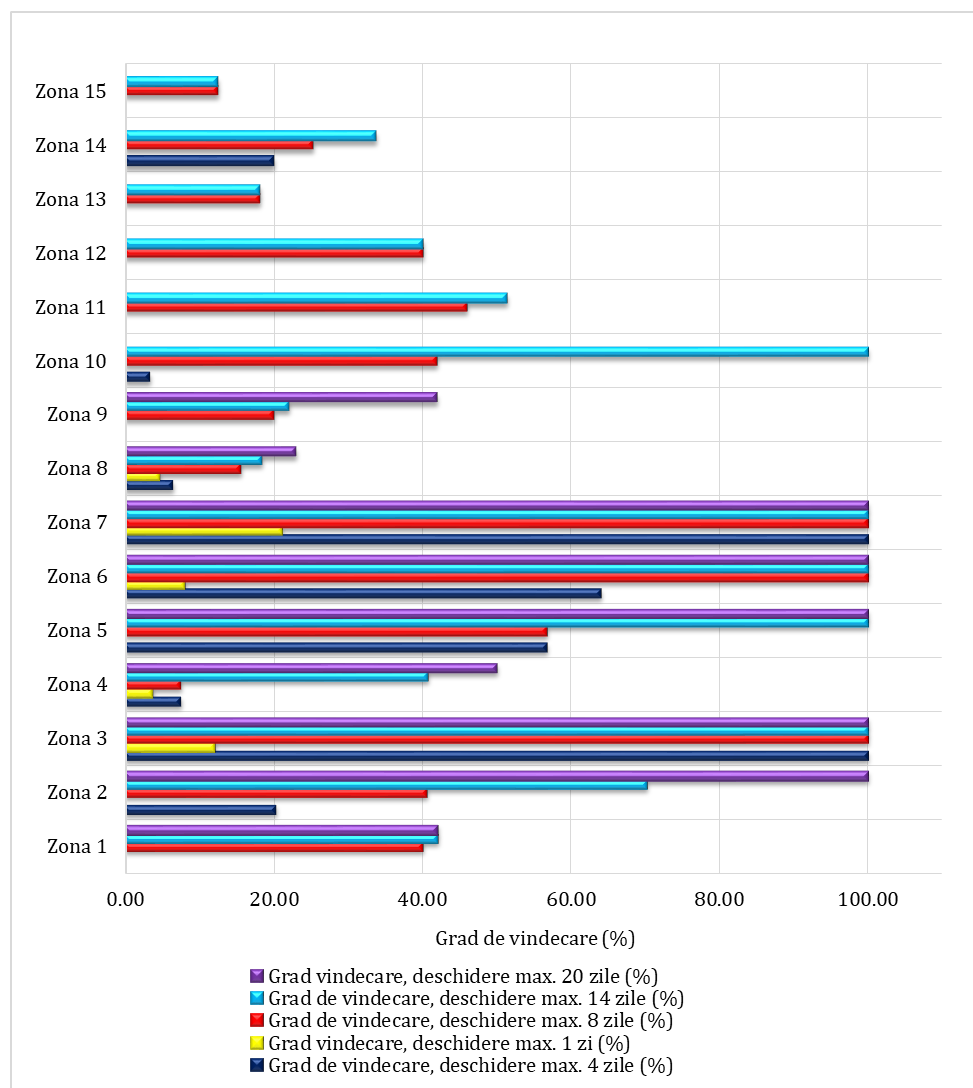


Fig. 7.4.7.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T5

- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, ( $GV_t^m$ ), este reprezentat în Fig. 7.4.7.3., și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscat (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 4 zile în cazul zonelor 3 și 7, după 8 zile în cazul zonei 6, după 14 zile în cazul zonei 10, rămânând parțial deschise fisurile cu gradul de vindecare mediu final prezentate în Tab. 7.4.7.2.

Tab. 7.4.7.2. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția proiectată T5

Nr. zonă	$GV_t^m$ (%)
1	81,76
4	90,83
8	59,65
9	94,71
11	94,51
12	71,79
13	76,70
14	83,71
15	65,87

- Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare și indică faptul că, în primele zile de condiționare (4 - 8 zile) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, Fig.7.4.7.4. Excepție de la această constatare se observă doar în cazul indicatorului calculat pentru Zonelor 1, 4, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15. Acest comportament de întârziere din punct de vedere cinetic a procesului de închidere a fisurii a fost pus pe seama deschiderilor medii ale acestor fisuri caracterizate o deschidere inițială medie cuprinsă între (36,4 – 75,1) $\mu\text{m}$ .

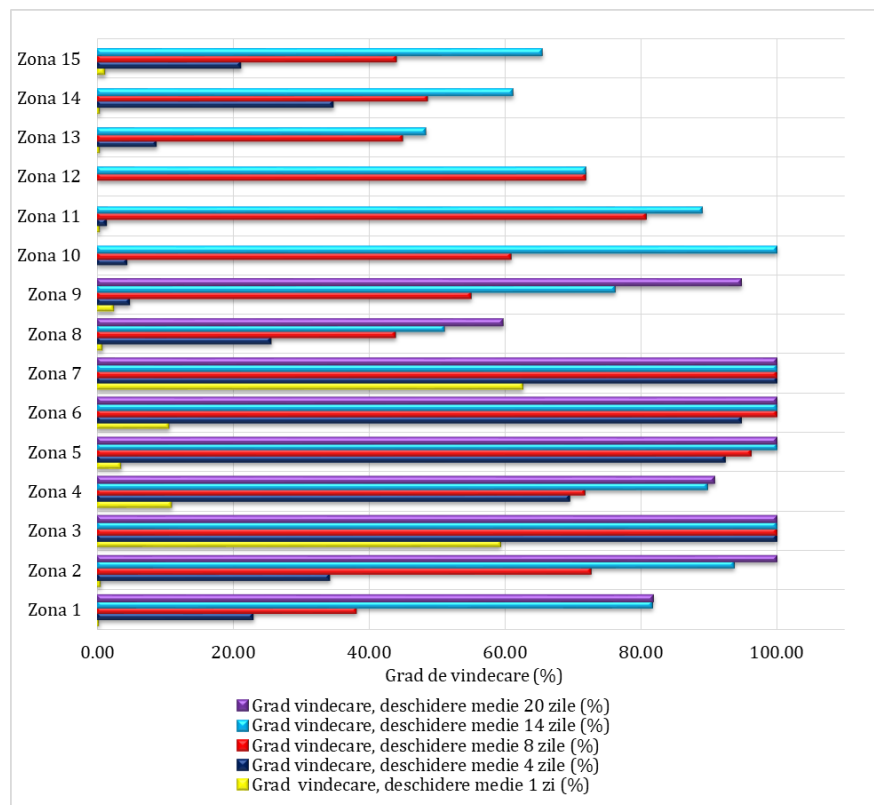


Fig. 7.4.7.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T5

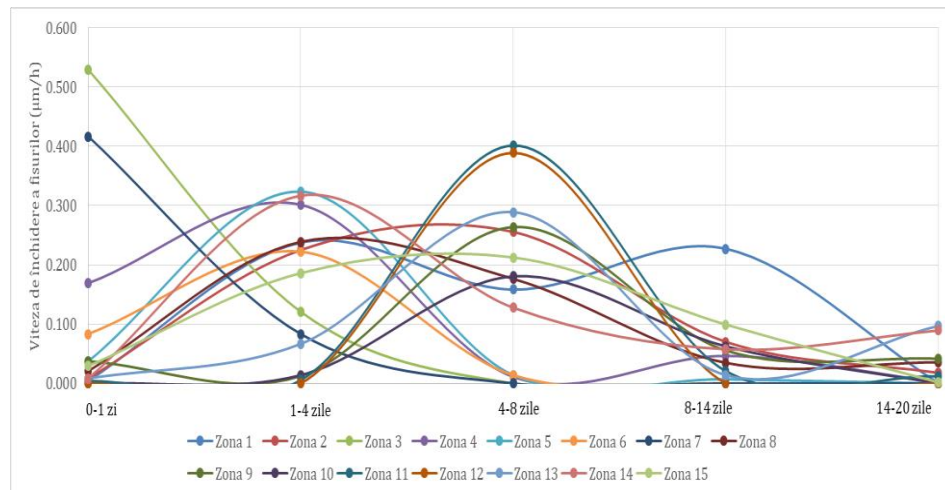


Fig. 7.4.7.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția proiectată T5

**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția T5**

Compoziția T5 - zona 1

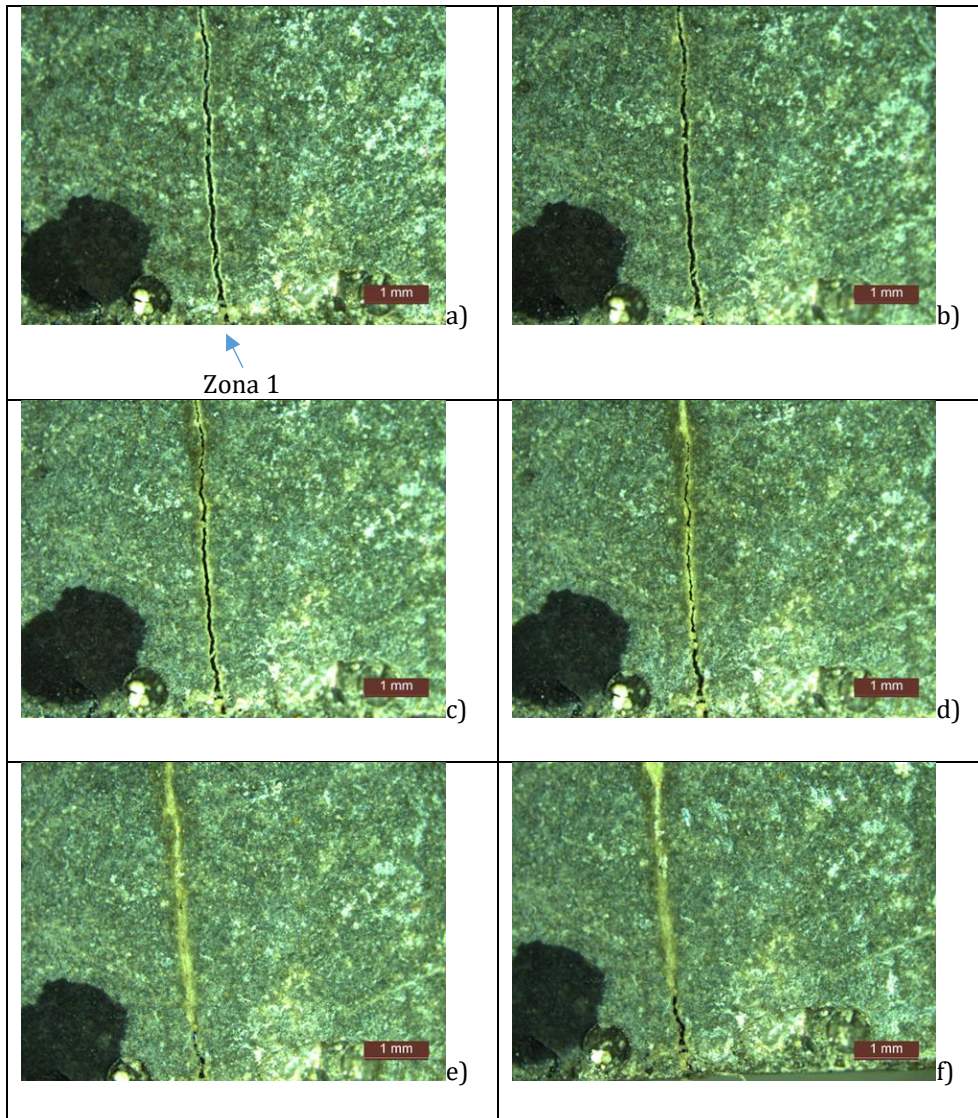


Fig. 7.4.7.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 1): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.



## Compoziția T5 – zona 2

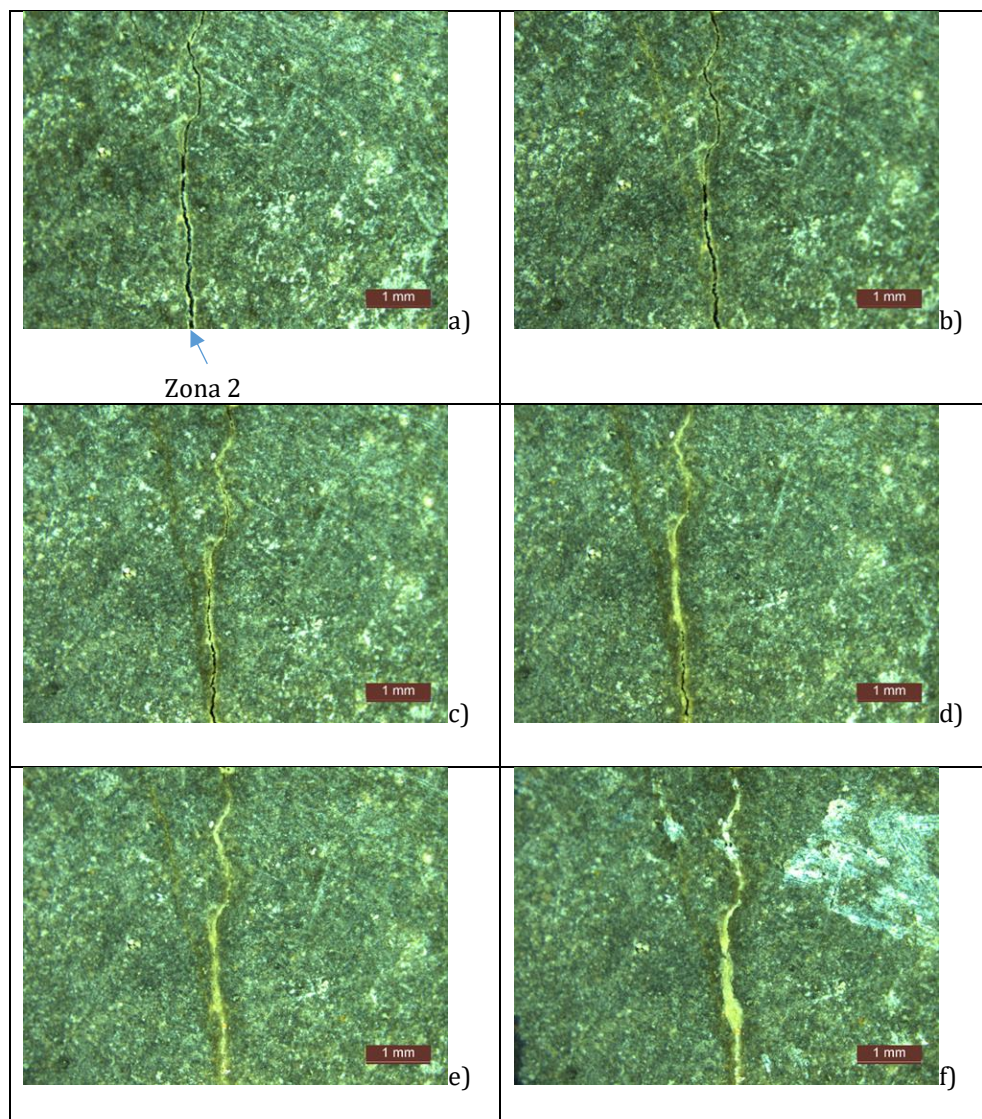


Fig. 7.4.7.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 2): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

## Compoziția T5 – zona 3 și zona 4

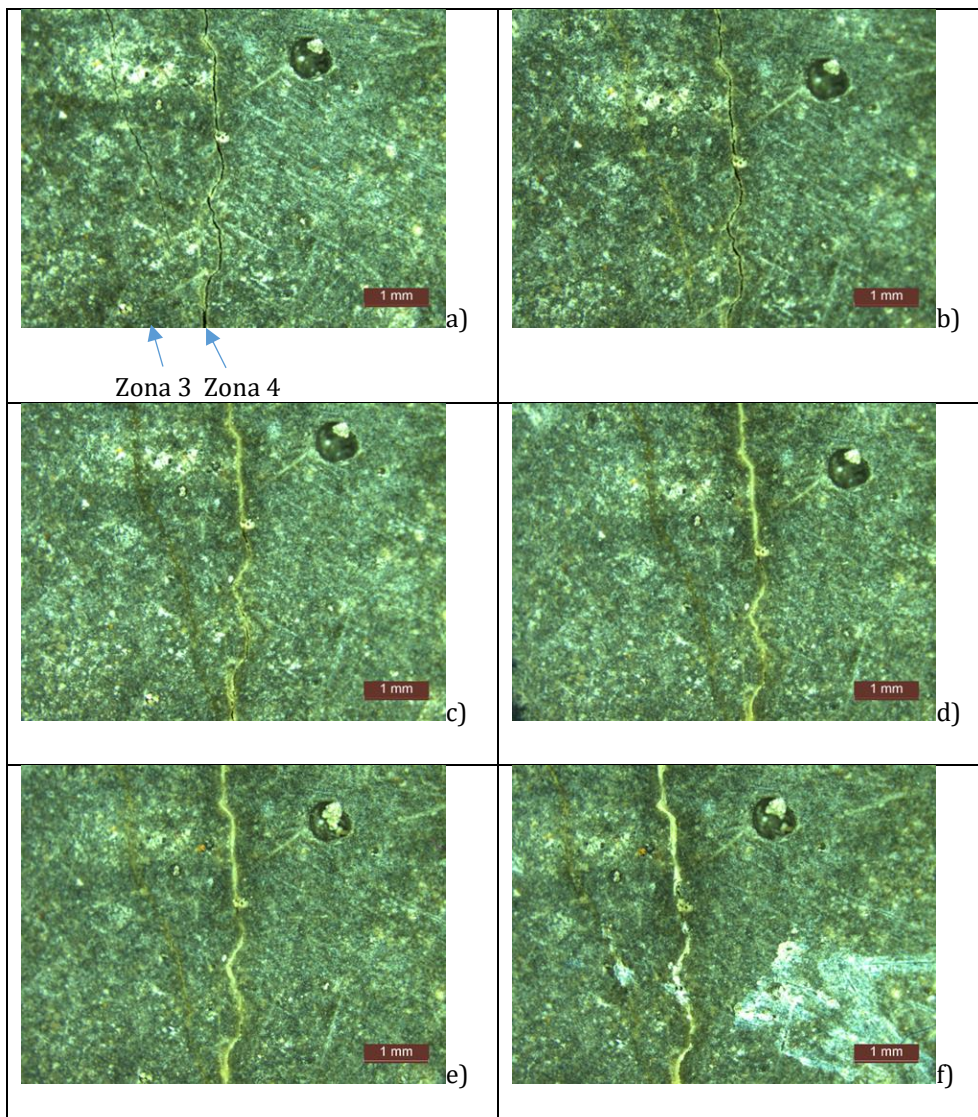


Fig. 7.4.7.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 3 și Zona 4): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.



Compoziția T5 – zona 5

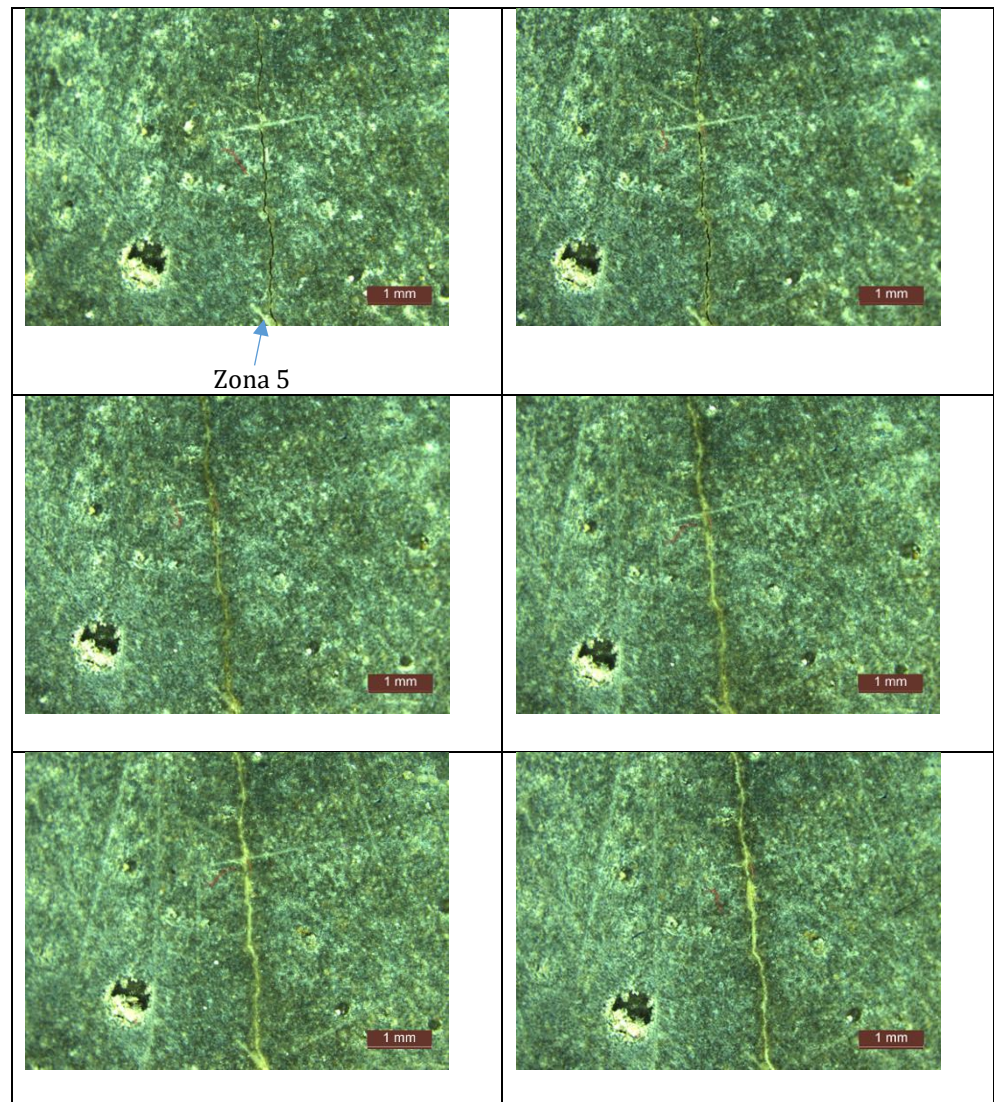


Fig. 7.4.7.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 5): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură după 20 zile condiționare.

### Compoziția T5 – zona 6

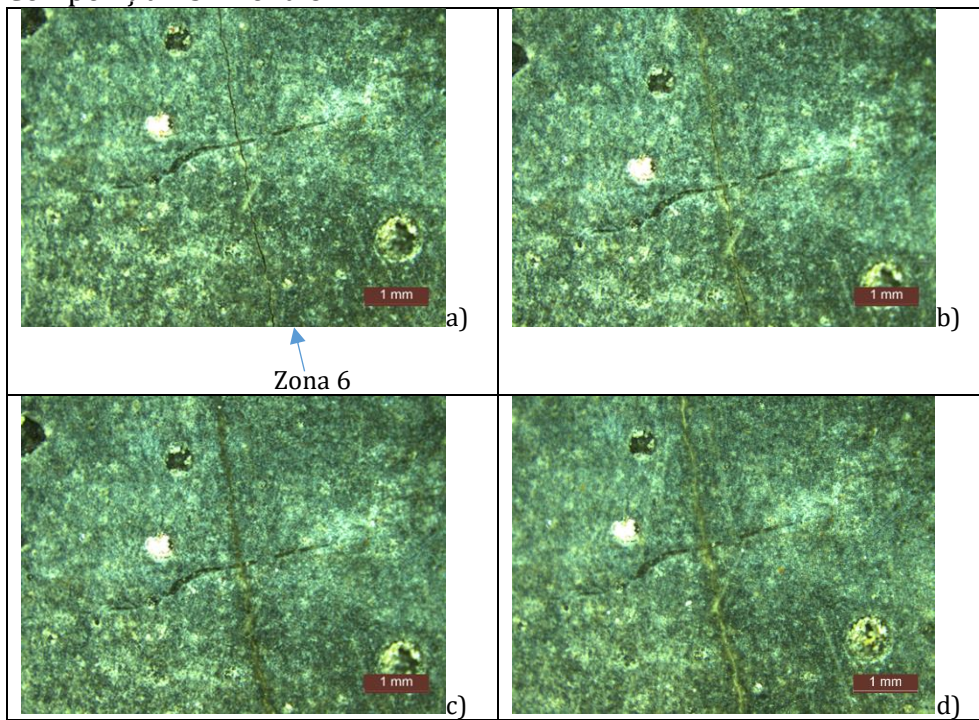


Fig. 7.4.7.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 6):  
a) aspect fisură indusă;  
b) aspect fisură după 1 zi condiționare;  
c). aspect fisură după 4 zile condiționare;  
d) aspect fisură după 8 zile condiționare.



## Compoziția T5 – detaliul 1

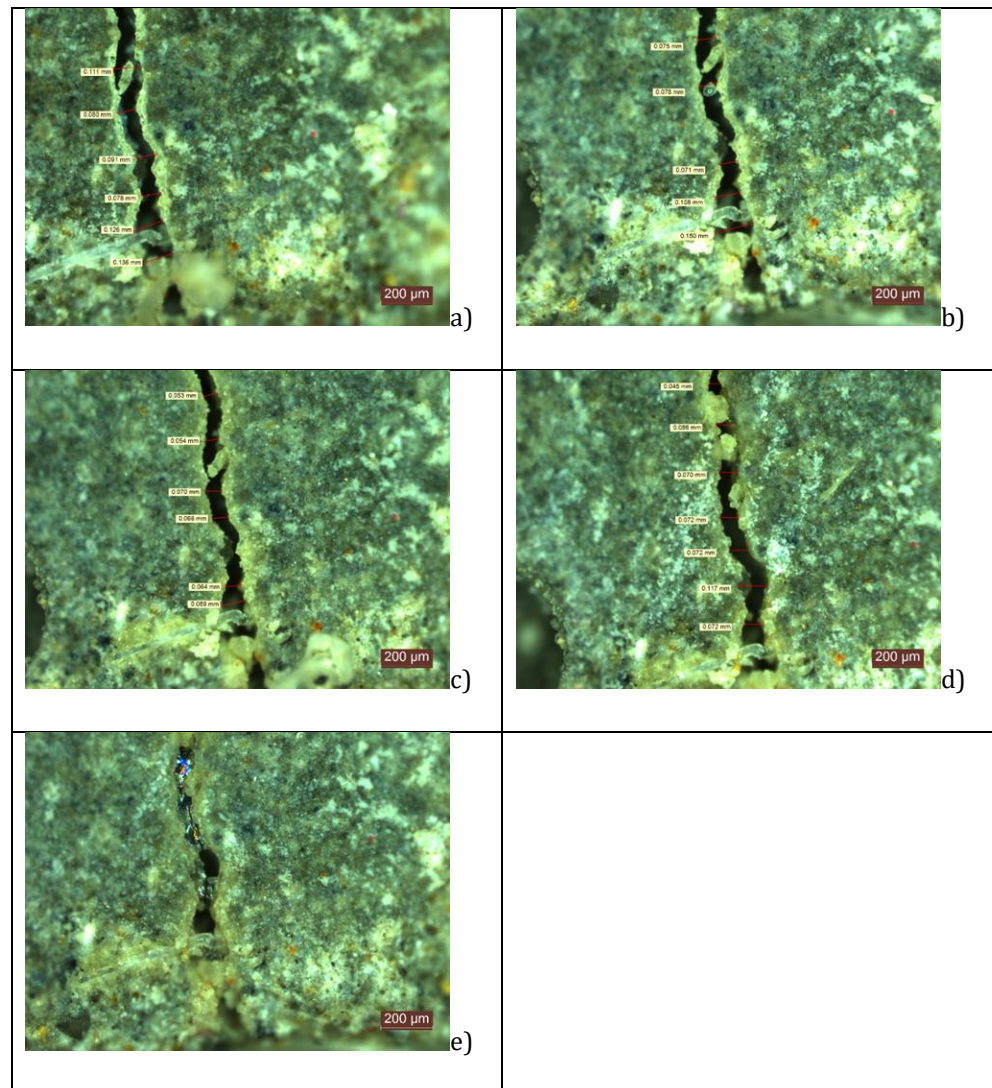


Fig. 7.4.7.10. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Detaliul 1): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

## Compoziția T5 – detaliul 2

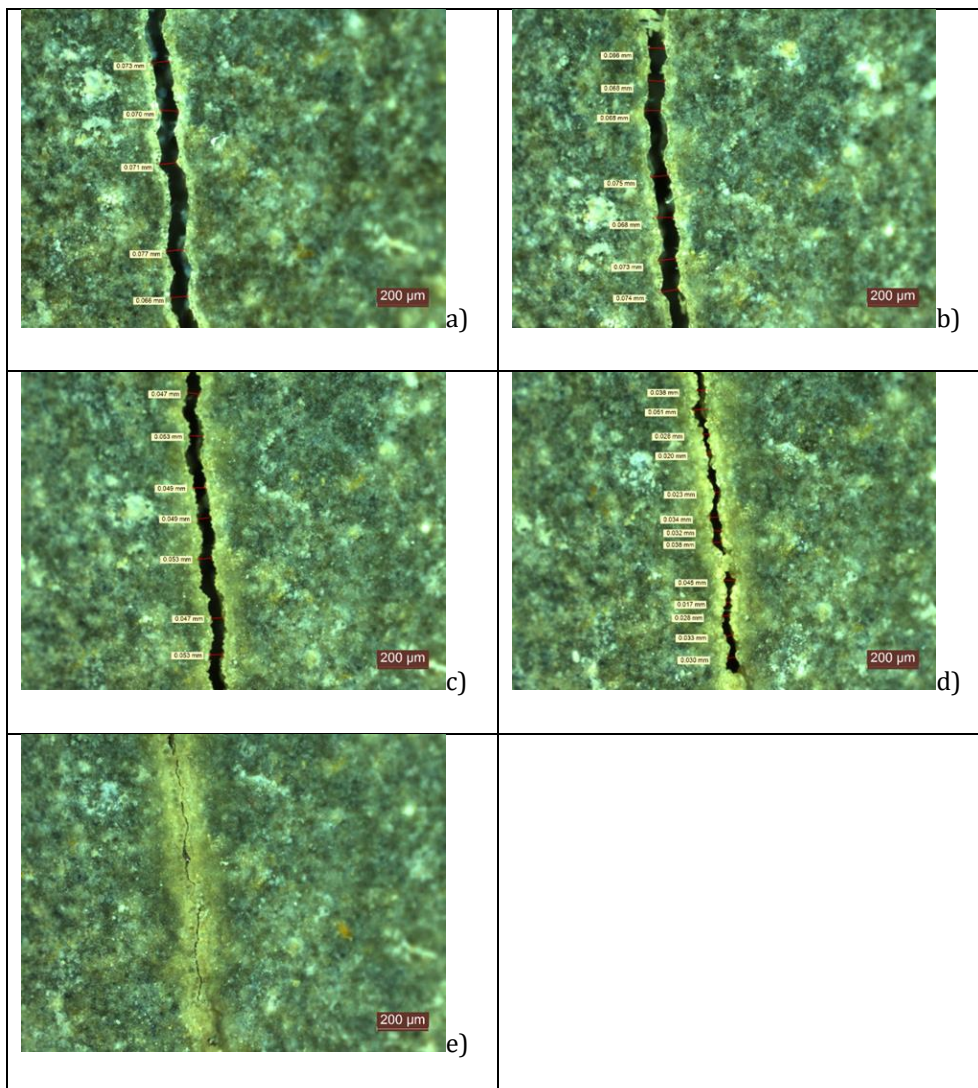


Fig. 7.4.7.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Detaliul 2): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisura după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

#### 7.4.8 Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T6

Pentru compoziția T6 în urma analizei microscopice a fisurii și pentru a evalua deschiderea fisurii la intervale de timp stabilite și anume – la momentul fisurării la 1 zi, la 4 zile, la 8 zile, la 14 zile și la 20 zile, suprafața prisme a fost împărțită în 16 zone, iar pentru fiecare zonă s-au stabilit locurile de efectuare a măsurătorilor de deschidere a fisurilor și anume:

- Zona 1 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 2 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 3 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 4 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 5 cu 8 locuri de verificare;
- Zona 6 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 7 cu 13 locuri de verificare;
- Zona 8 cu 15 locuri de verificare;
- Zona 9 cu 12 locuri de verificare;
- Zona 10 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 11 cu 10 locuri de verificare;
- Zona 12 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 13 cu 14 locuri de verificare;
- Zona 14 cu 6 locuri de verificare;
- Zona 15 cu 8 locuri de verificare;
- Zona 16 cu 16 locuri de verificare.

După analiza inițială a fisurii, epruveta compoziției T6 a fost supusă la cicluri de ud-uscăt (16 ore ud – 8 ore uscat), timp în care s-a urmărit evoluția fisurii la intervalele de timp alese.

#### Zonele de evaluare 1-16

Rezultatele obținute al evoluției deschiderii fisurii pentru zonele de evaluare 1-16, respectiv a vitezei de închidere a microfisurilor sunt prezentate în Tab. 7.4.8.

Tab. 7.4.8. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T6- Zonele de evaluare (1-16).

Caracteristica	Zona 1 - durata de condiționare					
	0 zile	1 zi	4 zile	8 zile	14 zile	20 zile
$D_{av}^m$ (μm)	50	21	0	-	-	-
$GV_f^m$ (%)	-	58	100	-	-	-
$D_{av}^M$ (μm)	53	50	0	-	-	-
$GV_f^M$ (%)	-	5,66	100	-	-	-

<b>Zona 2</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	21	4	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	80,94	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	30	25	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	-	16,67	100	-	-	-
<b>Zona 3</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	36	8	1	1	0	-
$GV_t^m$ (%)	-	77,78	97,22	97,22	100	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	43	32	26	21	0	-
$GV_t^M$ (%)	-	25,58	39,53	51,16	100	-
<b>Zona 4</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	19	1	0,5	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	94,77	97,37	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	27	18	16	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	-	33,33	40,74	100	-	-
<b>Zona 5</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	22	0	-	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	100	-	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	27	0	-	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	-	100	-	-	-	-
<b>Zona 6</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	31	21	12	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	32,26	61,29	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	36	35	26	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	-	2,78	27,78	100	-	-
<b>Zona 7</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	28	21	9	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	25	67,86	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	31	28	22	0	-	-
$GV_t^M$ (%)	-	9,68	29,03	100	-	-
<b>Zona 8</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	34	15	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	55,88	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	49	44	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	-	10,20	100	-	-	-
<b>Zona 9</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	27	12	0	-	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	55,56	100	-	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	41	35	0	-	-	-
$GV_t^M$ (%)	-	14,63	100	-	-	-
<b>Zona 10</b>						
$D_{av}^m$ ( $\mu\text{m}$ )	36	16	1	0	-	-
$GV_t^m$ (%)	-	55,56	97,22	100	-	-
$D_{av}^M$ ( $\mu\text{m}$ )	44	44	27	0	-	-

Continuare Tab. 7.4.8.

$GV_f^M(\%)$	-	0	38,64	100	-	-
<b>Zona 11</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	31	11	1	0	-	-
$GV_f^m(\%)$	-	64,52	96,77	100	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	37	27	26	0	-	-
$GV_f^M(\%)$	-	27,03	29,73	100	-	-
<b>Zona 12</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	30	10	1	0	-	-
$GV_f^m(\%)$	-	66,67	96,67	100	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	36	34	17	0	-	-
$GV_f^M(\%)$	-	5,56	52,78	100	-	-
<b>Zona 13</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	26	9	3	0	-	-
$GV_f^m(\%)$	-	65,38	88,46	100	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	49	29	26	0	-	-
$GV_f^M(\%)$	-	40,82	46,94	100	-	-
<b>Zona 14</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	30	15	0	-	-	-
$GV_f^m(\%)$	-	50	100	-	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	32	27	0	-	-	-
$GV_f^M(\%)$	-	15,63	100	-	-	-
<b>Zona 15</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	30	15	0	-	-	-
$GV_f^m(\%)$	-	50	100	-	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	32	27	0	-	-	-
$GV_f^M(\%)$	-	15,63	100	-	-	-
<b>Zona 16</b>						
$D_{av}^m(\mu m)$	51	23	0	-	-	-
$GV_f^m(\%)$	-	54,9	100	-	-	-
$D_{av}^M(\mu m)$	60	60	0	-	-	-
$GV_f^M(\%)$	-	0	100	-	-	-

Pe baza măsurătorilor efectuate s-a determinat evoluția fisurilor în epruvete prin urmărirea indicatorului cuantificabil „lățimea medie a fisurilor” pentru amestecul proiectat, reprezentate grafic în Fig. 7.4.8.1., Fig. 7.4.8.2., Fig. 7.4.8.3. și Fig. 7.4.8.4..

Rezultatele sunt prezentate cumulativ pentru toate zonele analizate pe epruveta cu compoziția proiectată T6.

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama ciclurilor de condiționare ud-uscat, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim



de 60  $\mu\text{m}$  la 27  $\mu\text{m}$ . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 51  $\mu\text{m}$  la 19  $\mu\text{m}$ , Fig. 7.4.8.1..

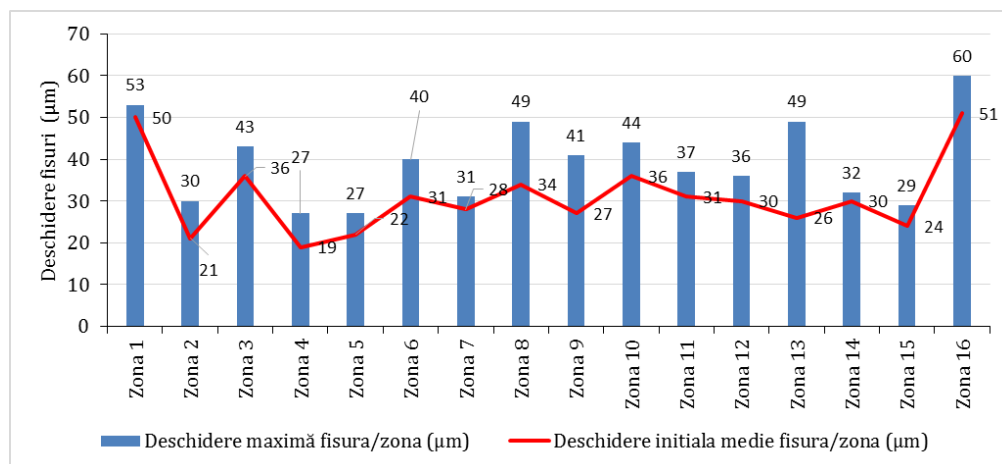


Fig. 7.4.8.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția proiectată T6

- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, ( $GV_t^M$ ) este reprezentat în Fig. 7.4.8.2. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscă (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 1 zi în cazul zonei 5, după 4 zile în cazul zonelor 1, 2, 8, 9, 14 și 16, după 8 zile în cazul zonelor 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13 și 15, după 14 zile în cazul zonei 3.
- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate ( $GV_t^m$ ), este reprezentat în Fig. 7.4.8.3 și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscă (pe măsură ce se parcurge diagrama de condiționare a epruvetelor), atingându-se maximul de vindecare (100%), după 1 zi în cazul zonei 5, după 4 zile în cazul zonelor 1, 2, 8, 9, 14 și 16, după 8 zile în cazul zonelor 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13 și 15, după 14 zile în cazul zonei 3.
- Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare și indică faptul că, în primele zile de condiționare (1 – 4 zile) viteza de închidere este mai mare, spre deosebire de desfășurarea ulterioară a fenomenului de autovindecare care are loc cu viteză mai redusă, Fig. 7.4.8.4.

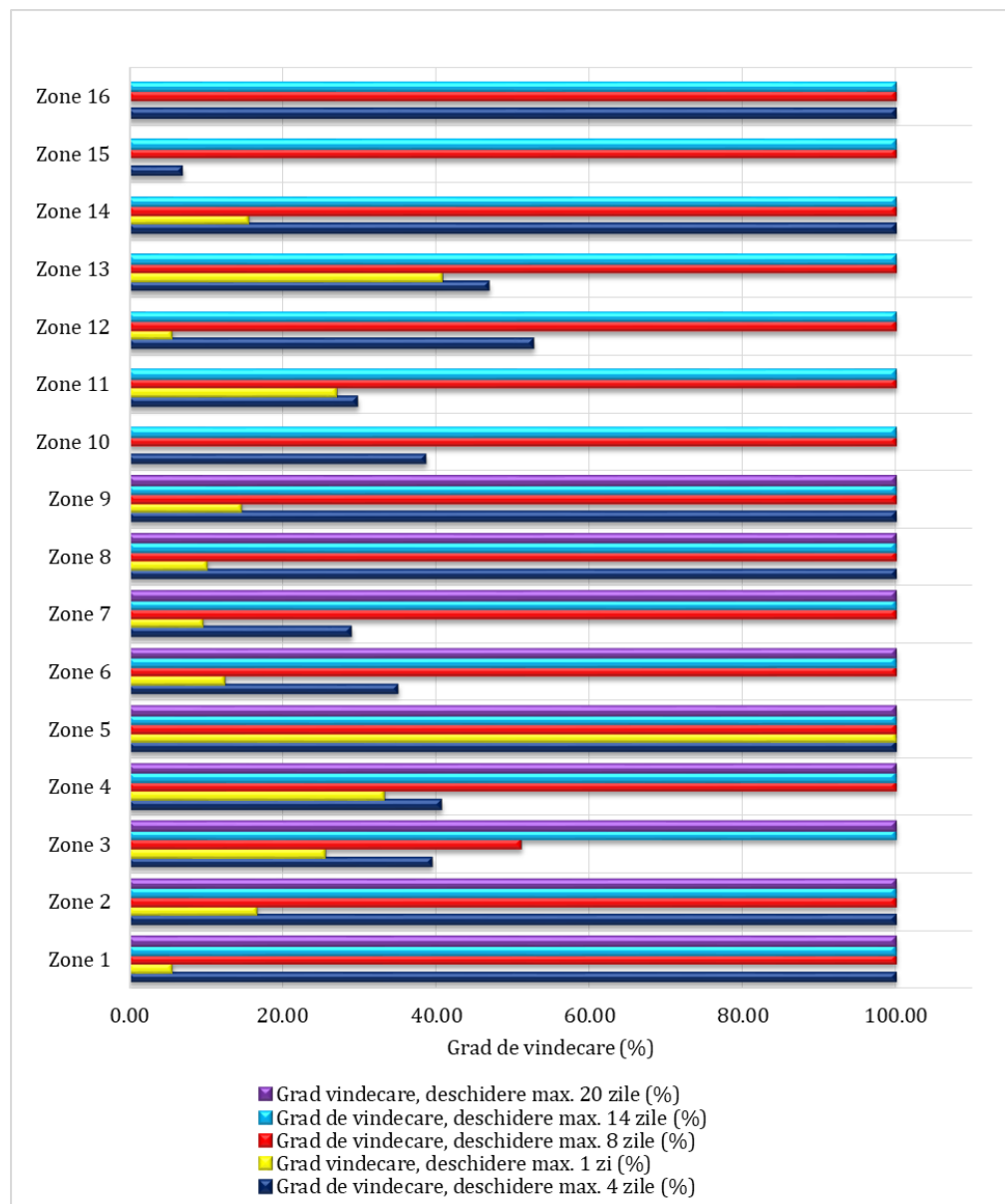


Fig. 7.4.8.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T6

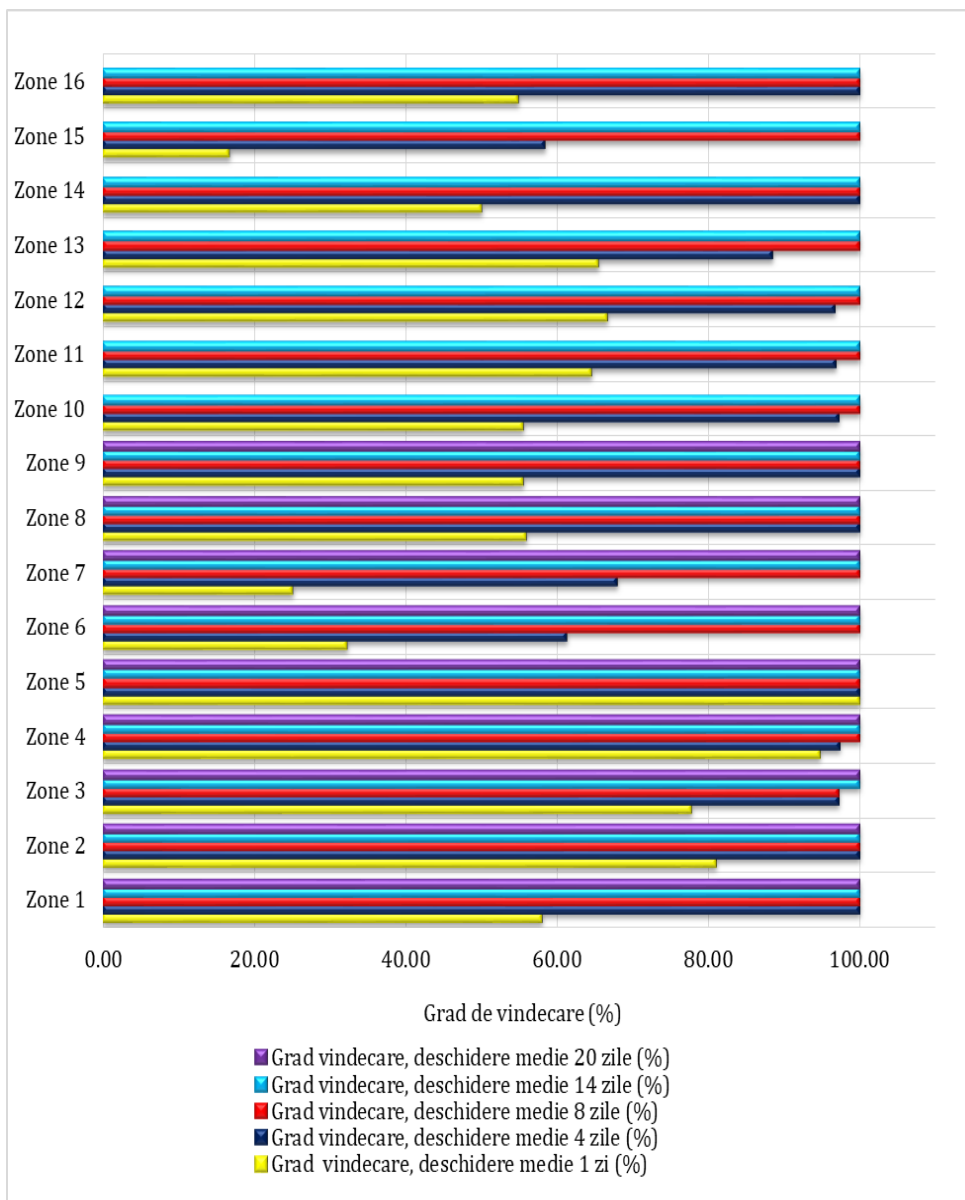


Fig. 7.4.8.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T6

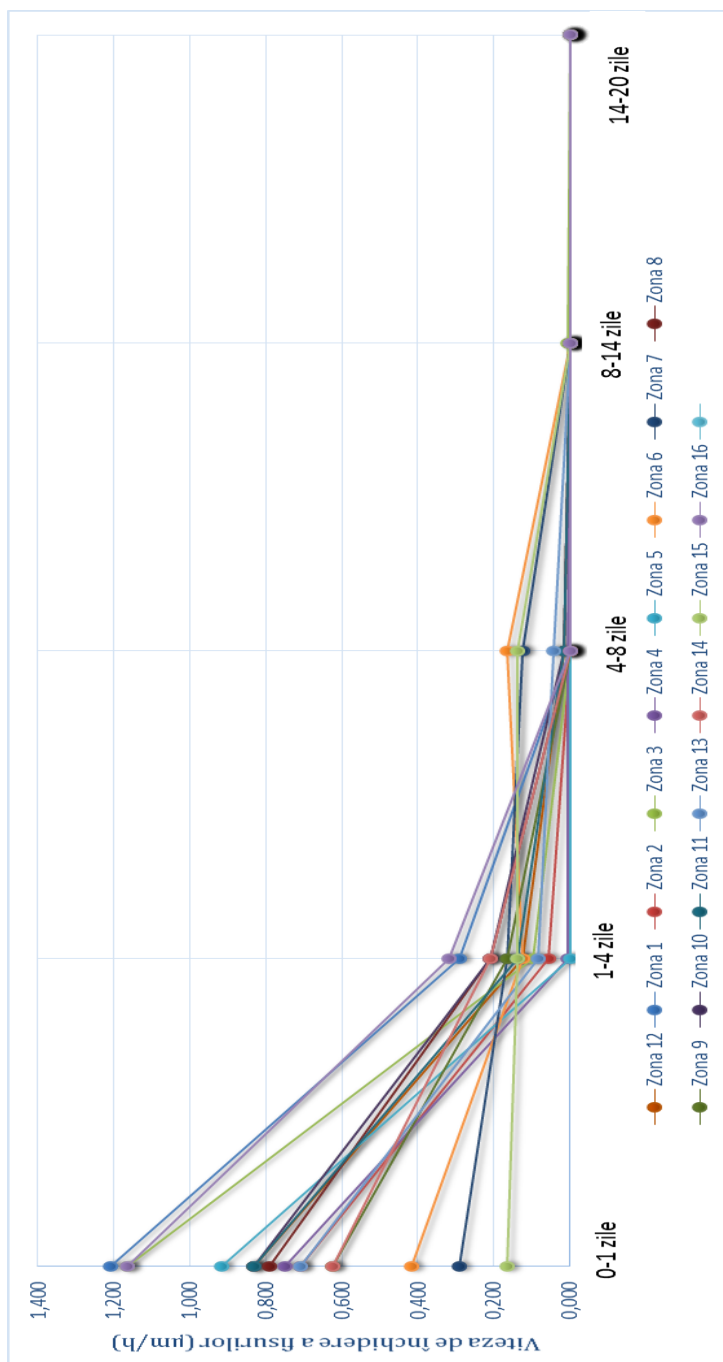


Fig. 7.4.8.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția proiectată T6

**Imagini reprezentative cu modul de închidere al fisurilor al prismelor realizate din compoziția T6**

Compoziția T6 - zona 1 și zona 2

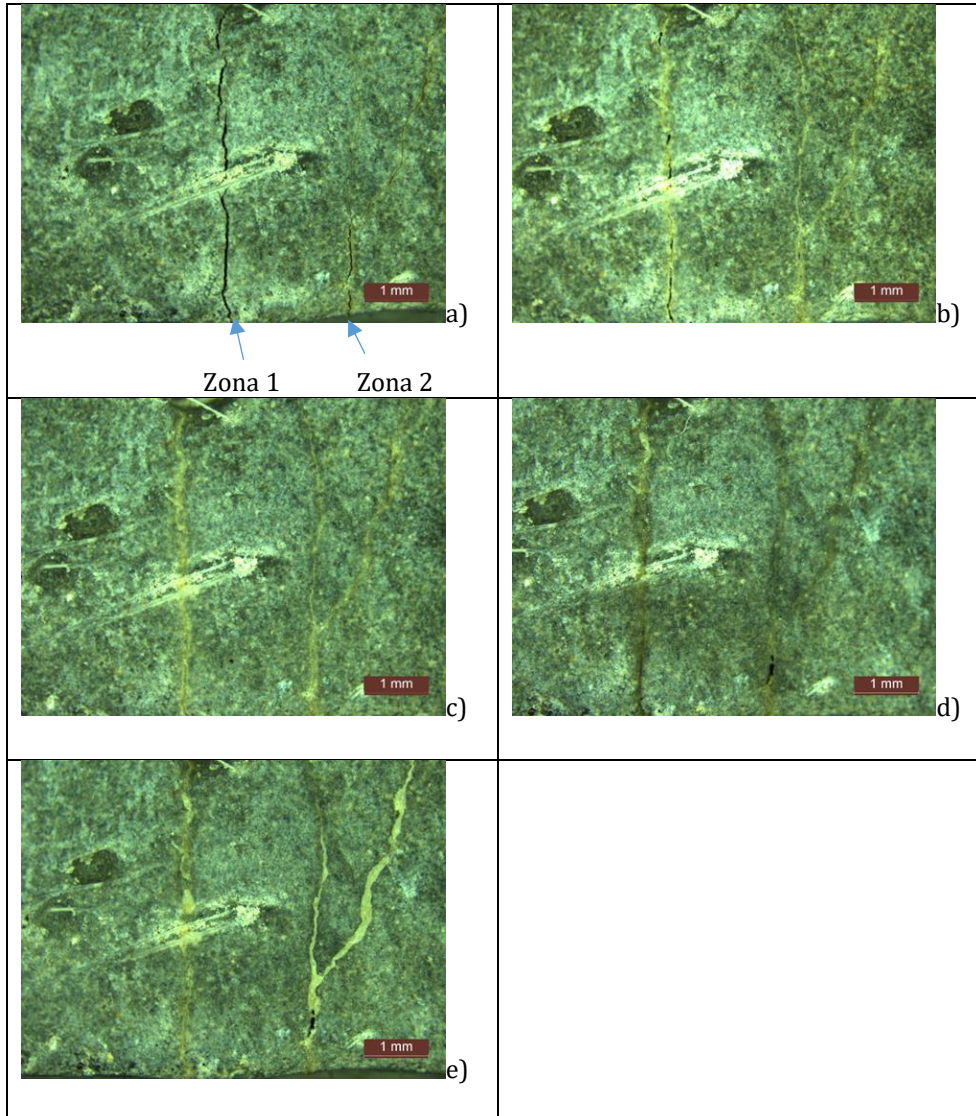


Fig. 7.4.8.5 Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 1 și Zona 2): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

### Compoziția T6 – zona 3 și zona 4

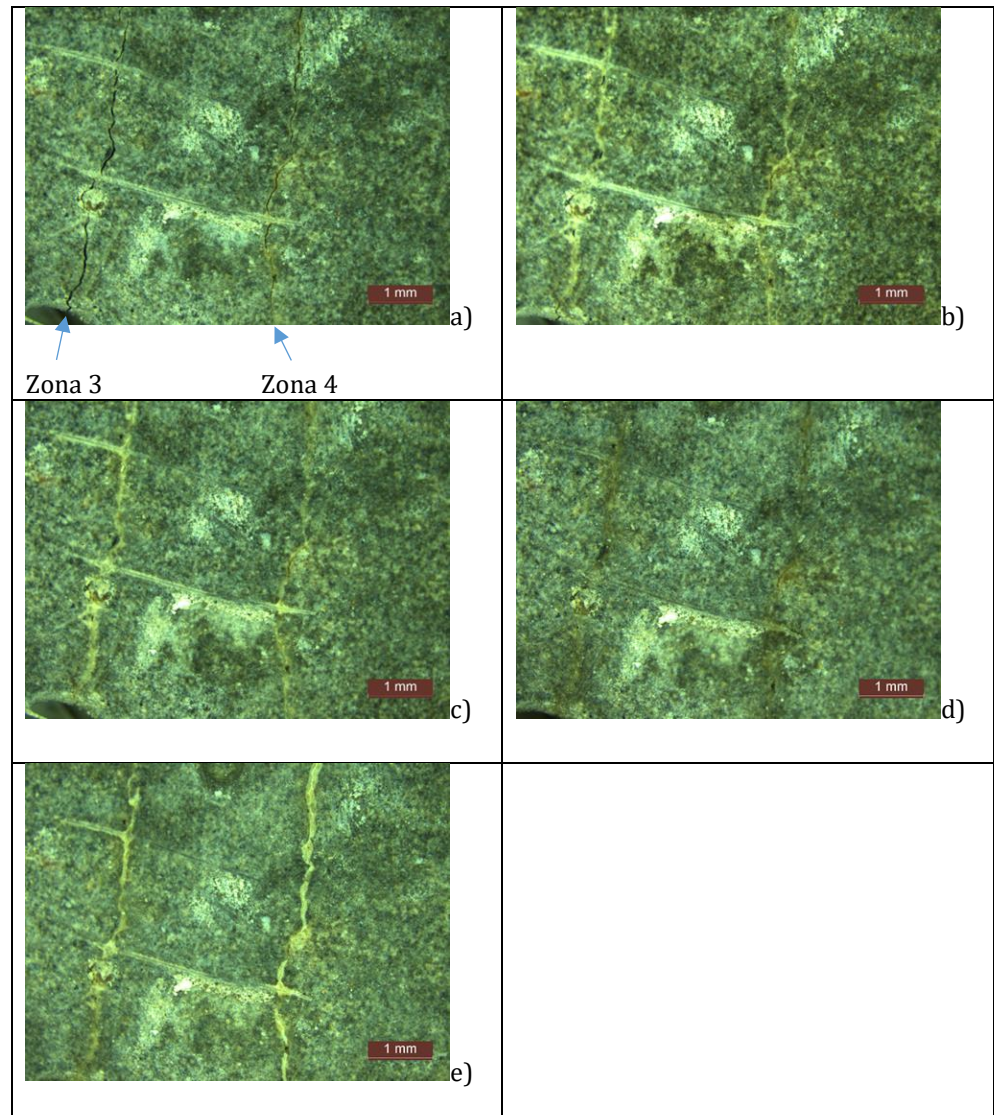


Fig. 7.4.8.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 3 și Zona 4): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.



Compoziția T6 – zona 5 și zona 6

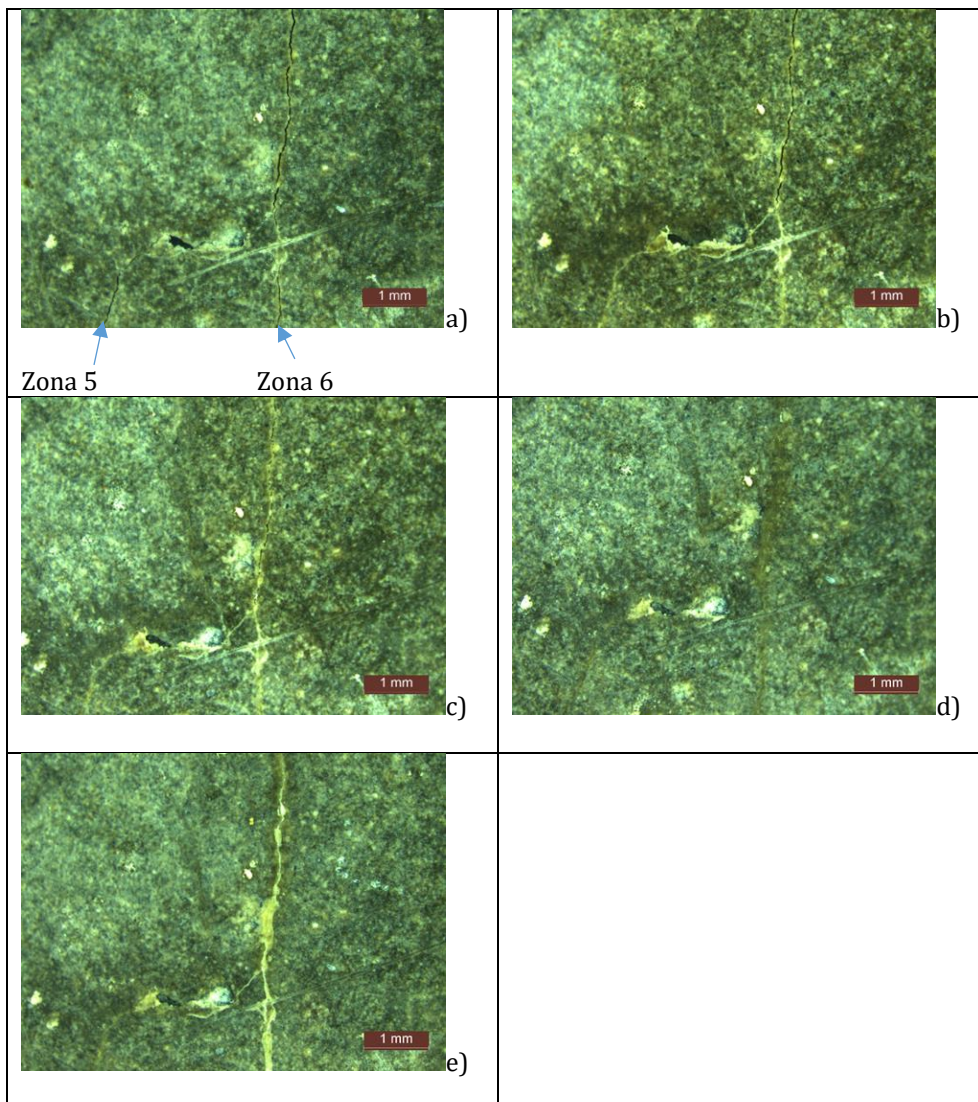


Fig. 7.4.8.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 5 și Zona 6): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.



Compoziția T6 – zona 7

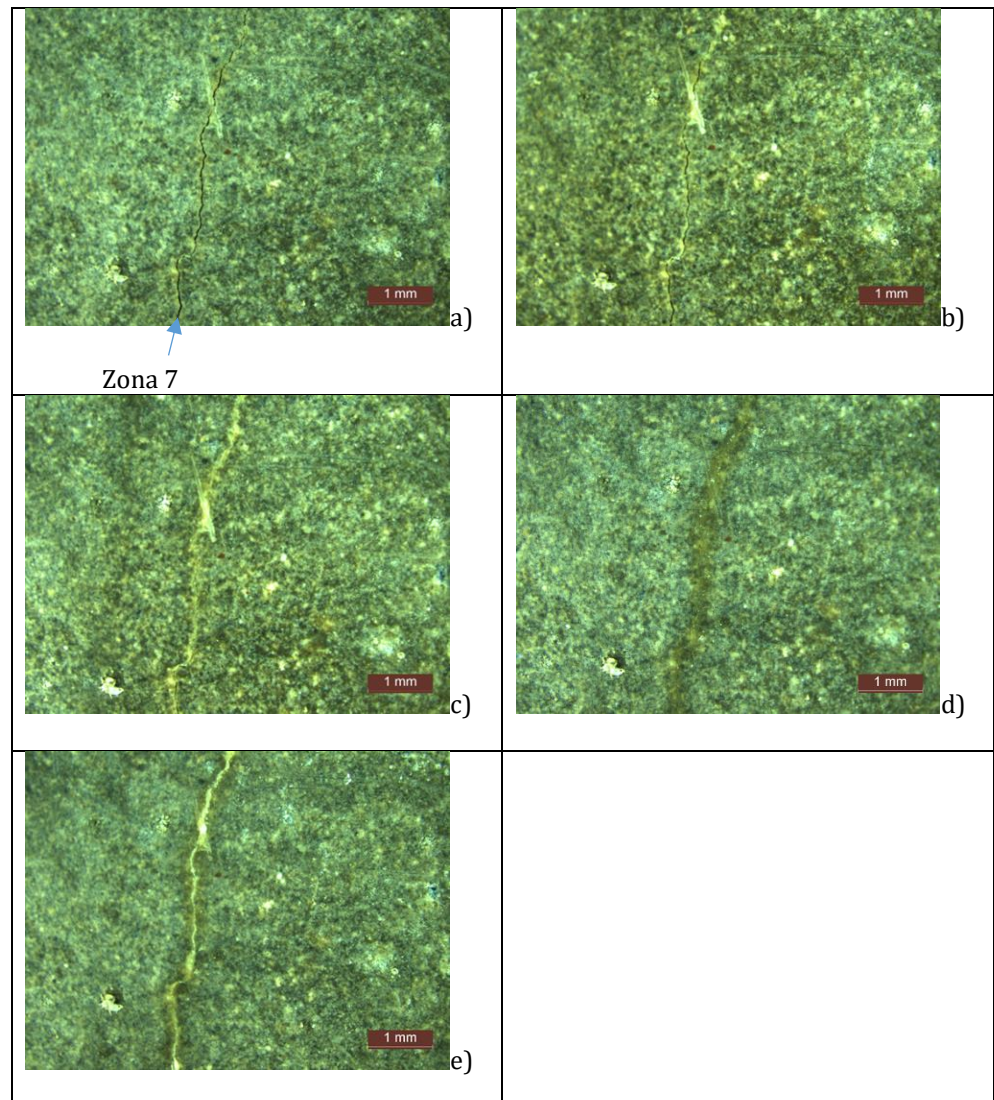


Fig. 7.4.8.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 7):  
a) aspect fisură indusă;  
b) aspect fisură după 1 zi condiționare;  
c) aspect fisură după 4 zile condiționare;  
d) aspect fisură după 8 zile condiționare;  
e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

Compoziția T6 – zona 8 și zona 9

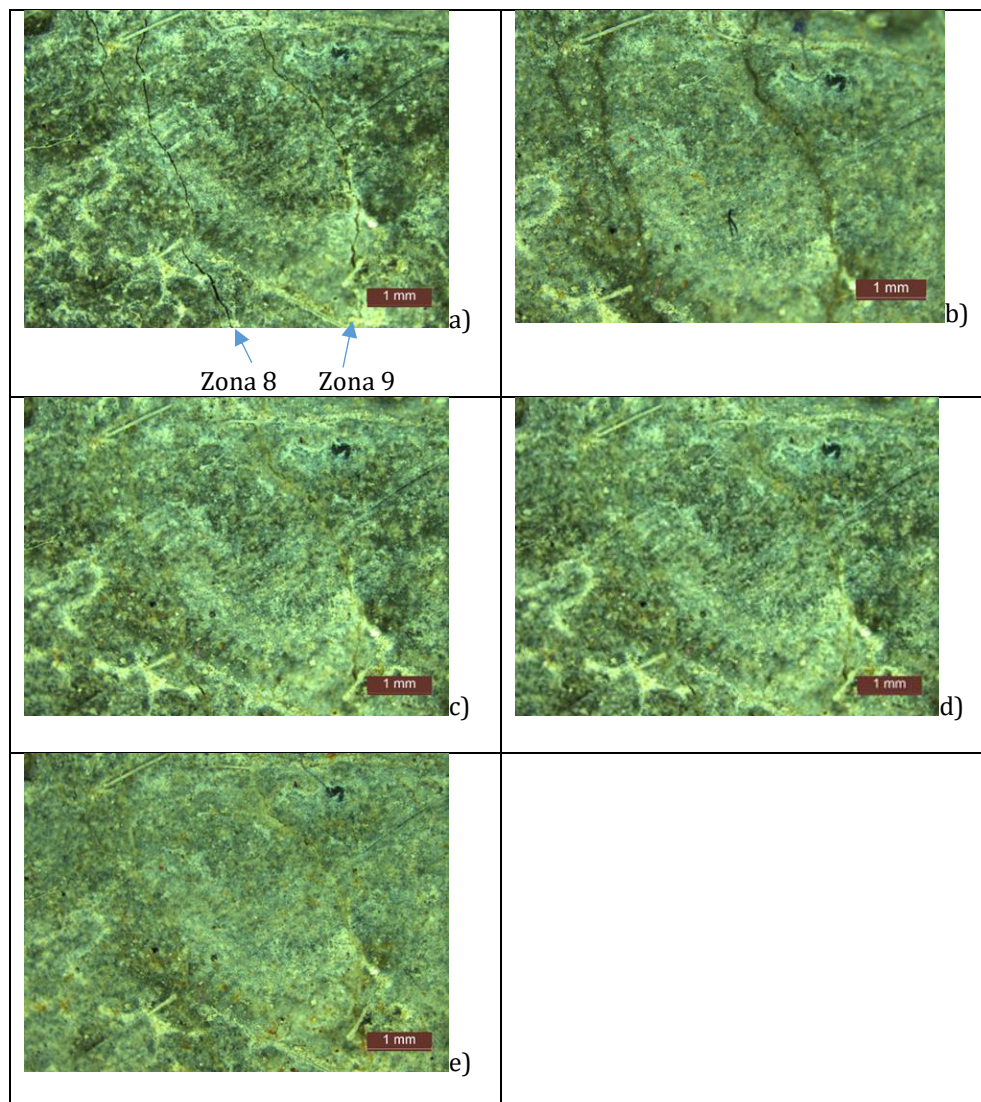


Fig. 7.4.8.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 8 și Zona 9): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.



### Compoziția T6 – zona 10 și zona 11

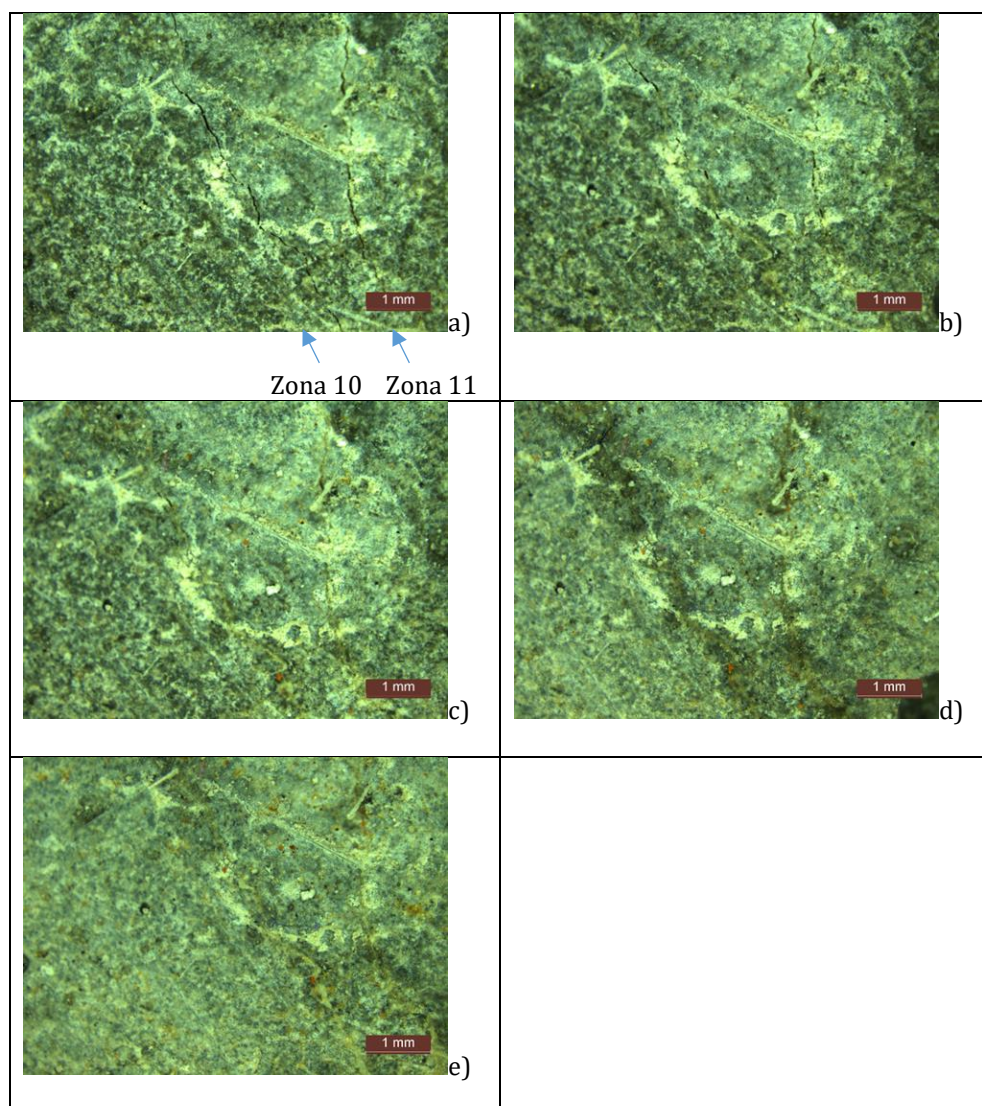


Fig. 7.4.8.10. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 10 și Zona 11): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.

## Compoziția T6 – zona 12 și zona 13

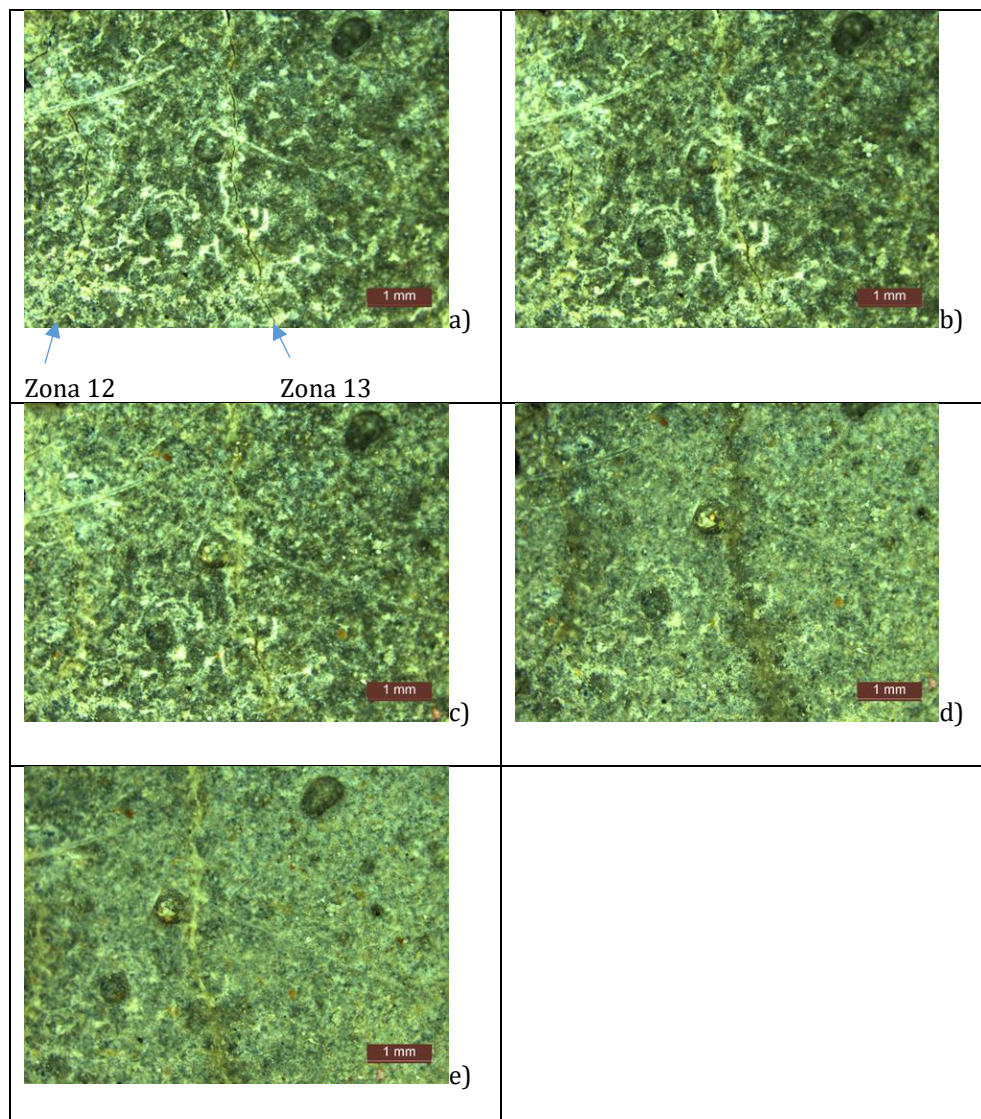


Fig. 7.4.8.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 12 și Zona 13): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare.



Compoziția T6 – zona 14 și zona 15

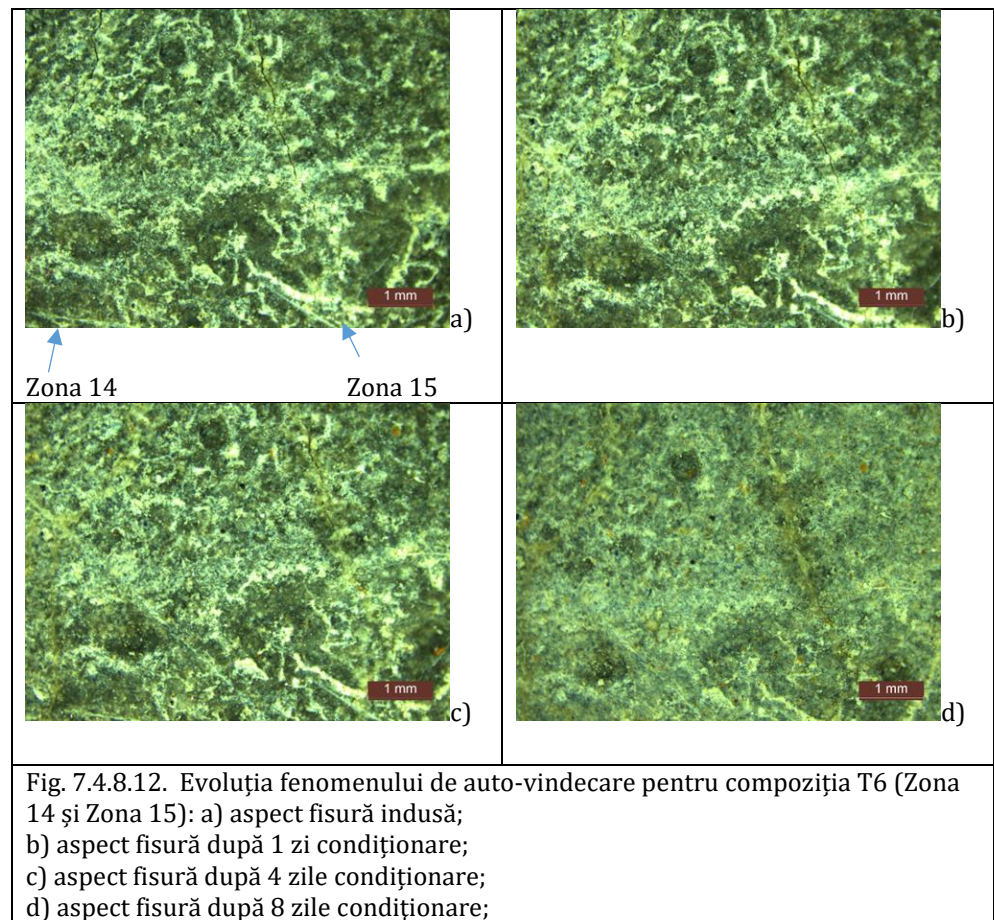


Fig. 7.4.8.12. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 14 și Zona 15): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare;

## Compoziția T6 - zona 16

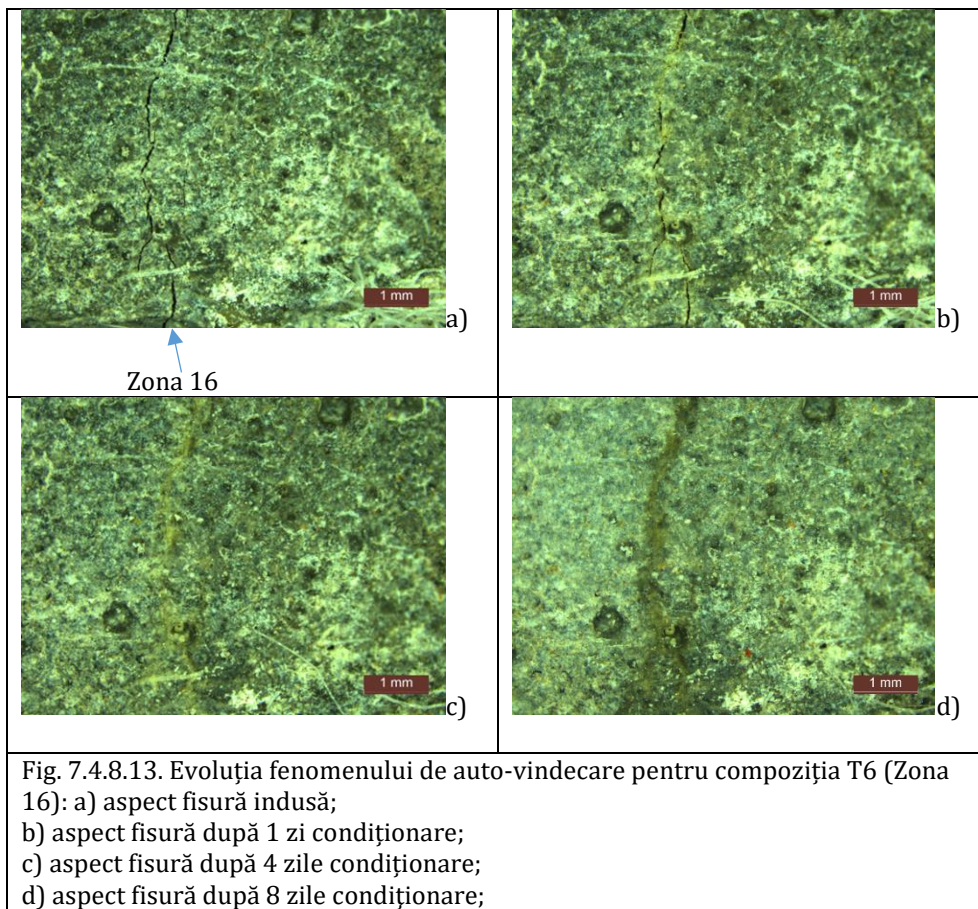
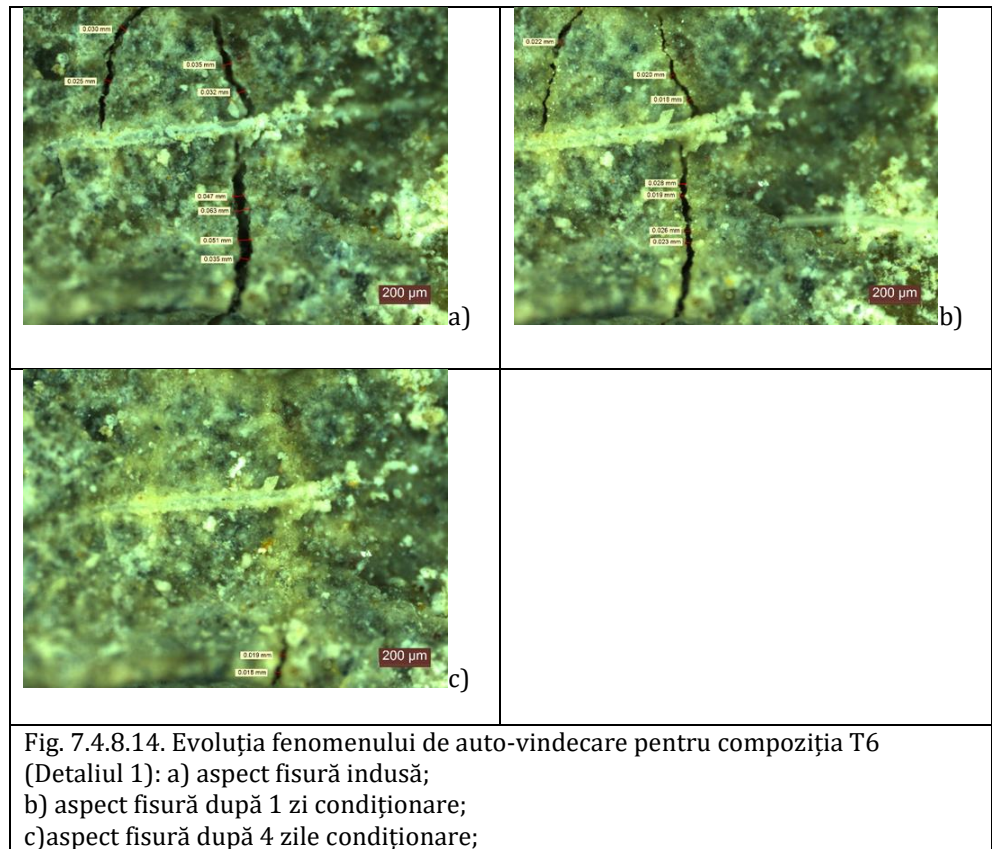


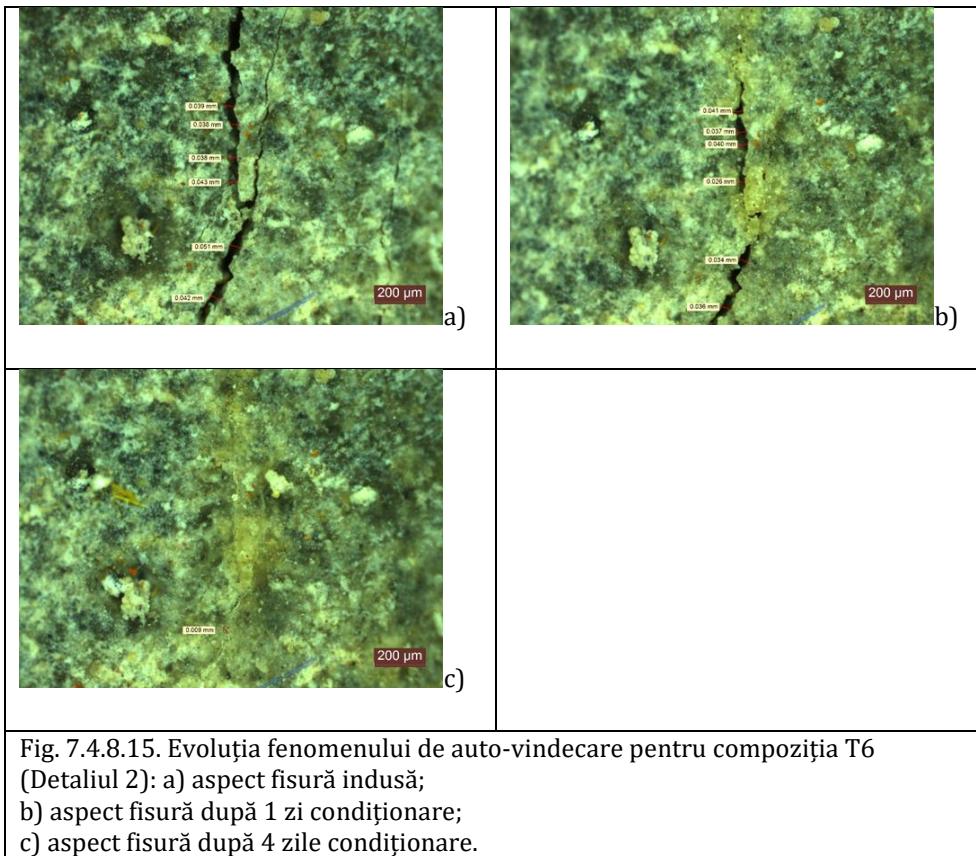
Fig. 7.4.8.13. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 16): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare;

## Compoziția T6 – detaliul 1





## Compoziția T6 – detaliul 2



### Compoziția T6 – detaliul 3

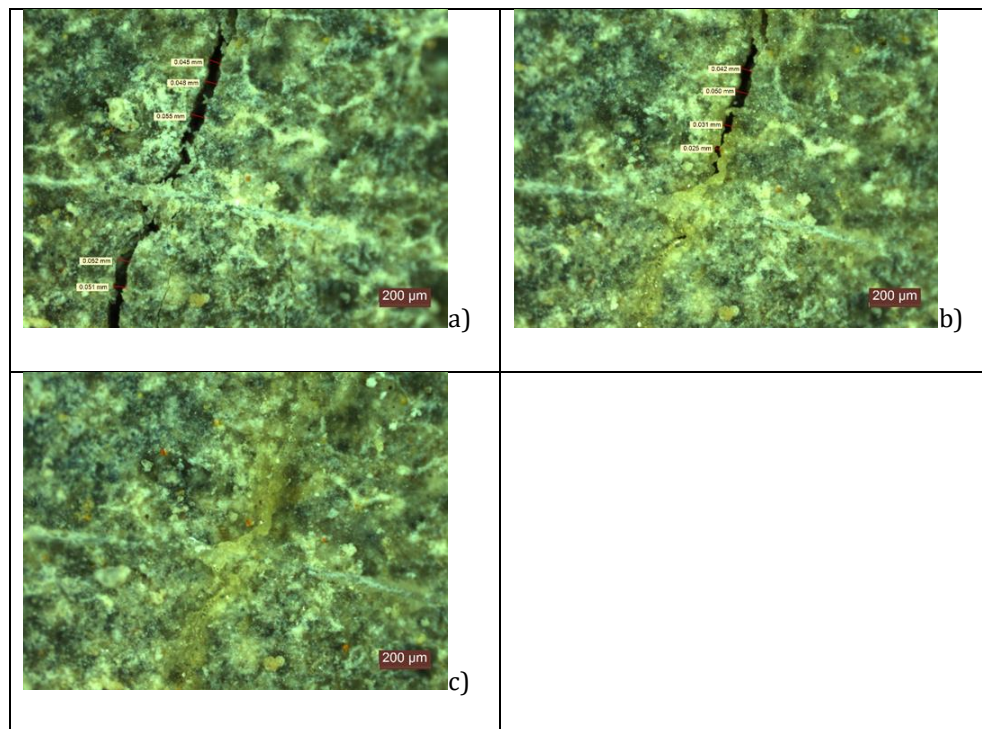


Fig. 7.4.8.16. Evoluția fenomenului de autovindecare pentru compoziția T6 (Detaliul 3): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare.

### **Concluziile determinării capacității de auto-vindecare asupra compozițiilor studiate :**

A fost analizată influența adaosului de impermeabilizare prin cristalizare în masă a betonului, 1%, 2% și 3% din masa cimentului Portland - CEM I 42,5 R a compozițiilor analizate, asupra capacității de auto-vindecare a fisurilor induse în epruvetele realizate, ajunse la vârsta de 28 de zile.

Rezultatele obținute experimental pe compozițiile studiate indică faptul că epruvetele cu un conținut de 3% de adaos impermeabilizant de cristalizare în masă a microbetonului realizează capacitatea de închidere a fisurilor cea mai bună.

Mecanismul de realizare al închiderii fisurilor este direct influențat de modul de generare al stării de fisurare induse în epruvetele testate, de lățimea fisurii inițiale și cel mai important de condițiile de expunere (ciclurile ud -uscat).

Fisurile analizate ale epruvetelor confecționate din compozițiile realizate în această cercetare au indicat o capacitate semnificativă de etanșare a lățimii ale fisurilor și anume 16-136  $\mu\text{m}$ , la vârste de maxim 20 zile de la inducerea stării de fisurare.

Capacitatea de auto-vindecare a acestor compoziții, cu granula maximă de sort de 4 mm, este evidentă și deschide oportunitatea pentru introducerea în unor sorturi cu granulația mai mare și cu o capacitate corespunzătoare de închidere a fisurilor, respectiv cu caracteristici fizico-mecanice superioare.

## 7.5. Determinarea compoziției microbetonului cu ajutorul difracțiilor de raze X (XRD)

Determinarea compoziției a microbetonului a fost efectuată cu difractometrul de raze X tip D8 ADVANCE pe materialul întărit cu o vârstă mai mare de 28 zile de la data preparării, prelevat din epruvetele microbetonului. Din materialul întărit prin mojararea acestuia s-a obținut proba de analizat, sub formă de pulbere.

În urma determinării s-au obținut difractogramele reprezentate în Fig. 7.5.1., Fig. 7.5.2., Fig. 7.5.3., Fig. 7.5.4., Fig. 7.5.5. care indică compoziția microbetonului.

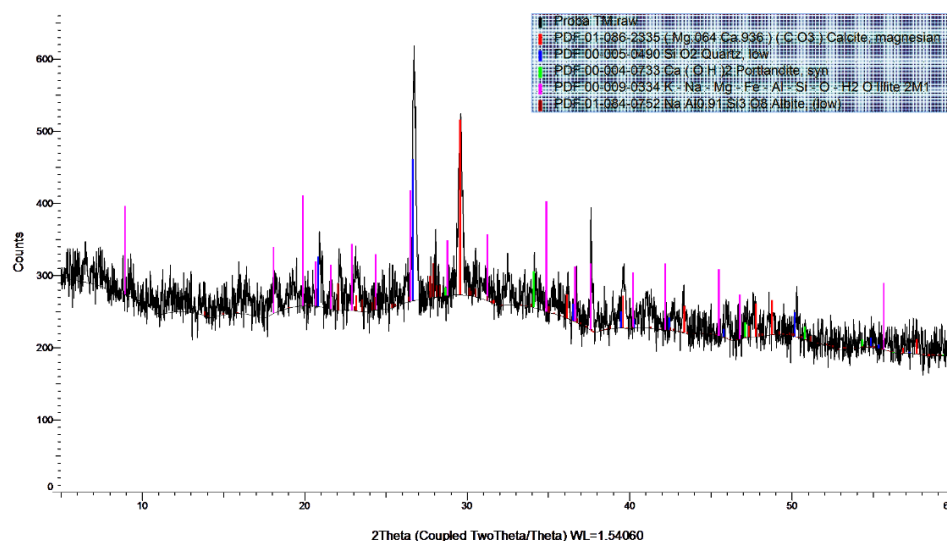


Fig. 7.5.1. Spectrul de difracție cu raze X al probei  $\text{TM}_{\text{sort}} 0-4$

Spectrul de difracție pe proba de microbeton  $\text{TM}_{\text{sort}} 0-4$ , reprezentat în Fig. 7.5.1. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: calcit, cuarț, portlandit, ilit, albit.

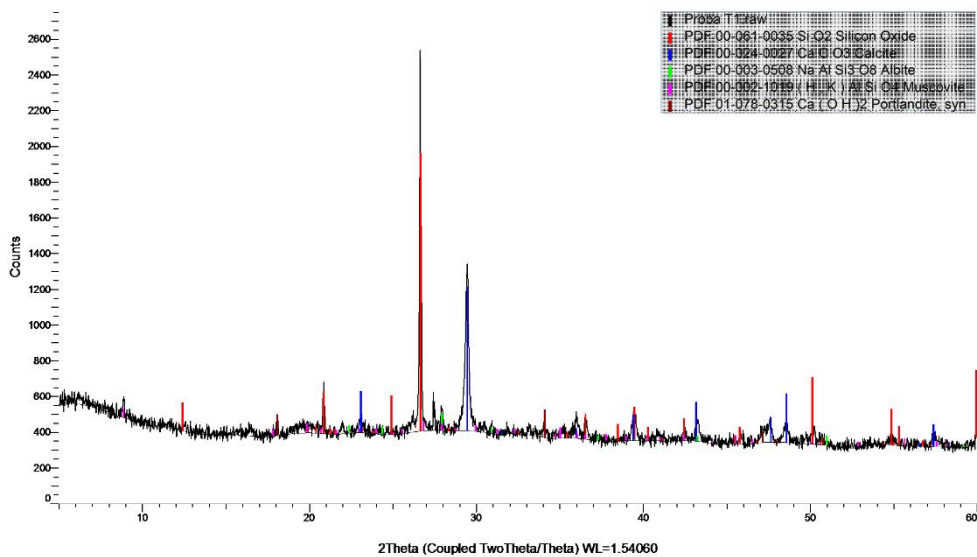


Fig. 7.5.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei T1

Spectrul de difracție pe proba de microbeton T1, reprezentat în Fig. 7.5.2. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: cuarț, calcit, albit, muscovit, portlandit.

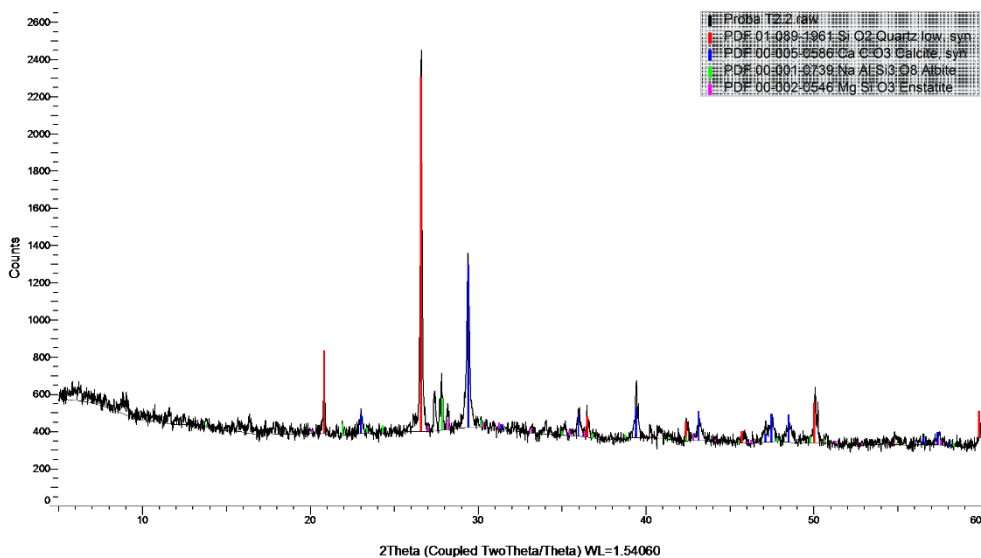


Fig. 7.5.3. Spectrul de difracție cu raze X al probei T2

Spectrul de difracție pe proba de microbeton T2, reprezentat în Fig. 7.5.3. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: cuarț, calcit, albit, muscovit, portlandit.

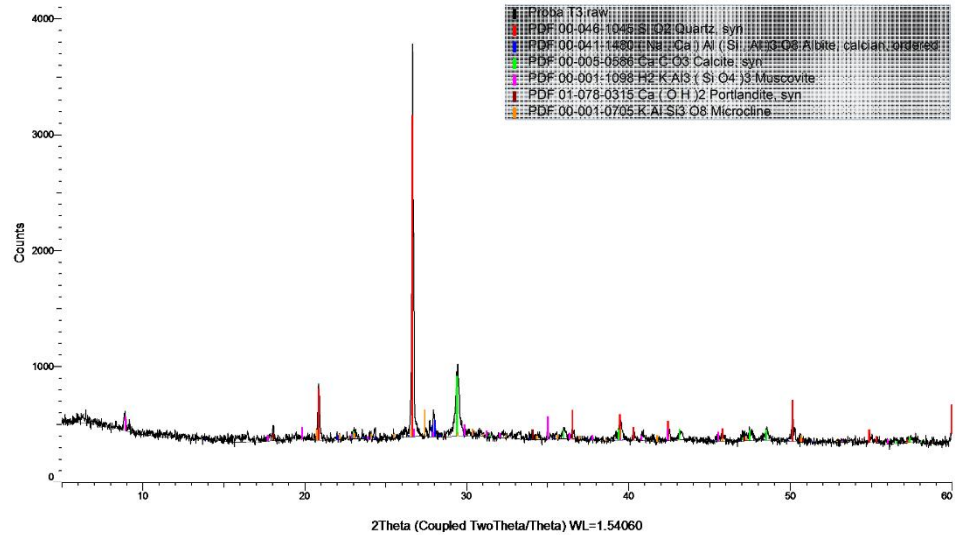


Fig. 7.5.4. Spectrul de difracție cu raze X al probei T3

Spectrul de difracție pe proba de microbeton T3, reprezentat în Fig. 7.5.4. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: cuarț, albit, calcit, , muscovit, portlandit, microclin.

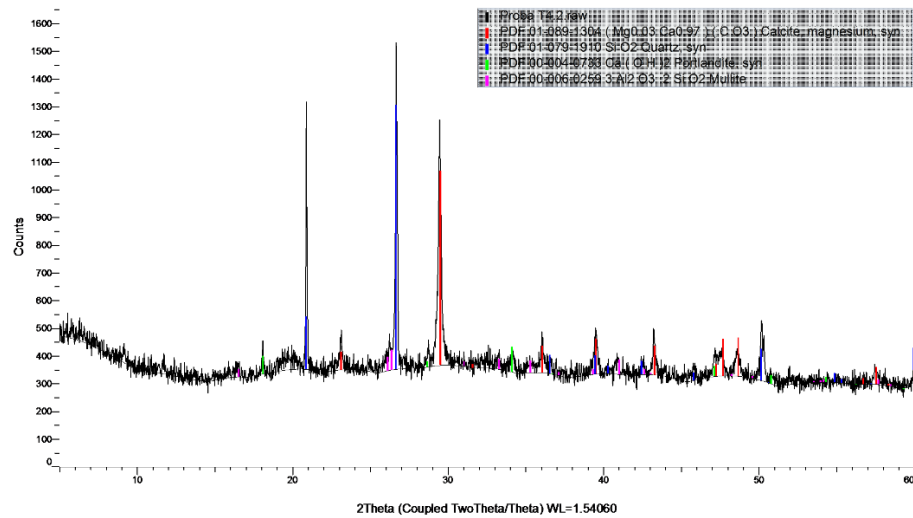


Fig. 7.5.5. Spectrul de difracție cu raze X al probei T4



Spectrul de difracție pe proba de microbeton T4, reprezentat în Fig. 7.5.5. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: calcit, cuarț, portlandit, mulit.

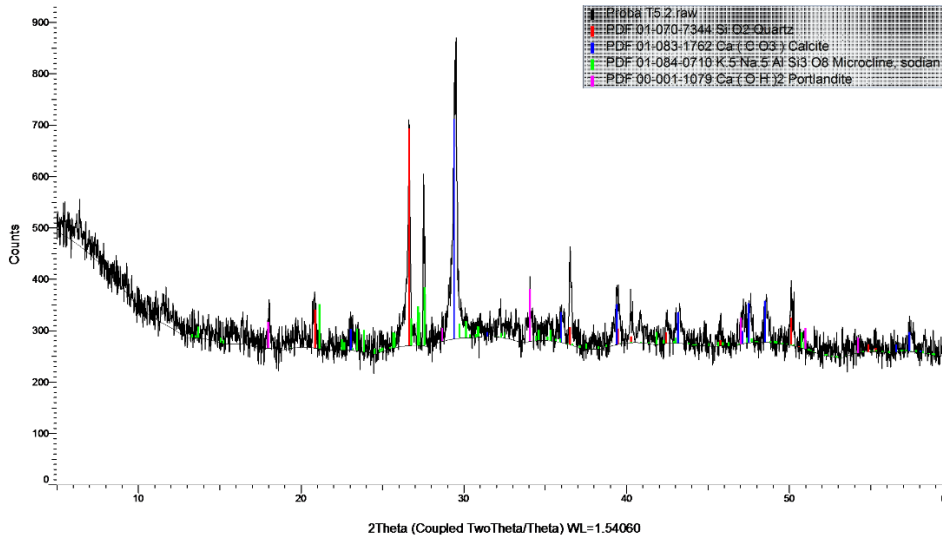


Fig. 7.5.6. Spectrul de difracție cu raze X al probei T5

Spectrul de difracție pe proba de microbeton T5, reprezentat în Fig. 7.5.6. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: cuarț, calcit, microclin, portlandit.

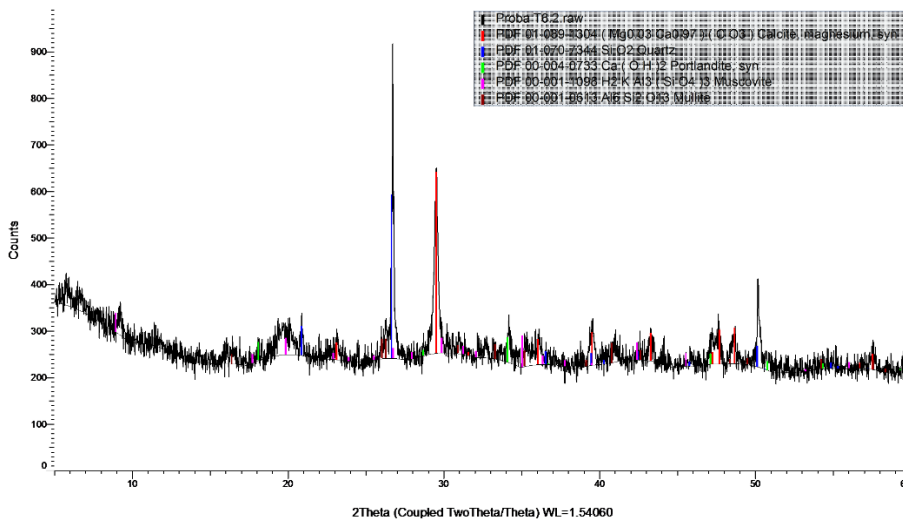


Fig. 7.5.7. Spectrul de difracție cu raze X al probei T6

Spectrul de difracție pe proba de microbeton T6, reprezentat în Fig. 7.5.7. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: cuarț, albit, calcit, muscovit, portlandit, microclin.

- **Concluziile determinării structurii cristaline ale compozițiilor microbetonului cu ajutorul difracției de raze x**

În urma analizării compozițiilor mineralogice realizate de microbeton cu difractometrul s-a determinat prezența comună în compoziții a următoarelor faze cristaline:

- Cuarț;
- Albit;
- Clacit;
- Muscovit;
- Microclin;
- Portalndit.

## 8. Concluzii finale

### 8.1. Concluzii generale

**Capitolul 1** prezintă informații generale despre materialele compozite cementoase cu proprietăți de auto-vindecare utilizate pentru infrastructura rutieră. Dezvoltarea de astfel de noi materiale s-a bazat, ca surse de inspirație, pe urmărirea naturii. Mecanismele de auto-vindecare cele mai studiate sunt cele induse cu ajutorul polimerilor superabsorbanti, amestecurilor cristaline, silicaților încapsulați, tuburilor umplute cu diferite substanțe și bacterii. Pentru a satisface criteriile ca termenul de valabilitate, calitatea, fiabilitatea, versalitatea, repetabilitatea, omniprezența, de-a lungul timpului s-au făcut numeroase cercetări asupra tehnicilor de auto-vindecare.

Auto-vindecarea autogenă a materialelor cementoase care prezintă microfisuri cu deschidere mică, expuse în medii cu umiditate ridicată, precum și gradul de închidere al microfisurilor este foarte greu de controlat. Totuși, în ciuda impedimentelor legate de mediul în care sunt expuse materialele compozite cementoase, proiectarea și realizarea materialelor cementoase cu proprietatea de auto-vindecare autogenă este posibilă.

**Capitolul 2** prezintă tipurile de auto-vindecare și mecanismele prin care acestea funcționează.

Betonul cu mecanismul de auto-vindecare autogenă este cel mai utilizat și este aplicabil la elementele de beton care intră în contact cu apa, inițindu-se astfel reacția de hidratare-hidroliză a particulelor de ciment rămase nehidratate. Prin aceasta fisurile se închid parțial sau total. Betonul cu mecanismul de auto - vindecare autonomă se realizează prin înglobarea în compoziția matricei cementoase a materialelor precum microorganisme, cenușă zburătoare, fibre din alcool polivinilic (PVA), praf de silice etc.

Un alt tip de mecanism de auto-vindecare cuprins în cadrul capitolului, ca mecanismul de auto - vindecarea autonomă este re prezentat de cel indus de adaosuri hidroizolante cristaline. Mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat cu polimeri superabsorbanti, prin înglobarea acestora în masa betonului la momentul preparării conduce la îmbunătățirea capacității de auto - vindecare a betonului.

Microorganismele de tip bacterii pot servi ca parte integrantă a tehnologiilor avansate, contracarând prin inducerea unui mecanism de auto-vindecare efectele lor nedorite din punct de vedere a

biodeteriorării. Capacitatea unei comunități mari de bacterii de a transforma o sursă adecvată de nutrienți în cristalite de calcit insolubile - cunoscute sub numele de precipitare a carbonatului de calciu indusă microbial - a fost utilizată ca parte a biotehnologiilor reprezentând o alternativă la metodele aplicate în mod tradițional și utilizată în cadrul mecanismelor de auto-vindecare ale materialelor cementoase.

Încorporarea unor capsule sau a unor tuburi în compoziții cementoase, oferă protecție mecanică agenților de vindecare și asigură eliberarea controlată a acestora în fisuri. Astfel are loc o oprire a agenților nocivi exteriori (umezeală, aer, diverși agenți chimici) să pătrundă agresiv, la nivelul fisurilor, în matricea cementoasă.

În **Capitolul 3** sunt prezentate ipotezele de lucru, obiectivele generale și specifice ale proiectului de cercetare.

**Capitolul 4** prezintă metodologia generală privind proiectarea compozițiilor preliminare ale compozitului cementos dar și analiza și caracterizarea materiilor prime utilizate.

**Capitolul 5** prezintă contribuțiile personale aduse cercetărilor în domeniul auto-vindecării materialelor compozite cementoase prin caracterizarea compozițională a celor opt tipuri de microbeton proiectat.

**Capitolul 6** prezintă echipamentele și standul experimental utilizate în scopul analizei performanțelor fizico-mecanice și capacității de auto-vindecare a compozitelor cementoase proiectate și realizate.

În cadrul **Capitolului 7** sunt prezentate comparativ rezultatele experimentale privind performanțele microbetonului, atât din punct de vedere fizico-mecanic (densitate, absorbție de apă, caracteristici mecanice - rezistența la întindere prin încovoiere, rezistența la compresiune), cât și din punct de vedere a demonstrării și evaluării capacității de auto-vindecare pe diferite compoziții.

Pentru cele 8 compoziții cementoase analizate, dintre care 2 compoziții au reprezentat probe de referință (fără adaos de inducere a capacității de auto-vindecare), se pot spune următoarele:

- Aspecte privind prepararea și lucrabilitatea compozitelor cementoase
  - creșterea necesarului de apă pentru obținerea pastei de consistență normală cu maxim 7%, pe măsură ce cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenușă de termocentrală a crescut.
  - creșterea timpului inițial / final de priză maxim 136%, pe măsură ce cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenușă de termocentrală a crescut.

- rezultatele experimentale indică beneficiile substituirii unei cantități de ciment Portland - CEM I 42,5 R cu cenușă de termocentrală pentru creșterea lucrabilității pastei.
- Densitatea este puțin influențată de schimbarea tipului de agregate utilizat sau de raportul între materiile prime utilizate, cu / fără adaos de aditiv impermeabilizant în masă, păstrându-se în limitele proiectate, în intervalul  $1924 \text{ kg/m}^3 \pm 1\%$ .
- Absorbția de apă este puțin influențată de schimbarea tipului de agregate utilizat sau de raportul între materiile prime utilizate, cu / fără adaos de aditiv impermeabilizant în masă, încadrându-se, în intervalul  $6,75\% \pm 3\%$ .
- Rezistența întindere prin încovoiere pentru compozitele cementoase preparate cu nisip sort 0-4mm, cu / fără adaos de aditiv impermeabilizant în masă, crește pe măsură ce crește cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenușă de termocentrală, încadrându-se în intervalul  $16,1 \text{ N/mm}^2 \pm 3\%$ . În mod similar se observă o evoluție crescătoare a rezistenței la întindere prin încovoiere a matricilor cementoase preparate cu nisip standardizat.
- Rezistența la compresiune, determinată la vârsta de 28 zile de la turnare, pentru compozitele cementoase preparate cu nisip sort 0-4mm, cu / fără adaos de aditiv impermeabilizant în masă, se încadrează în limitele  $56,6 \text{ N/mm}^2 \pm 5\%$ , crescând odată cu creșterea vârsta. În mod similar se observă o rezistență la compresiune a matricilor cementoase preparate cu nisip standardizat în limitele  $55,8 \text{ N/mm}^2 \pm 4\%$ .

#### ▪ Capacitatea de auto-vindecare

Toate compozitele cementoase analizate prezintă un grad de vindecare totală sau parțială a fisurilor, care crește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscate și este direct influențat de deschiderea inițială a fisurii, cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenușă de termocentrală și existența aditivului de adaos impermeabilizant în masa matricei cementoase:

- compoziția  $TM_{\text{sort } 0-4}$  prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim  $61 \mu\text{m}$ , după 8 cicluri ud-uscate.
- compoziția T1 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim  $136 \mu\text{m}$ , după 8 cicluri ud-uscate.
- compoziția T2 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim  $85 \mu\text{m}$ , după 8 cicluri ud-uscate.
- compoziția T3 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim  $85 \mu\text{m}$ , după 8 cicluri ud-uscate.
- compoziția  $TM_{\text{nisip standard}}$  prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim  $68 \mu\text{m}$ , după 20 cicluri ud-uscate.
- compoziția T4 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim  $78 \mu\text{m}$ , după 20 cicluri ud-uscate.

- compoziția T5 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim 74  $\mu\text{m}$ , după 20 cicluri ud-uscat.
- compoziția T6 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim 60  $\mu\text{m}$ , după 4 cicluri ud-uscat.

**Capitolul 8** prezintă concluziile finale prin sublinierea concluziilor generale și prezentarea originalității și contribuțiilor inovative ale tezei. În cadrul acestei teme de cercetare obiectivul a fost de obținerea a unui beton cu proprietăți de auto-vindecare, acestea putând oferi o alternativă sustenabilă pentru reducerea costurilor de întreținere al infrastructurilor de transport, prin creșterea duratei de exploatare a infrastructurilor, prin reducerea necesității de realizare a lucrărilor de reparații și întreținere și prin reducerea poluării mediului.

Într-o perioadă în care atenția acordată impactului asupra mediului și a evidențierii problemelor datorate poluării urbane, industria construcțiilor va avea foarte mult de câștigat dacă se va alinia la noile tendințe din domeniu.

Deși este o temă care mai necesită multe cercetări, aceasta este cu succes implementată la realizarea unor infrastructuri de transport durabile, cu durată de viață crescută și costuri de exploatare reduse.

Drept consecință, prezenta temă, noutatea acesteia constând în explorarea unei alternative la producerea unui beton cu capacitate de auto-vindecare, prin utilizarea materiilor prime disponibile în România, va pune țara noastră în rândul celor care deja cercetează sau exploatează materiale inovative, performante, care deschid noi oportunități de implementare a conceptului de Dezvoltare Durabilă.

## **8.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei**

Cercetarea efectuată în cadrul tezei de doctorat aduce următoarele contribuții inovative:

- Partea centrală a cercetării a constat în dezvoltarea unui microbeton inovativ cu capacitatea de auto-vindecare.
- În prima etapă a activității de cercetare s-a realizat o analiză a stadiului actual al cercetărilor în domeniu, evidențindu-se elementele care la ora actuală sunt încă controversate sau necesită clarificări.
- În corelare cu analiza raportărilor din literatura de specialitate, s-a creat cadrul favorabil de creștere a durabilității lucrărilor specifice infrastructurii de transport prin identificarea oportunității de inovare



în ceea ce privește materialele cementoase destinate realizării acestui tip de lucrări.

- S-au trasat principalele linii directoare de studiu, în corelare cu disponibilitatea și caracteristicile specifice materiilor prime autohtone și cu focusare pe domeniul de utilizare preconizat.
- S-au proiectat și analizat opt compoziții de microbeton realizate cu materiale autohtone, cu capacitatea de auto-vindecare.
- S-a realizat un stand experimental de condiționare și de realizare al ciclurilor de ud-uscat (16 ore ud – 8 ore uscat).
- S-a analizată influența aditivului impermeabilizant de cristalizare în masa microbetonului asupra mecanismului de auto-vindecare și asupra performanțelor fizico-mecanice a acestuia.
- S-a stabilit cantitatea de aditiv impermeabilizant de cristalizare în masa a microbetonului pentru care s-a obținut cea mai eficientă viteză de închidere a fisurilor induse în epruvetele de microbeton de formă prismatică.
- S-a efectuat o analiză compozițională a produselor cementoase proiectate, care a contribuit la creșterea gradului de cunoaștere din punct de vedere a mecanismului de auto-vindecare.
- Din punct de vedere a impactului internațional, rezultatele cercetărilor efectuate au fost diseminate într-un număr de cinci prezentări orale în conferințe, șase postere, șase articole publicate în reviste indexate BDI, din care 1 articol publicat în reviste cotate ISI și un capitol de carte. În urma acestor activități de diseminare, s-au obținut zece premii și medalii. Toate acestea contribuie la creșterea gradului de cunoaștere în domeniul abordat.

### **8.3. Direcții viitoare de cercetare**

Direcțiile viitoare de cercetare în vederea realizării unui beton inovativ vor fi următoarele:

- Analiza din punct de vedere al impactului economic și stabilirea caracteristicilor compoziționale în vederea obținerii unui raport optim costuri / beneficii.
- Analiza posibilității de introducere în compoziția betonului inovativ a unor agregate naturale cu granulația mai mare, concomitent cu îmbunătățirea capacității de

închidere a fisurilor, respectiv, a caracteristicilor fizico-mecanice.

- Analiza posibilității de introducere în compoziția betonului inovativ a unor agregate concasate utilizate în mod curent pentru realizarea betonului rutier, concomitent cu păstrarea capacității de auto-vindecare.
- Analiza posibilității de introducere în compoziția betonului inovativ a unor agregate provenite din surse reciclate, concomitent cu păstrarea capacității de auto-vindecare a compoziției, creindu-se astfel oportunități de dezvoltare a gradului de implementare a principiilor Economiei Circulare.
- Analiza comportării în timp, prin studii de lungă durată, a compozite cimentoase studiate, atât din punct de vedere a mecanismului de auto-vindecare, cât și din punct de vedere a performanțelor fizico-mecanice.
- Realizarea unor elemente structurale și urmărirea comportării acestora, in situ, din punct de vedere performanțelor de auto-vindecare.
- Protejarea drepturilor de autor prin depunerea unei cereri de brevet de invenție național la OSIM.
- Analiza și realizarea transferului tehnologic la producător.

## REFERINȚE

1. Huseien, G.F.; Nehdi, M.L.; Faridmehr, I.; Ghoshal, S.K.; Hamzah, H.K.; Benjeddou, O.; Alrshoudi, F. Smart Bio-Agents-Activated Sustainable Self-Healing Cementitious Materials: An All-Inclusive Overview on Progress, Benefits and Challenges. *Sustainability* **2022**, *14*, 1980.
2. Coppola, L.; Beretta, S.; Bignozzi, M.C.; Bolzoni, F.; Brenna, A.; Cabrini, M.; Candamano, S.; Caputo, D.; Carsana, M.; Cioffi, R.; et al. The Improvement of Durability of Reinforced Concretes for Sustainable Structures: A Review on Different Approaches. *Materials* **2022**, *15*, 2728.
3. Coppola, L.; Bellezze, T.; Belli, A.; Bignozzi, M.C.; Bolzoni, F.; Brenna, A.; Cabrini, M.; Candamano, S.; Cappai, M.; Caputo, D.; et al. Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction—Part 1. *J. Appl. Biomater.Funct.Mater.* **2018**, *16*, 186–202.
4. Coppola, L.; Bellezze, T.; Belli, A.; Bignozzi, M.C.; Bolzoni, F.; Brenna, A.; Cabrini, M.; Candamano, S.; Cappai, M.; Caputo, D.; et al. Binders alternative to Portland cement and waste management for sustainable construction—Part 2. *J. Appl. Biomater.Funct.Mater.* **2018**, *16*, 207–221.
5. Aldea, C.-M.; Shah, S.; Karr, A. Permeability of cracked concrete. *Mater. Struct.* **1999**, *32*, 370–376.
6. Huseien, G.F.; Mirza, J.; Ismail, M.; Ghoshal, S.; Hussein, A.A. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *80*, 54–74.
7. Litina, C.; Bumanis, G.; Anglani, G.; Dudek, M.; Maddalena, R.; Amenta, M.; Papaioannou, S.; Pérez, G.; Calvo, J.G.; Asensio, E.; et al. Evaluation of Methodologies for Assessing Self-Healing Performance of Concrete with Mineral Expansive Agents: An Interlaboratory Study. *Materials* **2021**, *14*, 2024.
8. Van Mullem, T.; Anglani, G.; Dudek, M.; Vanoutrive, H.; Bumanis, G.; Litina, C.; Kwiecień, A.; Al-Tabbaa, A.; Bajare, D.; Stryzewska, T.; et al. Addressing the need for standardization of test methods for self-healing concrete: An inter-laboratory study on concrete with macrocapsules. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **2020**, *21*, 661–682.

9. Hermawan, H.; Minne, P.; Serna, P.; Gruyaert, E. Understanding the Impacts of Healing Agents on the Properties of Fresh and Hardened Self-Healing Concrete: A Review. *Processes* **2021**, *9*, 2206.
10. Zhang, Y.; Wang, R.; Ding, Z. Influence of Crystalline Admixtures and Their Synergetic Combinations with Other Constituents on Autonomous Healing in Cracked Concrete—A Review. *Materials* **2022**, *15*, 440.
11. INSTITUTUL NAȚIONAL DE STATISTICĂ, ROMÂNIA, Lungimea căilor de transport la sfârșitul anului 2018, Aprilie **2019**.
12. Blaiszik, B. J.; Kramer, S. L.; Olugebefola, S. C.; Moore, J. S.; Sottos, N. R.; White, S. R. Selfhealing polymers and composites. *Annual review of materials research*. **2010**, *40*, 179-211.
13. Rajczakowska, M.; Habermehl-Cwirzen, K.; Hedlund, H.; Cwirzen, A. Autogenous Self-Healing: A Better Solution for Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* **2019**, *31*(9), 0311900.
14. Andrew, R. M. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data*, **2018**, *10*, 195–217.
15. Roig-Flores, M.; Formagini, S.; Serna, P. Self-healing concrete-What Is it Good For?. *Mater. Construcc.* **2021**, *71* [341], e237.
16. Van Tittelboom, K.; De Belie, N. Self-healing in cementitious materials-A review. *Materials* **2013**, *6* [6], 2182-2217.
17. Souradeep, G.; Kua, H.W. Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. *J.Mater. Civ. Eng.* **2016**, *28* [12], 1-15.
18. De Belie, N.; Gruyaert, E.; Al-Tabbaa, A.; Antonaci, P.; Baera, C.; Bajare, D.; et al. A review of self-healing concrete for damage management of structures. *Adv. Mater. Inter.* **2018**, *5* [17].
19. Snoecka, D. Superabsorbent polymers to seal and heal cracks in cementitious materials. *RILEM Technical Letters*, **2018**, *3*: 32-38.
20. He, Z.; Shen, A.; Guo, Y.; Lyu, Z.; Li, D.; Qin, X.; et al. Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review. *Constr.Build.Mater.* **2019**, *225*, 569-590.
21. Snoeck, D.; Van den Heede, P.; Van Mullem, T.; De Belie, N. Water penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography. *Cem. Concr. Res.* **2018**, *113*, 86-98.

22. Mignon, A.; De Belie, N.; Dubruel, P.; Van Vlierberghe, S. Superabsorbent polymers: A review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and 'smart' derivatives. *Eur. Polym. J.* **2019**, *117*, 165-178.
23. Chandra Sekhara Reddy, T.; Ravitheja, A.; Sashidhar, C. Micromechanical Properties of Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture and Silica Fume *ACI Mater. J.* **2020**, *V. 117*, No. 3.
24. Gojević, A.; Ducman, V.; Netinger Grubeša, I.; Baričević, A.; Banjad Pečur, I. The Effect of Crystalline Waterproofing Admixtures on the Self-Healing and Permeability of Concrete. *Materials* **2021**, *14*, 1860.
25. Chandra Sekhara Reddy, T.; Ravitheja, A.; Sashidhar, C. Self-Healing Ability of High-Strength Fibre-Reinforced Concrete with Fly Ash and Crystalline Admixture. *J. Civ. Eng.*, Vol. 4, No. 5, May, **2018**, 971-979.
26. Kanellopoulos, A.; Giannaros, P.; Palmer, D.; Kerr, A.; Al-Tabbaa, A. Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: synthesis, characterisation and proof of concept. *Smart Mater. Struct.* **2017**, *26*, 045025.
27. Al-Tabbaa, A.; Litina, C.; Giannaros, P.; Kanellopoulos, A.; Souza, L. First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *208*, 669-685.
28. Anbarlouie, M.; Mahdikhani, M.; A. Maleki. The contribution of encapsulated polyurethane adhesive in improving the static torsional resistances of self-healing concrete beam comparing bonded FRP technique. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *191*, 904-911.
29. De Nardi, C.; Gardner, D.; Cazzador, G.; Cristofori, D.; Ronchin, L.; Vavasori, A.; Jefferson, T. Experimental Investigation of a Novel Formulation of a Cyanoacrylate-Based Adhesive for Self-Healing Concrete Technologies. *Front. Built Environ.* **2021**, *7*:660562.
30. Susanto, A. S.; Hardjito, D.; Antoni, A. Review of autonomous self-healing cementitious material. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **2021**, *907*, 012006.
31. Kim, H.; Son, H.M. Effects of Air Entrainment on Bacterial Viability in Cement Paste. *Materials* **2022**, *15*, 2163.

32. Jang, I.; Son, D.; Son, Y.; Min, J.; Yi, C. Use of Methylcellulose-Based Pellet to Enhance the Bacterial Self-Healing of Cement Composite. *Materials* **2021**, *14*, 6113.
33. Sumathi, A.; , Murali, G.; Gowdhaman, D.; Amran, M.; Roman Fediuk, R.; Vatin, I. N.; Laxme, D. R.; Gowsika, S. T. Development of Bacterium for Crack Healing and Improving Properties of Concrete under Wet-Dry and Full-Wet Curing. *Sustainability* **2020**, *12*, 10346.
34. Xu, H.; Lian, J.; Gao, M.; Fu, D.; Yan, Y. Self-Healing Concrete Using Rubber Particles to Immobilize Bacterial Spores. *Materials* **2019**, *12*, 2313.
35. Luhar, S.; Luhar, I.; Shaikh, F.U.A. A Review on the Performance Evaluation of Autonomous Self-Healing Bacterial Concrete: Mechanisms, Strength, Durability, and Microstructural Properties. *J. Compos. Sci.* **2022**, *6*, 23.
36. Hermawan, H.; Minne, P.; Serna, P.; Gruyaert, E. Understanding the Impacts of Healing Agents on the Properties of Fresh and Hardened Self-Healing Concrete: A Review. *Processes* **2021**, *9*, 2206.
37. Alshalif, A.F.; Irwan, J.M.; Tajarudin, H.A.; Othman, N.; Al-Gheethi, A.A.; Shamsudin, S.; Altowayti, W.A.H.; Abo Sabah, S. Optimization of Bio-Foamed Concrete Brick Strength via Bacteria Based Self-Healing and Bio-Sequestration of CO<sub>2</sub>. *Materials* **2021**, *14*, 4575.
38. Jakubovskis, R.; Jankute, A.; Guobužaite, S.; Boris, R.; Urbonavičius, J. Prolonging Bacterial Viability in Biological Concrete: Coated Expanded Clay Particles. *Materials* **2021**, *14*, 2719.
39. Chuo, C. S.; Mohamed, F. S.; Setapar, M. H. S.; Ahmad, A.; Jawaid, M.; Wani, W.; Yaqoob, A. A.; Ibrahim, M. N. M. Insights into the Current Trends in the Utilization of Bacteria for Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation. *Materials* **2020**, *13*, 4993.
40. Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; De Muynck, W.; Verstraete, W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cem. Concr. Res.* **2010**, *40*, 157–166.
41. Danish, A.; Ali Mosaberpanah, A. M.; Salim, U. M. Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments. *J. Mater. Res. Technol.* **2020**, *9*(3):6883-6899.

42. Li, V. C.; Herbert, E. Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *J. Adv. Concr. Technol.* **2012**, 10:207–18.
43. Souradeep, G.; Kua, H. W. Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. *J. Mater. Civil. Eng.* **2016**, 28:04016165.
44. Byoungsun, P; Young CC. Investigating a new method to assess the self-healing performance of hardened cement pastes containing supplementary cementitious materials and crystalline admixtures. *J. Mater. Res. Technol.* **2019**, 8:6058–73.
45. De Rooij, M.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Schlangen, E. Self-healing phenomena in cement-based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: Self-Healing phenomena in cement-Based materials, *Springer* **2013**, vol. 11.
46. Wu, M.; Johannesson, B.; Geiker, M. A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Constr. Build. Mater.* **2012**; 28:571–83.
47. Talaiekhazan, A.; Keyvanfar, A.; Shafaghat A.; Andalib R.; Majid M. A.; Fulazzaky M.A.; et al. A review of self-healing concrete research development. *J. Environ. Treat. Tech.* **2014**, 2:1–11.
48. Rajczakowska, M.; Nilsson, L.; Habermehl-Cwirzen, K.; Hedlund, H.; Cwirzen, A. Does a High Amount of Unhydrated Portland Cement Ensure an Effective Autogenous Self-Healing of Mortar? *Materials* **2019**, 12, 3298.
49. Roig-Flores, M.; Serna, P. Concrete early-age crack closing by autogenous healing. *Sustain.* **2020**, 12 [11], 4476.
50. Yildirim, G.; Khiavi, A.H.; Yeşilmen, S.; Şahmaran M. Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cem. Concr. Compos.* **2018**, 87, 172-186.
51. Snoeck, D.; De Belie, N. Repeated autogenous healing in strain-hardening cementitious composites by using superabsorbent polymers. *J. Mater. Civ. Eng.* **2016**, 28 [1], 1-11.
52. Morsali, S., Yucel Isildar, G., Hamed Zar gari, Z. et al. The application of bacteria as a main factor in self-healing concrete technology. *J. Build. Rehabil.* 4, **2019**, 7.



53. Desmettre, C.; Charron, J.P. (2012) Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading. *Cem Concr Res.* **2012**, 42 [7], 945-952.
54. Nishiwaki, T.; Kwon, S.; Homma, D.; Yamada, M.; Mihashi, H. Self-healing capability of fiberreinforced cementitious composites for recovery of watertightness and mechanical properties. *Materials* **2014**, 7 [3], 2141-2154.
55. Plagué, T.; Desmettre, C.; Charron, J.P. Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading. *Cem. Concr. Res.* **2017**, 94, 59-70.
56. Van Tittelboom, K.; Gruyaert, E.; Rahier, H.; De Belie, N. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. *Constr. Build. Mater.* **2012**, 37, 349-359.
57. Darquennes, A.; Olivier, K.; Benboudjema, F.; Gagné, R. Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials. *Constr. Build Mater.* **2016**, 113, 1017-1028.
58. Zhou, Z.H.; Li, Z.Q.; Xu, D.J.; Yu, J.H. Influence of slag and fly ash on the self-healing ability of concrete. *Advan. Mater. Research.* **2011**, 306-307, 1020-1023.
59. Na, S.H.; Hama, Y.; Taniguchi, M.; Katsura, O.; Sagawa, T.; Zakaria, M. Experimental investigation on reaction rate and self-healing ability in fly ash blended cement mixtures. *J. Adv. Concr. Technol.* **2012**, 10 [7], 240-253.
60. Sangadji, S. Can self-healing mechanism helps concrete structures sustainable? *Procedia Eng.* **2017**, 171, 238-249.
61. Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Koenders, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cem. Concr. Compos.* **2012**, 34[4], 566-574.
62. Wang, X.F.; Yang, Z.H.; Fang, C.; Han, N.X.; Zhu, G.M.; Tang, J.N.; et al. Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious

- materials - its methods and future development: A review. *Constr. Build Mater.* **2019**, 212, 400-421.
63. Basheer, L.; Kropp, J.; Cleland, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review. *Constr. Build. Mater.* **2001**, 15 93-103.
64. Suleiman, A.R.; Nehdi, M.L. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. *Cem. Concr. Res.* **2018**, 111, 197-208.
65. Zhang, W.; Zheng, Q.; Ashour, A.; Han, B. 2020 Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. *Compos. Part B Eng.* **2020**, 189, 107892.
66. Zhang, W.; Wang, D.; Han, B. 2019 Self-healing concrete-based composites, *Elsevier* **2019**, books.google.com.
67. Alghamri, R.; Kanellopoulos, A.; Litina, C.; Al-Tabbaa, A. Preparation and polymeric encapsulation of powder mineral pellets for self-healing cement based materials *Constr. Build. Mater.* **2018**, 186, 247-62.
68. Alghamri, R.; Kanellopoulos, A.; Al-Tabbaa, A. Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete *Constr. Build. Mater.* **2016**, 124, 910-21.
69. Dong, B.; Fang, G.; Wang, Y.; Liu, Y.; Hong, S.; Zhang, J.; Lin, S.; Xing, F. Performance recovery concerning the permeability of concrete by means of a microcapsule based self-healing system *Cem. Concr. Compos.* **2017**, 78, 84-96.
70. Dybel, P.; Kucharska, M. New generation concretes - Properties and applications *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2019**, 603.
71. Souradeep, G.; Kua, H. W. Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* **2016**, 28, 04016165.
72. Snoeck, D.; De Belie, N. Autogenous healing in strain-hardening cementitious materials with and without superabsorbent polymers: An 8-year study. *Front. Mater.* **2019**, 6, 48.
73. Mircea, C.; Toader, T.-P.; Hegyi, A.; Ionescu, B.-A.; Mircea, A. Early Age Sealing Capacity of Structural Mortar with Integral Crystalline Waterproofing Admixture. *Materials.* **2021**, 14, 4951.
74. Roig-Flores, M.; Moscato, S.; Serna, P.; Ferrara, L. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Constr. Build. Mater.* **2015**, 86, 1-11.

75. Roig-Flores, M.; Pirritano, F.; Serna, P.; Ferrara, L. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Constr. Build. Mater.* **2016**, 114, 447–457.
76. Buller, A.S.; Abro, F.R.; Lee, K.M.; Jamg, S.Y. Mechanical Recovery of Cracked Fiber-Reinforced Mortar Incorporating Crystalline Admixture, Expansive Agent, and Geomaterial. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2019**, 3420349.
77. Park, B.; Choi, Y.C. Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs). *Constr. Build. Mater.* **2018**, 189, 1054–1066.
78. Azarsa, P.; Gupta, R.; Biparva, A. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. *Cem. Concr. Compos.* **2019**, 99, 17–23.
79. Li, D.; Chen, B.; Chen, X.; Fu, B.; Wei, H.; Xiang, X. Synergetic effect of superabsorbent polymer (SAP) and crystalline admixture (CA) on mortar macro-crack healing. *Constr. Build. Mater.* **2020**, 247, 118521.
80. Azarsa, P.; Gupta, R.; Biparva, A. Crystalline Waterproofing Admixtures Effects on Self-healing and Permeability of Concrete. *1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering (NHICE-01), Victoria, BC, Canada, April 25 – 27, 2018*.
81. Guzlina, S.; Sakale, G. Self-healing concrete with crystalline admixture – a review. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2019**, 660 012057.
82. American Concrete Institute Committee 212. Report on Chemical Admixtures for concrete. **2010**, (ACI 212.3R-10).
83. Ferrara, L.; Krelani, V.; Moretti, F. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing. *Smart Mater. Struct.* **2016**, 25, 084002 (17pp).
84. Wang, X.; Fang, C.; Li, D.; Han, N.; Xing, F. A self-healing cementitious composite with mineral admixtures and built-in carbonate. *Cem. Concr. Compos.* **2018**, vol. 92, pp. 216–229.
85. Jiang, Z.; Li, W.; Yuan, Z.; Yang, Z. Self-healing of cracks in concrete with various crystalline mineral additives in underground environment. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* **2014**, vol. 29, no. 5, pp. 938–944.

86. Cuenca, E.; Tejedor, A.; Ferrara, L. A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. *Constr. Build. Mater.* **2018**, vol. 179, pp. 619–632.
87. Escoffres, P.; Desmettre, C.; Charon, J. P. Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions. *Constr. Build. Mater.* **2018**, vol.173, pp. 763–774.
88. Ferrara L, Krelani V and Carsana M, A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures, *Constr. Build. Mater.* **2014**, vol. 68, pp. 535–551.
89. Coppola L, Coffetti D and Crotti E, Innovative carboxylic acid water proofing admixture for self-sealing watertight concretes. *Constr. Build. Mater.* **2018**, vol. 171, pp. 817–824.
90. Amran, M.; Onaizi, A. M.; Fediuk, R.; Vatin, N. I.; Muhammad Rashid, R. S.; Abdelgader, H.; Ozbakkaloglu, T. Self Healing Concrete as a Prospective Construction Material : A Review. *Materials* **2022**, *15*, 3214.
91. Saleh Salem Beshr, B.; Abdul Mohaimen, I.M.; Noor Azline, M.N.; Nor Azizi, S.; Nabilah, A.B.; Farah Nora Aznieta, A.A. Feasibility assessment on self-healing ability of cementitious composites with MgO. *J. Build. Eng.* **2021**, *34*, 101914.
92. Hosoda, A.; Komatsu, S.; Ahn, T.; Kishi, T.; Ikeno, S.; Kobayashi, K. Self healing properties with various crack widths under continuous water leakage. In *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR, Cape Town, South Africa, 24–26 November 2008*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, **2009**. pp. 121–122.
93. Ahn, T.H.; Kishi, T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures. *J. Adv. Concr. Technol.* **2010**, *8*, 171–186.
94. Termkhajornkit, P.; Nawa, T.; Yamashiro, Y.; Saito, T. Self-healing ability of fly ash-cement systems. *Cem. Concr. Compos.* **2009**, *31*, 195–203.
95. Qureshi, T.; Kanellopoulos, A.; Al-Tabbaa, A. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *192*, 768–784.

96. Jiang, Z.; Li, W.; Yuan, Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.* **2015**, *57*, 116–127.
97. Watanabe, T.; Fujiwara, Y.; Hashimoto, C.; Ishimaru, K. Evaluation of self healing effect in fly-ash concrete by ultrasonic test method. *Int. J. Mod. Phys. B.* **2011**, *25*, 4307–4310.
98. Qian, S.Z.; Zhou, J.; Schlangen, E. Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. *Cem. Concr. Compos.* **2010**, *32*, 686–693.
99. Huang, H.; Ye, G.; Damidot, D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* **2014**, *60*, 68–82.
100. Alazhari, M.S.A. The Effect of Microbiological Agents on the Efficiency of Bio-Based Repair Systems for Concrete. Ph.D. Thesis, University of Bath, Bath, UK, 2017. Volume 294.
101. Qureshi, T.S.; Al-Tabbaa, A. Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO. *Smart. Mater. Struct.* **2016**, *25*, 084004.
102. Tolstoy, A.; Lesovik, V.; Fediuk, R.; Amran, M.; Gunasekaran, M.; Vatin, N.; Vasilev, Y. Production of greener high-strength concrete using russian quartz sandstone mine waste aggregates. *Materials* **2020**, *13*, 5575.
103. Lee, Y.S.; Ryou, J.S. Self healing behavior for crack closing of expansive agent via granulation/film coating method. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *71*, 188–193.
104. Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Fraaij, A. Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a self-healing agent in blast furnace slag mortar. *Heron* **2011**, *56*, 17–36.
105. Pang, B.; Zhou, Z.; Hou, P.; Du, P.; Zhang, L.; Xu, H. Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *107*, 191–202.
106. Antiohos, S.K.; Papageorgiou, A.; Papadakis, V.G.; Tsimas, S. Influence of quicklime addition on the mechanical properties and hydration degree of blended cements containing different fly ashes. *Constr. Build. Mater.* **2008**, *22*, 1191–1200.
107. Yao, Y.; Zhu, Y.; Yang, Y. Incorporation of SAP particles as controlling pre-existing flaws to improve the performance of ECC. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *28*(1), 139–145.

108. Lee, H. X. D.; Wong, H. S.; Buenfeld, N. R. Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete. *Adv. Appl. Ceram.* **2010**, 109(5), 296–302.
109. Snoeck, D. Superabsorbent polymers to seal and heal cracks in cementitious materials, *RILEM Technical Letters*, **2018**, 3: 32-38.
110. Mechtcherine V. et al. Testing superabsorbent polymer (SAP) absorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test, *Mater. Struct.*, **2018**, 51:28.
111. Schröfl, C.; Snoeck, D.; Mechtcherine, V. A review of characterization methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials - Report of the RILEM TC 260- RSC. *Mater. Struct.*, **2017**, 50(197): 1-19.
112. Buchholz, F.L.; Graham, A.T. Modern superabsorbent polymer technology. *Wiley-VCH*, New-York, **1998**.
113. Mechtcherine, V.; Reinhardt, H.W., Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction, State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP. *Springer*, **2012**, p. 165.
114. Jensen, O.M.; Hansen, P.F. Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. *Cem. Concr. Res.*, **2001**, 31(4): 647-654.
115. Jensen, O.M.; Hansen, P.F. Water-entrained cement-based materials II. Experimental observations. *Cem. Concr. Res.*, **2002**, 32(6): 973-978.
116. Mechtcherine, V. et al., Effect of Internal Curing by Using Superabsorbent Polymers (SAP) on Autogenous Shrinkage and Other Properties of a High-performance Fine-grained Concrete: Results of a RILEM Round-robin Test, TC 225-SAP. *Mater. Struct.*, **2014**, 47(3): 541-562.
117. Snoeck, D.; Jensen, O.M.; De Belie, N. The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. *Cem. Concr. Res.*, **2015**, 74: 59-67.
118. Snoeck, D.; Pel, L.; De Belie, N. The water kinetics of superabsorbent polymers during cement hydration and internal curing visualized and studied by NMR. *Sci. Rep.*, **2017**, 7(9514).

119. Snoeck, D.; Pel L.; De Belie, N. Superabsorbent polymers to mitigate plastic drying shrinkage in a cement paste as studied by NMR. *Cem. Concr. Comp.*, **2018**, 93: 54-62.
120. Mechtcherine, V.; Schröfl, C.; Wyrzykowski, M.; Gorges, M.; Cusson, D.; Margeson, J.; De Belie, N.; Snoeck, D.; Ichimiya, K.; Igarashi, S.I.; Falikman, V.; Friedrich, S.; Bokern, J.; Kara, P.; Lura, P.; Marciniak, A.; Reinhardt, H.-W.; Sippel, S.; Ribeiro, A.B.; Custódio, J.; Dong, G. Ye, H.; Weiss J. Effect of superabsorbent polymers (SAP) on the freeze-thaw resistance of concrete: results of a RILEM interlaboratory test. *Mater. Struct.*, **2017**, 50(14): 1-19.
121. Nestle, N.; Kühn, A.; Friedemann, K.; Horch, C.; Stallmach, F.; Herth, G. Water balance and pore structure development in cementitious materials in internal curing with modified superabsorbent polymers studied by NMR. *Microporous Mesoporous Mater.*, **2009**, 125(1-2): 51-57.
122. Trtik, P.; Muench, B.; Weiss, W.J.; Herth, G.; Kaestner, A.; Lehmann, E.; Lura, P. Neutron tomography measurements of water release from superabsorbent polymers in cement paste, in: W. Brameshuber (Ed.) International RILEM Conference on Material Science, *RILEM Publications S.A.R.L., Aachen*, **2010**, pp. 175-185
123. Snoeck, D.; Velasco, L.F.; Mignon, A.; Van Vlierberghe, S.; Dubruel, P.; Lodewyckx, P.; De Belie, N. The effects of superabsorbent polymers on the microstructure of cementitious materials studied by means of sorption experiments. *Cem. Concr. Res.* (2015) 77: 26-35.
124. Snoeck, D.; Schaubroeck, D.; Dubruel, P.; De Belie, N. Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50. *Constr. Build. Mater.*, **2014**, 72: 148-157.
125. Hasholt, M.T.; Jensen, O.M.; Kovler, K.; Zhutovsky, S. Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength?. *Constr. Build. Mater.*, **2012**, 31: 226-230.
126. Gruyaert, E.; Debbaut, B.; Snoeck, D.; Díaz, P.; Arizo, A.; Tziviloglou, E.; Schlangen, E.; De Belie, N. Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: testing of the



- sealing efficiency of selfhealing mortars by water flow tests. *Smart Mater. Struct.*, **2016**, 25(8) 084007: 1-11.
127. Mignon, A.; Snoeck, D.; Schaubroeck, D.; Luickx, N.; Dubruel, P.; Van Vlierberghe, S.; De Belie, N. pH-responsive superabsorbent polymers: A pathway to self-healing of mortar. *React. Funct. Polym.*, **2015**, 93: 68-76.
  128. Pelto, J.; Leivo, M.; Gruyaert, E.; Debbaut, B.; Snoeck, D.; De Belie, N. Application of encapsulated superabsorbent polymers in cementitious materials for stimulated autogenous healing. *Smart. Mater. Struct.*, **2017**, 26(10): 1-14.
  129. Lee, H.X.D.; Wong, H.S.; Buenfeld, N.R. Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete. *Adv. Appl. Ceram.*, **2010**, 109(5): 296-302.
  130. Lee, H.X.D.; Wong, H.S.; Buenfeld, N.R. Self-sealing cement-based materials using superabsorbent polymers, in: O.M. Jensen, M.T. Hasholt, S. Laustsen (Eds.) International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, *RILEM Publications SARL, Lyngby*, **2010**, pp. 171-178.
  131. Lee, H.X.D.; Wong, H.S.; Buenfeld, N.R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cem. Concr. Res.*, **2016**, 79: 194-208.
  132. Snoeck, D.; Steuperaert, S.; Van Tittelboom, K.; Dubruel, P.; De Belie, N. Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography. *Cem. Concr. Res.*, **2012**, 42(8): 1113-1121.
  133. Snoeck, D.; Malm, F.; Cnudde, V.; Grosse, C.U.; Van Tittelboom, K. Validation of Self-Healing Properties of Construction Materials through Non-Destructive and Minimal Invasive Testing. *Adv. Mater. Interf.*, **2018**, 1800179.
  134. Snoeck, D.; Van Tittelboom, K.; Steuperaert, S.; Dubruel, P.; De Belie, N. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, **2014**, 25(1): 13-24.
  135. Snoeck, D. Self-Healing and Microstructure of Cementitious Materials with Microfibres and Superabsorbent Polymers, *Struct. Eng.*, Ghent University, Ghent, **2015**, p. 364.
  136. Van Tittelboom, K.; Wang, J.; Gomes De Araújo, M.A.; Snoeck D.; Gruyaert, E.; Debbaut, B.; Derluyn, H.; Cnudde, V.; Tsangouri, E.; Van Hemelrijck, D.; De Belie, N. Comparison of different

- approaches for selfhealing concrete in a large-scale lab test. *Constr. Build. Mater.*, **2016**, 108: 125-137.
137. Hong, G.; Choi, S. Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers. *Constr. Build. Mater.*, **2017**, 143: 366-375.
  138. Hong, G.; Choi, S. Modeling rapid self-sealing of cracks in cementitious materials using superabsorbent polymers. *Constr. Build. Mater.*, **2018**, 164: 570-578.
  139. Rodríguez, C. R.; Figueiredo, S. C.; Schlangen, E.; Snoeck, D. Modeling water absorption in cement-based composites with SAP additions, in: G. Meschke, B. Pickler, J.G. Rots (Eds.) EURO-C 2018: Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures, Bad Hofgastein, **2018**, pp. 142, 1-10.
  140. Snoeck, D.; Dewanckele, J.; Cnudde, V.; De Belie, N. X-ray computed microtomography to study autogenous healing of cementitious materials promoted by superabsorbent polymers. *Cem. Concr. Comp.*, **2016**, 65: 83-93.
  141. Snoeck, D.; Criel, P. Voronoi diagrams and self-healing cementitious materials: a perfect match. *Adv. Cem. Res.*, **2019**, Volume 31, Issue 6, pp. 261-269.
  142. Demo, P.; Preucil, F.; Prošek, Z.; Tichá, P.; Domonkos, M. Self-Healing of Cementitious Materials via Bacteria: A Theoretical Study, *Crystals*, **2022**, 12, 920.
  143. Seifan, M.; Sarabadani, Z.; Berenjian, A. Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation to Design a New Type of Bio Self-Healing Dental Composite. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2020**, 104, 2029–2037.
  144. Tang, C.-S.; Yin, L.; Jiang, N.; Zhu, C.; Zeng, H.; Li, H.; Shi, B. Factors Affecting the Performance of Microbial-Induced Carbonate Precipitation (MICP) Treated Soil: A Review. *Environ. Earth Sci.* **2020**, 79, 94.
  145. Jiang, N.; Tang, C.; Hata, T.; Courcelles, B.; Dawoud, O.; Singh, D.N. Bio-mediated Soil Improvement: The Way Forward. *Soil Use Manag.* **2020**, 36, 185–188.
  146. Almajed, A.; Lateef, M.A.; Moghal, A.A.B.; Lemboye, K. State-of-the-Art Review of the Applicability and Challenges of Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) and Enzyme-Induced Calcite Precipitation (EICP) Techniques for Geotechnical and Geoenvironmental Applications. *Crystals* **2021**, 11, 370.

147. Liu, J.; Li, G.; Li, X. Geotechnical Engineering Properties of Soils Solidified by Microbially Induced CaCO<sub>3</sub> Precipitation (MICP). *Adv. Civ. Eng.* **2021**, *6683930*.
148. Deng, X.; Li, Y.; Liu, H.; Zhao, Y.; Yang, Y.; Xu, X.; Cheng, X.; Wit, B. de Examining Energy Consumption and Carbon Emissions of Microbial Induced Carbonate Precipitation Using the Life Cycle Assessment Method. *Sustainability*, **2021**, *13*, 4856.
149. Marvasi, M.; Mastromei, G.; Perito, B. Bacterial Calcium Carbonate Mineralization in Situ Strategies for Conservation of Stone Artworks: From Cell Components to Microbial Community. *Front. Microbiol.* **2020**, *11*, 1386.
150. Ortega-Morales, B.O.; Gaylarde, C.C. Bioconservation of Historic Stone Buildings—An Updated Review. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 5695.
151. Yatish Reddy, P.V.; Ramesh, B.; Prem Kumar, L. Influence of Bacteria in Self Healing of Concrete—A Review. *Mater. Today Proc.* **2020**, *33*, 4212–4218.
152. Su, Y.; Zheng, T.; Qian, C. Application Potential of Bacillus Megaterium Encapsulated by Low Alkaline Sulphoaluminate Cement in Self-Healing Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *273*, 121740.
153. Rong, H.; Wei, G.; Ma, G.; Zhang, Y.; Zheng, X.; Zhang, L.; Xu, R. Influence of Bacterial Concentration on Crack Self-Healing of Cement-Based Materials. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *244*, 118372.
154. Justo-Reinoso, I.; Heath, A.; Gebhard, S.; Paine, K. Aerobic Non-Ureolytic Bacteria-Based Self-Healing Cementitious Composites: A Comprehensive Review. *J. Build. Eng.* **2021**, *42*, 102834.
155. Sri Durga, C.S.; Ruben, N.; Sri Rama Chand, M.; Indira, M.; Venkatesh, C. Comprehensive Microbiological Studies on Screening Bacteria for Self-Healing Concrete. *Materialia*, **2021**, *15*, 101051.
156. Mondal, S.; Ghosh, A. Review on Microbial Induced Calcite Precipitation Mechanisms Leading to Bacterial Selection for Microbial Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *225*, 67–75.
157. Al-Salloum, Y.; Hadi, S.; Abbas, H.; Almusallam, T.; Moslem, M.A. Bio-Induction and Bioremediation of Cementitious Composites Using Microbial Mineral Precipitation—A Review. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *154*, 857–876.

158. Luo, M.; Jing, K.; Bai, J.; Ding, Z.; Yang, D.; Huang, H.; Gong, Y. Effects of Curing Conditions and Supplementary Cementitious Materials on Autogenous Self-Healing of Early Age Cracks in Cement Mortar. *Crystals*, **2021**, *11*, 752.
159. Kumar Jogi, P.; Vara Lakshmi, T.V.S. Self Healing Concrete Based on Different Bacteria: A Review. *Mater. Today Proc.* **2021**, *43*, 1246–1252.
160. Brasileiro, P.P.F.; Brandao, Y.B.; Sarubbo, L.A.; Benachour, M. Self-Healing Concrete: Background, Development, and Market Prospects. *Biointerface Res. Appl. Chem.* **2021**, *11*, 14709–14725.
161. Luhar, S.; Luhar, I.; Shaikh, F.U.A. A Review on the Performance Evaluation of Autonomous Self-Healing Bacterial Concrete: Mechanisms, Strength, Durability, and Microstructural Properties. *J. Compos. Sci.* **2022**, *6*, 23.
162. FarhayuAriffin, N.; WaridHussin, M.; Sam, A.R.M.; Lee, H.S.; Hafizah, N.; Khalid, A.; Lim, N.H.A.S. Mostafa Samadi. *J. Teknol.* **2015**, *12*, 37–44.
163. Dong, B.; Wang, Y.; Fang, G.; Han, N.; Xing, F.; Lu, Y. Smart releasing behavior of a chemical self-healing microcapsule in the stimulated concrete pore solution. *Cem. Concr. Compos.* **2015**, *56*, 46–50.
164. Kua, H. Integrated policies to promote sustainable use of steel slag for construction—a consequential life cycle embodied energy and greenhouse gas emission perspective. *Energy Build.* **2015**, *101*, 133–143.
165. Kua, H.W.; Kamath, S. An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. *J. Clean. Prod.* **2014**, *81*, 190–200.
166. Gupta, S.; Kua, H.W. Factors determining the potential of biochar as a carbon capturing and sequestering construction material: Critical review. *J. Mater. Civ. Eng.* **2017**, *29*, 04017086.
167. Souradeep, G.; Kua, H.W. Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete, *J. Mater. in Civil Eng.*, **2016**, *28* (12):4016165.
168. Thao, T. D. P. Quasi-Brittle self-healing materials: Numerical modelling and applications in civil engineering. Ph.D. dissertation, National Univ. of Singapore, Singapore, **2011**.
169. Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Van Loo, D.; Jacobs, P. Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular

- capsules filled with healing agent. *Cem. Concr. Compos.*, **2011**, 33(4), 497–505.
170. Joseph, C.; Jefferson, A.; Cantoni, M. Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials. Proc., 1st Int. Conf. On Self-Healing Materials, *Springer*, **2007**, Netherlands, 1–8.
  171. Joseph, C.; Jefferson, A.; Isaacs, B.; Lark, R.; Gardner, D. Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Mag. Concr. Res.*, **2010**, 62(11), 831–843.
  172. Van Tittelboom, K.; De Belie, N. Self-healing concrete: Suitability of different healing agents. *Int. J. 3R's*, **2010**, 1(1), 12–21.
  173. Sun, L.; Yu, W. Y.; Ge, Q. Experimental research on the selfhealing performance of micro-cracks in concrete bridge. *Adv. Mater. Res.*, **2011**, 250, 28–32.
  174. Li, V. C.; Lim, Y. M.; and Chan, Y.-W. Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. *Compos. Part B: Eng.*, **1998**, 29(6), 819–827.
  175. De Rooij, M. R.; Qian, S.; Liu, H.; Gard, W. F.; Van de Kuilen, J.W. G. Using natural wood fibers to self heal concrete. Proc., 2nd Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Alexander et al., eds., Taylor and Francis, London, **2009**, 123–124.
  176. Liu, H., et al. Self-healing of concrete cracks using hollow plant fibres. *Proc., 2nd Int. Conf. on Self-Healing Materials*, Chicago, **2009**.
  177. Jung, D. Performance and properties of embedded microspheres for self-repairing applications. Ph.D. dissertation, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL., **1997**.
  178. Mihashi, H.; Kaneko, Y.; Nishiwaki, T.; Otsuka, K. Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength. *Trans. Jpn. Concr. Inst.*, **2001**, 22, 441–450.
  179. Feng, X., et al. Self-healing mechanism of a novel cementitious composite using microcapsules. *Proc., Int. Conf. on Durability of Concrete Structures*, Zhejiang Univ., Hangzhou, China, **2008**.
  180. Kaltzakorta, I.; Erkizia, E. Silica microcapsules encapsulating epoxy compounds for self-healing cementitious materials. *Proc., 3rd Int. Conf. on Self Healing Materials*, Univ. of Bristol, Bristol, U.K., **2011**, 27–29.

181. Mihashi, H.; Kaneko, Y.; Nishiwaki, T.; Otsuka, K. Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength. *Trans. Jpn. Concr. Inst.*, **2001**, 22: 441–450.
182. Van Tittelboom, K.; Tsangouri, E.; Van Hemelrijck, D.; De Belie, N. The efficiency of self-healing concrete using alternative manufacturing procedures and more realistic crack patterns. *Cem. Concr. Compos.*, **2015**, 57: 142–152.
183. Mookhoek, S. D. Novel routes to liquid-based self-healing polymer systems Ph.D. dissertation, Delft Univ. of Technology, Delft, Netherlands. **2010**.
184. Mookhoek, S. D.; Fischer, H. R.; Van der Zwaag, S. A numerical study into the effects of elongated capsules on the healing efficiency of liquid-based systems. *Comput. Mater. Sci.*, **2009**, 47(2): 506–511.
185. Zhang, M.Q.; Rong, M.Z. *Self-healing Polymers and Polymer Composites*, Wiley, **2011**.
186. Zhang, M.Q.; Rong, M.Z. Intrinsic self-healing of covalent polymers through bond reconnection towards strength restoration. *Polym. Chem.* **2013**, 4 (18): 4878-4884.
187. Saeed, M.-U.; Chen, Z.F.; Li, B.B. Manufacturing strategies for microvascular polymeric composites: a review. *Compos. Part A* **78**, **2015**, pp. 327-340.
188. Zhu, D.Y.; Rong, M.Z.; Zhang, M.Q. Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: from design to preparation. *Prog. Polym. Sci.*, **2015**, pp.49-50, pp.175-220.
189. Dry, C. Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials. *Compos Struct.* **1996**, 35 (3) : 263-269.
190. Yue, H.-B.; Fernandez-Blazquez, J.P.; Beneito, D.F.; Vilatela, J.J. Real time monitoring of click chemistry self-healing in polymer composites. *J. Mater Chem. A2* (11) , **2014**, pp. 3881-3887.
191. Bond, I.P. Self-repairing hollow fibre composites. *Reinf. Plast.* **48**, **2004** (8), 16.
192. Trask, R.S.; Bond, I.P. Biomimetic self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres. *Smart Mater. Struct.* **2006**, 15 (3): 704-710.
193. Hucker, M.; Bond, I.; Foreman, A.; Hudd, J. Optimisation of hollow glass fibres and their composites. *Adv. Compos. Lett.* **1999**, 8 (4):181-189.

194. Pang, J.W.C.; Bond, I.P. A hollow fiber reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility. *Compos. Sci. Technol.* **2005**, 65(11-12): 1791-1799.
195. Kling, S.; Czigany, T. Damage detection and self-repair in hollow glass fiber fabric-reinforced epoxy composites via fiber filling. *Compos. Sci. Technol.* **2014**, 99, pp.82-88.
196. Kling, S.; Czigany, T. Analysis of applicability of the hollow carbon fibres for self-repairing composites. *Mater. Sci. Forum.* **2013**, 729 pp.246-251.
197. Williams, H.R.; Trask, R.S.; Bond, I.P. Self-healing composite sandwich structures, *Smart Mater. Struct.* **2007**, 16(4): 1198-1207.
198. Williams, H.R.; Trask, R.S.; Bond, I.P. Self-healing sandwich panels: restoration of compressive strength after impact. *Compos. Sci. Technol.*, **2008**, 68 (15-16): 3171-3177.
199. Motuku, M.; Vaidya, U.K.; Janowski, G.M. Parametric studies on self-repairing approaches for resin infused composites subjected to low velocity impact. *Smart Mater. Struct.* **1999**, 8 (5), pp. 623-638.
200. Thao, T.D.P.; Johnson, T.J.S.; Tong, Q.S.; et al. Implementation of self healing concrete-proof of concept. *The IES J. Part A: Civil and Struct. Eng.* **2009**, 2(2): 116–125.
201. Van Tittelboom, K.; De Belie, N.; Van Loo, D.; et al. Self healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cem. Concr. Comp.* **2011**, (33): 497–505.
202. Hillouin, B.; Van Tittelboom, K.; Gruyaert, E., et al. Design of polymeric capsules for self-healing concrete. *Cem. Concr. Comp.* **2015**, 55: 298–307.
203. Formia, A.; Terranova, S.; Antonaci, P.; et al. Setup of extruded cementitious hollow tubes as containing/releasing devices in self-healing systems. *Materials*, **2015**, 8: 1897–1923.
204. Hamilton, A.R.; Sottos, N.R.; White, S.R. Pressurized vascular systems for selfhealing materials. *J. R. Soc. Interface* **2012**, 9 (70): 1020-1028.
205. Williams, G.; Trask, R.S.; Bond, I.P. A self-healing carbon fibre reinforced polymer for aerospace applications. *Compos. Part. A* **2007**, 38 (6): 1525-1532.



206. Trask, R.S.; Williams, G.J.; Bond, I.P. Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres, *J. R. Soc. Interface*, **2007**, 4 (13): 363-371.
207. Pang, J.W.C.; Bond, I.P. 'Bleeding composites'-damage detection and self-repair using a biomimetic approach. *Compos. Part A* **36** **2005**, (2): 183-188.
208. Yuan, Y.C.; Rong, M.Z.; Zhang, M.Q.; Chen, J.; Yang, G.C.; Li, X.M. Self-healing polymeric materials using epoxy/mercaptan as the healant. *Macromolecules* **41**, **2008**, (14): 5197-5202.
209. Yuan, Y.C.; Ye, X.J.; Rong, M.Z.; Zhang, M.Q.; Yang, G.C.; Zhao, J.Q. Self-healing epoxy composite with heat-resistant healant. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2011**, 3(11): 4487-4495.
210. Baeră, C.; Szilagyı, H.; Matei, C.; Hegyi, A.; Lăzărescu, A.; Mircea, A.C. Optimizing approach on Fibre Engineered Cementitious Materials with Self-Healing capacity (SH-FECM) by the use of slurry lime (SL) addition. - *MATEC Web of Conferences*, **2019**, 289, 01001.
211. SR EN 196-3. Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 3: Determinarea timpului de priză și a stabilității. **2017**, România.
212. SR EN 933-1. Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 1 – Determinarea granulozității – Analiza granulometrică prin cercere. **2012**, România.
213. SR EN 932-2. Încercări pentru determinarea caracteristicilor generale ale agregatelor. Partea 2: Metode de reducere a unui eșantion de laborator. **2003**, România.
214. SR EN 1097-3. Încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice și fizice ale agregatelor . Partea 3: Metode pentru determinarea masei volumice în vrac și a porozității intergranulare. **2002**, România.
215. SR EN 196-1. Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 1., **2016**, România.
216. <https://www.holcim.ro/en/business/products/cement/cem-ii-a-ii-425r>
217. Baeră, C.; Snoeck, D.; Szilágyi, H.; Mircea C.; De Belie, N. Dynamic loading performance of fibre engineered cementitious materials with self-healing capacity (SHFECM). Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO – SGEM 2016, Albena, Bulgaria, **2016**, pp. 91-98.

218. Baeră C., Szilágyi H., Mircea C., Hegyi A., Snoeck D. Fibre engineered cementitious materials (FECM) optimisation by the use of hybrid polypropylene fibres and supplementary powder addition. Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO - SGEM 2017, Albena, Bulgaria. **2017**, pp. 169-176.
219. Li, V.C. Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance, Nawy E., Concrete Construction Engineering Handbook, Chapter 24, *CRC Press*, **2008**.
220. Szilágyi, H.; Baeră, C.; Hegyi, A.; Lăzărescu, A.-Romanian resources of waste and industrial by-products as additions for cementitious mixtures. International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM; Sofia, **2018**. Vol. 18, Iss. 6.3, 325–332.
221. Lăzărescu, A.; Mircea, C.; Szilágyi, H.; Baeră, C. Mechanical properties of alkali activated geopolymer paste using different Romanian fly ash sources—Experimental results. MATEC Web Conf. **2019**, 289, 11001.
222. Mircea, A.C.; Toader, T.P. Designing Concrete with Self-healing Properties Using Engineered Cementitious Composites as a Model, International Conference on Innovative Research - ICIR EUROINVENT 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 877, **2020**, 012035 IOP Publishing.
223. <https://altocy.com/wp-content/uploads/2019/08/20-MasterLife-WP-1000-tds-ENGLISH-BASF-May-18.pdf>
224. Li, V.C. On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications. *J. Adv. Concr. Technol.* **2003**, 1, 215–230.
225. Li, V.C. Engineered Cementitious Composites (ECC)—Tailored Composites through Micromechanical Modeling Volume 2164. CSCE **1997**, 1–38.
226. Sherir, M.A.A.; Houssain, K.M.A. Fracture Energy Characteristics of Engineered Cementitious Composites Incorporating Different Aggregates. **2014**, 2982, 293–302.



## LISTA FIGURILOR

Fig. 1.1. Situația drumurilor publice din România (prelucrare după INS) [11] .....	12
Fig. 1.2. Lungimea diferitelor tipuri de drumuri, cu importanță deosebită (prelucrare după INS)[11] .....	12
Fig. 1.3. Rețeaua de drumuri publice din punct de vedere al tipului de acoperământ (prelucrare după INS) [11] .....	13
Fig. 1.4. Drumuri cu îmbrăcămînți asfaltice de tip greu și mijlociu (prelucrare după INS) [11] .....	13
Fig. 1.5. Starea tehnică a drumurilor publice, modernizate (prelucrare după INS) [11] .....	14
Fig. 1.6. Drumurile naționale de importanță deosebită - numărul de benzi de circulație (prelucrare după INS) [11].....	14
Fig. 1.7. Perioada de serviciu a drumurilor naționale modernizate (km) (prelucrare după INS) [11] .....	15
Fig. 1.8. Repartizarea tipurilor de îmbrăcămînți rutiere existente pe drumurile naționale modernizate (km) (prelucrare după INS) [11].....	15
Fig. 1.9. Repartizarea tipurilor de ecartamente de linii ferate (km) (prelucrare după INS) [11].....	16
Fig. 1.10. Densitatea liniilor ferate pe regiuni geografice ale României (%) (prelucrare după INS) [11].....	16
Fig. 2.1. Calea sintetică și biologică de auto-vindecare [12], [13].....	18
Fig. 2.2. Mecanisme concrete de auto-vindecare și amploarea potențială a vindecării unora dintre cele mai utilizate sisteme de auto-vindecare ale compozitelor cementoase [15].....	20
Fig. 2.3. Strategii de evaluare a performanței de auto-vindecare [40].....	21
Fig. 2.4. Mecanisme de auto-vindecare autogenă [47].....	23
Fig. 2.5. Mecanisme de auto-vindecare autogenă [45].....	23
Fig. 2.6. Schema mecanismului de auto-vindecare autogenă [48] .....	24
Fig. 2.7. Schema mecanismului de auto-vindecare autogenă a elementelor fisurate din beton aflate în apă [52].....	25
Fig. 2.8. Schema mecanismului de auto-vindecare cu ajutorul capsulelor.....	43

Fig. 3.1. Prezentare schematică a analizelor efectuate pe materiile prime componente ale microbetonului.....	51
Fig. 3.2. Imagine de ansamblu a difractometrului de raze X tip D8 ADVANCE.....	53
Fig. 3.3. Mod de poziționare epruvete pentru testare în difractometru de raze X tip D8 ADVANCE.....	53
Fig. 3.4. Reprezentare schematică a modului de încărcare al prisme solicitate la întindere prin încovoiere.....	54
Fig. 3.5. Reprezentare schematică a modului de încărcare al prisme solicitate la compresiune .....	54
Fig.4.2.1.1.- Anliză microscopică pe pulberea de ciment CEM I 42,5 R.....	55
Fig.4.2.1.2.- Timpul de priză al pastei de ciment CEM 42,5 R.....	56
Fig.4.2.1.3.- Spectrul de difracție cu raze X al probei de ciment CEM 42,5 R.....	56
Fig.4.2.2.1.- Anliză vizuală a sorturilor din balastiera Gligorești, județul Cluj.....	57
Fig. 4.2.2.2 Analiza cumulativă a agregatelor naturale cu clasa de granulozitate 0/4 mm sursa balastiera Gligorești, județul Cluj.....	58
Fig.4.2.2.3. Analiza cumulativă a agregatelor naturale cu clasa de granulozitate 4/8 mm sursa balastiera Gligorești, județul Cluj.....	58
Fig. 4.2.2.4 Spectrul de difracție cu raze X al probei de sort 0-4 mm din balastiera nisip Gligorești.....	59
Fig. 4.2.2.5.- Anliză vizuală pe nisipul poligranular standardizat.....	59
Fig. 4.2.2.6. Analiza cumulativă a nisipului poligranular standardizat.....	60
Fig. 4.2.2.7. Spectrul de difracție cu raze X al probei de nisip standardizat.....	60
Fig. 4.2.3.1. Anliză microscopică a cenușii zburătoare.....	61
Fig. 4.2.3.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei de cenușă zburătoare.....	62
Fig. 4.2.4.1. Anliză microscopică a adaosului impermeabilizant..	64
Fig. 4.2.4.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei de adaos impermeabilizant.....	65
Fig. 4.2.5.1.- Anliză microscopică a fibrelor PVA 8mm.....	66

Fig. 4.2.6.1.- Anliză microscopică a șlamului de calcar.....	67
Fig. 4.2.6.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei de șlam de calcar.....	68
Fig. 4.3.1.- Timpul de priză al compoziției 1.....	69
Fig. 4.3.2.- Timpul de priză al compoziției 2.....	69
Fig. 4.3.3.- Timpul de priză al compoziției 3.....	70
Fig. 4.3.4.- Timpul de priză al compoziției 4.....	70
Fig. 5.1. Site granulometrice.....	74
Fig. 5.2. Sticlărie de laborator.....	75
Fig. 5.3. Balanță KERN.....	75
Fig. 5.4. Etuvă termoreglabila tip ULM 500.....	75
Fig. 5.5. Aparat Vicat.....	75
Fig. 5.6. Tipar metalic pentru realizat trei epruvete de formă prismatică cu dimensiunile de 40x40x160 mm.....	75
Fig. 5.7. Cronometru digital.....	75
Fig. 5.8. Bazin cu apă termostat.....	76
Fig. 5.9. Malaxor cu paletă.....	76
Fig. 5.10. Mașină de încercare a rezistenței compresiune și la întindere prin încovoiere .....	76
Fig. 5.11. Aspectul microbetonului sub formă de epruvete prismatice 40x40x160 mm.....	76
Fig. 6.1. Inducerea stării de fisurare cu mașina de încercare utilizată la determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere.....	77
Fig. 6.2. Evaluarea zonelor de fisurare și măsurarea fisurilor Microscop Leica + PC .....	77
Fig. 6.3. Standul experimental de condiționare și de realizare al ciclurilor de ud-uscat .....	77
Fig. 7.3. Aspectul epruvetelor în timpul testării a). epruveta înainte de testare la încovoiere; b). cedarea epruvetei testă la încovoiere; c). epruveta testată la compresiune.....	80
Fig. 7.3.1. a) Evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere pentru compozițiile $TM_{\text{sort } 0-4}$ , T1, T2 și T3.....	81
Fig. 7.3.1.b) Evoluția rezistenței la întindere prin încovoiere pentru compozițiile $TM_{\text{nisip standad}}$ , T4, T5 și T6.....	81
Fig. 7.3.2.a) Evoluția rezistenței la compresiune pentru probele $TM_{\text{sort } 0-4}$ , T1, T2 și T3.....	82

Fig. 7.3.2.b). Evoluția rezistenței la compresiune pentru probele TM nisip standard ,T4, T5 și T6.....	83
Fig. 7.4.1.1. Evoluția deschiderii maxime și a deschiderii medii a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare a compoziției $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	88
Fig. 7.4.1.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	90
Fig. 7.4.1.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	91
Fig. 7.4.1.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare al compoziției $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	92
Fig. 7.4.1.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția $TM_{\text{sort } 0-4}$ (Zona 8 și Zona 9) .....	93
Fig. 7.4.1.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția pentru $TM_{\text{sort } 0-4}$ (Zona 10 și Zona 11) .....	94
Fig. 7.4.2.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare a compoziției T1.....	97
Fig. 7.4.2.2 Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției T1.....	98
Fig. 7.4.2.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării a compoziției T1.....	98
Fig. 7.4.2.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare al compoziției T1 .....	99
Fig. 7.4.2.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 1).....	100
Fig. 7.4.2.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 2).....	101
Fig. 7.4.2.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 4 și Zona 5).....	102
Fig. 7.4.2.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 6 și Zona 7).....	103
Fig. 7.4.2.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Zona 8 și Zona 9).....	104



Fig. 7.4.2.10. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Detaliul 1).....	105
Fig. 7.4.3.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția T2.....	110
Fig. 7.4.3.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T2.....	111
Fig. 7.4.3.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T2.....	112
Fig. 7.4.3.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția T2.....	113
Fig. 7.4.3.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 1 și Zona 2).....	114
Fig. 7.4.3.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 3 și Zona 4).....	115
Fig. 7.4.3.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 5 și Zona 6).....	116
Fig. 7.4.3.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T2 (Zona 7).....	117
Fig. 7.4.4.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția T3.....	120
Fig. 7.4.4.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T3.....	121
Fig. 7.4.4.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T3.....	122
Fig. 7.4.4.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția T3.....	123
Fig. 7.4.4.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 7).....	124
Fig. 7.4.4.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 8).....	125
Fig. 7.4.4.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 9).....	126

Fig. 7.4.4.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 10).....	127
Fig. 7.4.4.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 11).....	128
Fig. 7.4.4.10. Evoluția fenomenului de autovindecare pentru compoziția T3 (Zona 12).....	129
Fig. 7.4.4.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3 (Zona 13).....	130
Fig. 7.4.4.12. Detaliul 1 cu evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3.....	131
Fig. 7.4.4.13. Detaliul 2 cu evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T3.....	132
Fig. 7.4.5.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția $TM_{nisip}$ standard.....	136
Fig. 7.4.5.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția $TM_{nisip}$ standard.....	137
Fig. 7.4.5.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării $TM_{nisip}$ standard.....	138
Fig. 7.4.5.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare $TM_{nisip}$ standard.....	139
Fig. 7.4.5.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția $TM_{nisip}$ standard (Zona 1).....	140
Fig. 7.4.5.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția $TM_{nisip}$ standard (Zona 2).....	141
Fig. 7.4.5.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția $TM_{nisip}$ standard (Zona 4) .....	142
Fig. 7.4.5.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția $TM_{nisip}$ standard (Zona 11).....	143
Fig. 7.4.6.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția T4.....	147
Fig. 7.4.6.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T4.....	148

Fig. 7.4.6.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția T4.....	149
Fig. 7.4.6.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția T4 .....	150
Fig. 7.4.6.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 1 și Zona 2).....	151
Fig. 7.4.6.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 3 și Zona 4).....	152
Fig. 7.4.6.7. Evoluția fenomenului de autovindecare pentru compoziția T4 (Zona 5 și Zona 6).....	153
Fig. 7.4.6.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 7 și Zona 8).....	154
Fig. 7.4.6.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 9 și Zona 10).....	155
Fig. 7.4.6.10. Evoluția fenomenului de autovindecare pentru compoziția T4 (Zona 11 și Zona 12).....	156
Fig. 7.4.6.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 13 și Zona 14).....	157
Fig. 7.4.6.12. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 15).....	158
Fig. 7.4.6.13. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T4 (Zona 16).....	159
Fig. 7.4.7.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția proiectată T5.....	163
Fig. 7.4.7.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T5.....	164
Fig. 7.4.7.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea medie a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T5.....	166
Fig. 7.4.7.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția proiectată T5.....	166
Fig. 7.4.7.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 1).....	167

Fig. 7.4.7.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 2).....	168
Fig. 7.4.7.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 3 și Zona 4).....	169
Fig. 7.4.7.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 5).....	170
Fig. 7.4.7.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Zona 6).....	171
Fig. 7.4.7.10. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Detaliul 1).....	172
Fig. 7.4.7.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T5 (Detaliul 2).....	173
Fig. 7.4.8.1. Deschiderea maximă și deschiderea medie a fisurilor, valori măsurate imediat după fisurare pentru compoziția proiectată T6.....	177
Fig. 7.4.8.2. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T6.....	178
Fig. 7.4.8.3. Evoluția gradului de vindecare calculat pentru deschiderea maximă a fisurilor, pe durata condiționării pentru compoziția proiectată T6.....	179
Fig. 7.4.8.4. Evoluția indicatorului cinetic a procesului de vindecare pentru compoziția proiectată T6.....	180
Fig. 7.4.8.5. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 1 și Zona 2).....	181
Fig. 7.4.8.6. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 3 și Zona 4).....	182
Fig. 7.4.8.7. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 5 și Zona 6).....	183
Fig. 7.4.8.8. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 7).....	184
Fig. 7.4.8.9. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 8 și Zona 9).....	185
Fig. 7.4.8.10. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 10 și Zona 11).....	186
Fig. 7.4.8.11. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 12 și Zona 13).....	187

Fig. 7.4.8.12. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 14 și Zona 15).....	188
Fig. 7.4.8.13. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Zona 16).....	189
Fig. 7.4.8.14. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Detaliul 1).....	190
Fig. 7.4.8.15. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T6 (Detaliul 2).....	191
Fig. 7.4.8.16. Evoluția fenomenului de autovindecare pentru compoziția T6 (Detaliul 3).....	192
Fig. 7.5.1. Spectrul de difracție cu raze X al probei $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	194
Fig. 7.5.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei T1.....	195
Fig. 7.5.3. Spectrul de difracție cu raze X al probei T2.....	195
Fig. 7.5.4. Spectrul de difracție cu raze X al probei T3.....	196
Fig. 7.5.5. Spectrul de difracție cu raze X al probei T4.....	196
Fig. 7.5.6. Spectrul de difracție cu raze X al probei T5.....	197
Fig. 7.5.1. Spectrul de difracție cu raze X al probei T6.....	197

## LISTA TABELELOR

Tab. 2.1. Abordări utilizate pentru autovindecarea betonului [13].....	19
Tab. 2.2. Criterii de eficiență a auto-vindecării vs metode de auto-vindecare [41-43].....	21
Tab. 2.3.1. Rezumatul tipurilor de beton, proiectarea amestecului, aditivii cristalini utilizați, metodele de pre-fisurare [81].....	27
Tab. 2.3.2. Timpul până la inducerea fisurilor, deschidere fisuri, zile de vindecare, mod de condiționare [81].....	28
Tab. 2.3.3. Tipul de aditivi utilizați în cercetare, raportul de aditivi minerali și condițiile de expunere a probelor pentru realizarea mecanismului de auto-vindecare [90].....	32
Tab. 2.3.4. Modul de fisurării respectiv capacitatea de sigilare a deschiderii fisurilor raportate în timp [90].....	33
Tab. 4.2.1.1. Caracteristicile esențiale ale cimentului de tip Ciment Portland – CEM I 42,5 R.....	55
Tab.4.2.2.1 Analiza cumulativă a agregatelor naturale 0/4 mm.....	57

Tab. 4.2.2.2. Analiza cumulativă a agregatelor naturale	4/8
mm.....	57
Tab. 4.2.2.3. Analiza cumulativă a nisipului poligranular standardizat.....	59
Tab. 4.2.3.1. Densitatea în vrac a cenușii de termocentrală.....	62
Tab. 4.2.3.2. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere a probei martor .....	63
Tab. 4.2.3.3. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere probei cu cenușă zburătoare .....	63
Tab. 4.2.3.4. Determinarea rezistenței la compresiune a probei martor .....	63
Tab. 4.2.3.5. Determinarea rezistenței la încovoiere ale probei cu conținut de cenușă zburătoare .....	63
Tab. 4.2.3.6. Determinarea indicelui de activitate al cenușii zburătoare la vârsta de 28 de zile.....	64
Tab. 4.2.4.1 Caracteristicile adaosului impermeabilizant preluate din fișa tehnică a producătorului MasterLife WP 1000 [223].....	64
Tab. 4.2.4.2. Densitatea în vrac a adaosului impermeabilizant...65	
Tab. 4.2.6.1. Densitatea în vrac a șlamului de calcar.....	67
Tab. 4.3.1. Compoziții materii prime utilizate la determinarea consistenței standard și a timpului de priză.....	69
Tab. 4.3.2. Timpul de priză al compozițiilor de ciment cu cenușă zburătoare.....	70
Tab. 5.1.- Compoziție proiectată Rețeta $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	72
Tab. 5.2.- Compoziție proiectată Rețeta martor $TM_{\text{nisip standard}}$ .....	72
Tab. 5.3.- Compoziție proiectată T1.....	72
Tab. 5.4.- Compoziție proiectată T2.....	73
Tab. 5.5.- Compoziție proiectată T3.....	73
Tab. 5.6.- Compoziție proiectată T4.....	73
Tab. 5.7.- Compoziție proiectată T5.....	73
Tab. 5.8.- Compoziție proiectată T6.....	74
Tab. 7.1.- Densitate compoziții microbeton.....	78
Tab. 7.2.- Coeficientul de absorbție al compozițiilor microbetonului.....	79
Tab. 7.3.1- Rezistența la întindere prin încovoiere a compozițiilor microbetonului.....	80

Tab. 7.3.2- Rezistența la compresiune a compozițiilor microbetonului.....	82
Tab. 7.4.1. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția $TM_{\text{sort } 0-4}$ – Zonele de evaluare 1-16.....	85
Tab. 7.4.1.1. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	88
Tab. 7.4.1.2. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția $TM_{\text{sort } 0-4}$ .....	89
Tab. 7.4.2. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T1 – Zonele de evaluare 1-9.....	95
Tab. 7.4.3. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T2 – Zonele de evaluare (1-20).....	107
Tab. 7.4.4. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T3 - Zonele de evaluare (1-13).....	118
Tab. 7.4.5. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția $TM_{\text{nisip standard}}$ - Zonele de evaluare (1-16).....	133
Tab. 7.4.5.1. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția $TM_{\text{nisip standard}}$ .....	136
Tab. 7.4.5.2. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția $TM_{\text{nisip standard}}$ .....	138
Tab. 7.4.6. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T4- Zonele de evaluare (1-16).....	144
Tab. 7.4.6.1. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția T4.....	147
Tab. 7.4.6.2. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția T4.....	149
Tab. 7.4.7. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T5- Zonele de evaluare (1-15).....	160
Tab. 7.4.7.1. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția proiectată T5.....	163
Tab. 7.4.7.2. Evoluția deschiderii fisurii rămase parțial deschise pentru compoziția proiectată T5.....	165
Tab. 7.4.8. Evoluția deschiderii fisurii, respectiv a gradului de vindecare pentru compoziția T6- Zonele de evaluare (1-16).....	174





## LISTĂ DE PUBLICAȚII

Cercetarea efectuată în cadrul elaborării lucrării de doctorat a fost diseminată în următoarele publicații:

○ **Capitole de cărți:**

1. **Toader T.P.**, Dico C., Mircea C., *Cementitious Composite Materials with Self-healing Properties Using Integral Waterproofing Admixtures by Mass Crystallization*, The 15th International Conference Interdisciplinarity in Engineering- Inter-Eng 2021, Book series-Lecture Notes in Networks and Systems, DOI:10.1007/978-3-030-93817-8\_16, p.150–165, 2021.

○ Articole publicate în reviste de specialitate:

A. **Articole publicate în reviste și conferințe de circulație internațională, cotate ISI și ISI Proceedings:**

1. Mircea C., **Toader T.P.**, Hegyi A., Ionescu B.A., Mircea A., *Early Age Sealing Capacity of Structural Mortar with Integral Crystalline Waterproofing Admixture*, Materials 2021, 14, 4951.  
<https://doi.org/10.3390/ma14174951>, (IF=3,623), 2021.

B. **Articole publicate în reviste și conferințe de circulație națională și internațională :**

1. Toader T.P., Mircea C.G.R., Hegyi A., Ionescu B.A., Boca A., Ciascaiu O. Research on the production of cement composites with autonomous self-healing performance, Concrete Solutions 2022 – 8th International Conference on Concrete Repair, Durability & Technology, MATEC Web Conf., Volume 361, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1051/matecconf/202236105009> , 2022
2. Mircea C.G.R., **Toader T.P.**, Mircea A., *Research upon self-sealing of fibre reinforced mortar with integral crystalline waterproofing admixtures*, Concrete Solutions 2022 – 8th International Conference on Concrete Repair, Durability & Technology, MATEC Web Conf., Volume 361, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1051/matecconf/202236105011> , 2022.
3. **Toader T.P.**, Mircea A.C., *Self-Healing Concrete Mix-Design Based on Engineered Cementitious Composites Principles*, The 14th International Conference on Interdisciplinarity in Engineering— INTER-ENG 2020, Proceedings 2020, 63(1), 5, <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063005>, 2020.

4. Mircea A.C., **Toader T.P.**, *Self-healing concrete*, The Scientific Buletin Addendum, No. 5/2020, The Official Catalogue of the "Cadet INOVA" Exhibition, Research and Innovation in the Vision of Young Researchers, THE INTERNATIONAL STUDENT INNOVATION AND SCIENTIFIC RESEARCH EXHIBITION – "CadetINOVA'20" – "Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy, Editura Academiei Forțelor Terestre "Nicolae Bălcescu", Martie 26-28, pag.324-327, 2020;
  5. Piscoiu D.N., Mircea A.C., **Toader T.P.**, *Reducing pollution impact using special concrete in transport infrastructure*, The Scientific Buletin Addendum, No. 5/2020, The Official Catalogue of the "Cadet INOVA" Exhibition, Research and Innovation in the Vision of Young Researchers, THE INTERNATIONAL STUDENT INNOVATION AND SCIENTIFIC RESEARCH EXHIBITION – "CadetINOVA'20" – "Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy, Editura Academiei Forțelor Terestre "Nicolae Bălcescu", pag.345-348, Martie 26-28, 2020.
- C. Rezumate publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale :**
1. **Toader T.P.**, Matei C., Baeră C., Szilagyi H., Mircea A.C., *Study of self-healing engineered cementitious composites for infrastructure*, INFOINVENT-2019 Chișinău , 19-23 Noiembrie, Moldova, pag.188-189, 2019;
  2. **Toader T.P.**, Mircea A.C., Dico C., *Special Concrete used to reduce pollution impact in transport infrastructure*, EUROINVENT Mai 2020, online edition, Iași, Romania, ISSN 2601-4564, on-line 2601-4572, pag. 422-423, 2020;
  3. **Toader T.P.**, Mircea A.C., Dico C., *Self-healing Concrete*, EUROINVENT Mai 2020, online edition , Iași, Romania, ISSN 2601-4564, on-line 2601-4572, pag. 423-424, 2020;
  4. **Toader T. P.**, Mircea A. C., Boca A., *Proiectarea micro-betonului cu proprietăți de autovindecare, pornind de la realizarea materialelor compozite cementoase*, ICE-USV 3-5 Septembrie 2020, Suceava, pag.45-47, 2020;
  5. **Toader T.P.**, Dico C., Florean C., *The Influence of Fly Ash on the Workability of Concrete with Self-Healing Properties*,

- EUROINVENT Mai 2021, online edition, Iași, Romania, ISSN 2601-4564, on-line 2601-4572, pag. 550-551, 2021;
6. **Toader T.P.**, Dico C., Florean C., *The Autogenous Self-Healing Capacity of Cementitious Composite Materials Produced Using Local Origin Materials*, EUROINVENT Mai 2021, online edition , Iași, Romania, ISSN 2601-4564, on-line 2601-4572, pag. 551-552, 2021;
  7. **Toader T.P.**, Dico C., Ionescu B.A., Lăzărescu A.V., *Aspecte privind proiectarea microbetonului cu proprietatea de auto-vindecare*, ICE-USV 28-29 Mai 2021, Suceava, pag.100-102, 2021.
  8. **Toader T.P.**, Dico C.S., Călătan G., Ionescu B. A., Chira M., *Cementitious Composite Materials with Self-Healing Properties*, AT THE 6 th ANNUAL INTERNATIONAL INVENTION INNOVATION COMPETITION IN CANADA, iCAN 2021, organized by TORONTO INTERNATIONAL SOCIETY OF INNOVATION & ADVANCED SKILLS (TISIAS), CANADA, HELD ON AUGUST 28TH, 2021 IN TORONTO
- D. Rezumate publicate în volumele unor manifestări științifice naționale :**
1. **Toader T.P.**, Matei C., Baeră C., *Betonul cu proprietăți de autovindecare utilizat în infrastructura de transport*, Conferința de cercetare în construcții, economia construcțiilor, urbanism și amenajarea teritoriului București, pag.43-44, 24 octombrie 2019;
  2. **Toader T.P.**, Călătan G., Dico C., Florean C (2021), *Proiectarea materialelor cementoase compozite cu proprietăți de autovindecare*, Conferința de cercetare în construcții, economia construcțiilor, urbanism și amenajarea teritoriului Efectul pandemiei COVID-19 asupra domeniului urbanismului, arhitecturii și construcțiilor: criză sau oportunitate?, București, , pag. 125-126, 13 mai 2021;
- E. Postere prezentate în conferințe naționale și internaționale:**
1. **Toader T.P.**, Matei C., Baeră C., Szilagyi H., Mircea A.C., *Study of self-healing engineered cementitious composites for infrastructure*, INFOINVENT-2019 Chișinău, Moldova, 19-23 Noiembrie 2019;

2. **Toader T.P.**, Mircea A.C., Dico C., *Special Concrete used to reduce pollution impact in transport infrastructure*, EUROINVENT Mai 2020, online edition , Iași, Romania, pag. 201, 2020;
  3. **Toader T.P.**, Mircea A.C., Dico C., *Self-healing Concrete*, EUROINVENT Mai 2020, online edition , Iași, Romania, pag. 202, 2020;
  4. **Toader T.P.**, Circa A.C., Boca A., Sălăjanu T. A.; Lupan L.M., *Designing micro-concrete with self-curing properties, starting from the engineered cementitious composite materials*, Salonul Internațional de Invenții și Inovații „TRAIAN VUIA” Timișoara , ediția a VI -a, , ediție online , Timișoara, Romania, pag.152, 13-15 Octombrie 2020;
  5. **Toader T.P.**, Dico C., Florean C., *The Autogenous Self-Healing Capacity of Cementitious Composite Materials Produced Using Local Origin Materials*, EUROINVENT Mai 2021, online edition, Iași, Romania, pag.302, 2021;
  6. **Toader T.P.**, Dico C., Florean C., *The Influence of Fly Ash on the Workability of Concrete with Self-Healing Properties*, EUROINVENT Mai 2021, online edition, Iași, Romania, pag.303, 2021.
- F. Prezentări orale în conferințe naționale/internaționale:**
1. **Toader T.P.**, Matei C., Baeră C., *Betonul cu proprietăți de autovindecare utilizat în infrastructura de transport*, Conferința de cercetare în construcții, economia construcțiilor, urbanism și amenajarea teritoriului București, 24 octombrie 2019;
  2. **Toader T. P.**, Mircea A. C., Boca A., *Proiectarea micro-betonului cu proprietăți de autovindecare, pornind de la realizarea materialelor compozite cementoase*, ICE-USV 3-5 Septembrie 2020, ediție online, Suceava, România, 2020;
  3. **Toader T. P.**, Mircea A. C., *Self-Healing Concrete Mix-Design Based on Engineered Cementitious Composites Principale*, The 14 th International Conference INTER- ENG 2020 Interdisciplinarity in Engineering, , Room: Online A002 – Faculty of Engineering and Information Technology, Târgu-Mureș, România, October 8 th 2020;

4. **Toader T.P.**, Dico C, Ionescu B.A., Lăzărescu A.V., *Aspecte privind proiectarea microbetonului cu proprietatea de auto-vindecare*, Suceava, Salonului ICE-USV Mai 2021.
5. Mircea C.G.R., **Toader T.P.**, Mircea A., *Research upon self-sealing of fibre reinforced mortar with integral crystalline waterproofing admixtures*, Concrete Solutions 2022 – 8th International Conference on Concrete Repair
- G. **Premii obținute în urma participărilor la conferințele naționale/internaționale:**
  1. **Medalia de bronz** pentru lucrarea *STUDIUL MATERIALELOR COMPOZITE CEMENTOASE FOLOSITE ÎN INFRASTRUCTURĂ* – autori : **Toader T.P.**, Matei C., Baeră C., Szilagyi H., Mircea A.C., Expoziția Internațională specializată „ INFOINVENT “, Chișinău, 20-23 Noiembrie 2019;
  2. **Medalia de Bronz** a Forumul- ui Inventatorilor Români pentru lucrarea *SELF-HEALING CONCRETE*, autori: A. C. Mircea, **T.P.Toader**, The International Student Innovation and Scientific Research Exhibition, Sibiu, "Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy Sibiu, May 2020.
  3. **Medalia de Argint** pentru lucrarea *SPECIAL CONCRETE USED TO REDUCE POLLUTION IMPACT IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE* autori: **T.P.Toader**, A. C. Mircea, C.Dico, The 12 th edition of European Exhibitions of Creativity and Innovation EUROINVENT 2020, 23 Mai 2020;
  4. **Medalia de Argint** pentru lucrarea *SELF-HEALING CONCRETE* autori: **T.P.Toader**, A. C. Mircea, C.Dico, The 12 th edition of European Exhibitions of Creativity and Innovation EUROINVENT 2020, 23 Mai 2020;
  5. **Medalia de bronz** pentru lucrarea: *PROIECTAREA MICRO-BETONULUI CU PROPRIETAȚI DE AUTOVINDECARE, PORNIND DE LA REALIZAREA MATERIALELOR COMPOZITE CEMENTOASE*, autori **Toader T. P.**, Mircea A.C., Boca A., Târgul Internațional de Invenție și Educație Creativă pentru Tineret ICE-USV, Editia a IV-a, 2020, Suceava, România;
  6. **Medalia de argint** pentru lucrarea: *DESIGNING MICRO-CONCRETE WITH SELF-CURING PROPERTIES, STARTING FROM THE ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE MATERIALS*,

- autori **Toader T.P.**, Circa A.C., Boca A., Sălăjanu T. A.; Lupan L.M., Salonul Internațional de Invenții și Inovații „TRAIAN VUIA” Timișoara , ediția a VI –a, 13-15 Octombrie 2020;
7. **Medalia de bronz** pentru lucrarea: *THE INFLUENCE OF FLY ASH ON THE WORKABILITY OF CONCRETE WITH SELF-HEALING Properties*, autori: **Toader T.P.**, Dico C., Florean C., The 13 th edition of European Exhibitions of Creativity and Innovation EUROINVENT 2021, Mai 2021;
  8. **Medalia de argint** pentru lucrarea: *THE AUTOGENOUS SELF-HEALING CAPACITY OF CEMENTITIOUS COMPOSITE MATERIALS PRODUCED USING LOCAL ORIGIN MATERIALS*, autori:**Toader T.P.**, Dico C., Florean C., The 13 th edition of European Exhibitions of Creativity and Innovation EUROINVENT 2021, Mai 2021;
  9. **Medalia de aur** pentru lucrarea: *ASPECTE PRIVIND PROIECTAREA MICROBETONULUI CU PROPRIETATEA DE AUTO-VINDECARE*, autori: **Toader T. P.**, Dico C, Ionescu B.A., Lăzărescu A.V., Târgul Internațional de Invenție și Educație Creativă pentru Tineret ICE-USV, Editia a V-a, 2021, Suceava, România, Mai 2021;
  10. **Medalia de argint** pentru lucrarea: *Cementitious Composite Materials with Self-Healing Properties*, autori: Toader T.P., Dico C.S., Călătan G., Ionescu B.A., Chira M., AT THE 6<sup>th</sup> ANNUAL INTERNATIONAL INVENTION INNOVATION COMPETITION IN CANADA, iCAN 2021, organized by TORONTO INTERNATIONAL SOCIETY OF INNOVATION & ADVANCED SKILLS (TISIAS), HELD ON AUGUST 28<sup>TH</sup>, 2021 IN TORONTO, CANADA.