



Domeniul Inginerie Civilă și Instalații

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

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

Student-doctorand:
Tudor Panfil TOADER

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Călin Grigore Radu MIRCEA

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. Ing. **Nicolae Har** - Universitatea Babeș – Bolyai din Cluj-Napoca;

- Conf. Dr. Ing. **Attila Puskás** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

- Cluj-Napoca -
2022

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.

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 oxidează, iar în timp își poate pierde capacitatea portantă. Fără a interveni asupra închiderii acestor fisuri 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 drumurilor publice totalizau 86234 km, conform Fig. 1.2..

Din punct de vedere al densității drumurilor publice raportate la suprafața de 100km² 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.

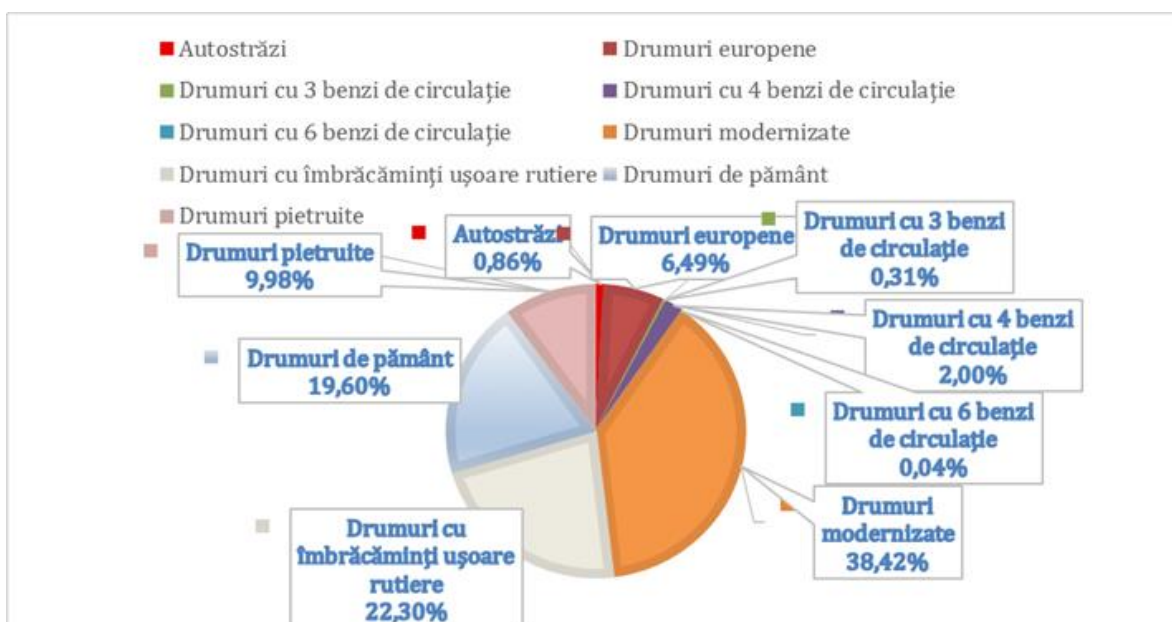


Fig. 1.1. Situația drumurilor publice din România (prelucrare după INS) [11]

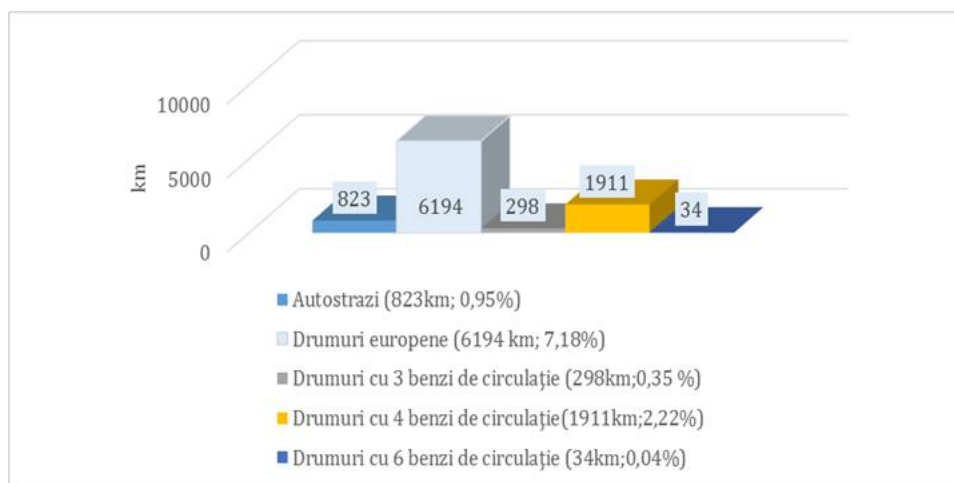


Fig. 1.2. Lungimea diferitelor tipuri de drumuri, cu importanță deosebită (prelucrare după INS) [11]

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..

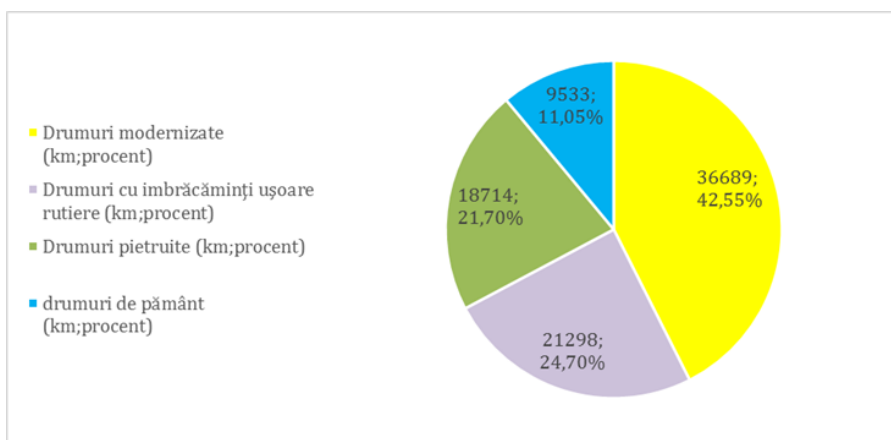


Fig. 1.3. Rețeaua de drumuri publice din punct de vedere al tipului de acoperământ (prelucrare după INS) [11]

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

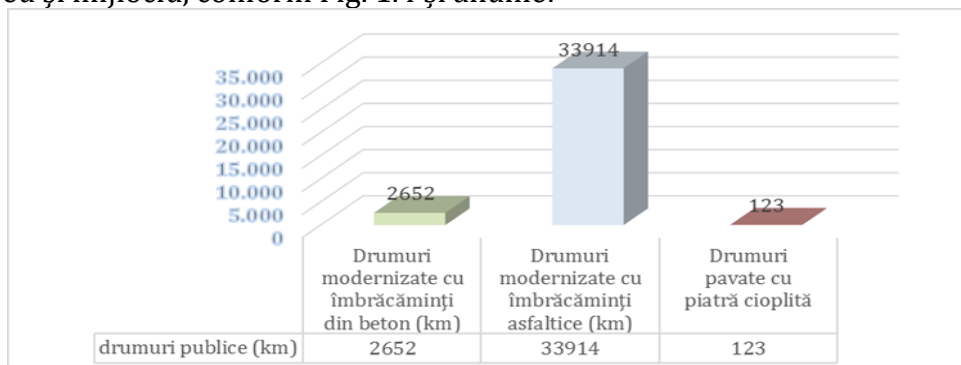


Fig. 1.4. Sistemul rutier al drumurilor publice cu îmbrăcămînți asfaltice de tip greu și mijlociu (prelucrare după INS) [11]

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..

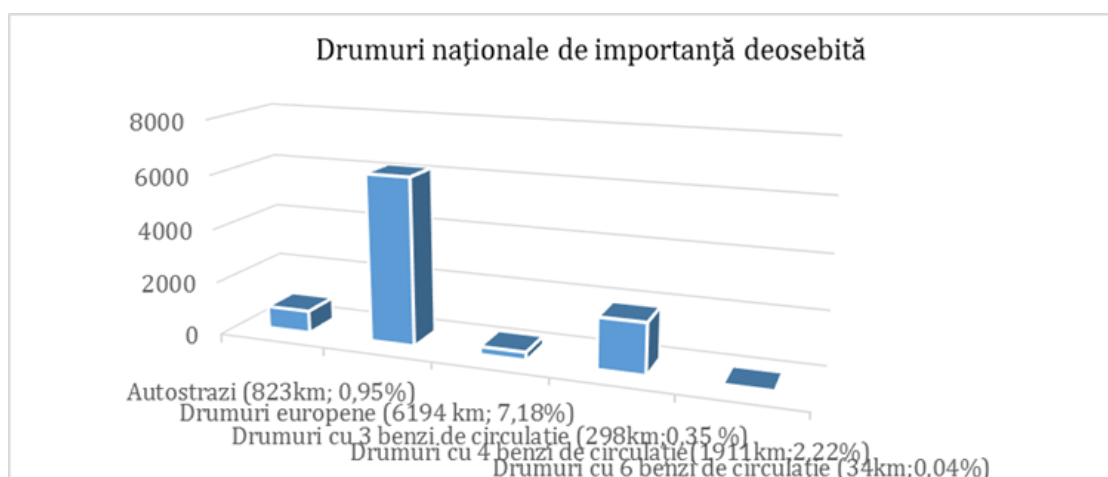


Fig. 1.6. Drumurile naționale de importanță deosebită - numărul de benzi de circulație (prelucrare după INS) [11]

Sub aspectul perioadei de serviciu a drumurilor naționale modernizate, conform reprezentării grafice din Fig. 1.7. respectiv repatizarea tipurilor de îmbrăcămînți 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%.

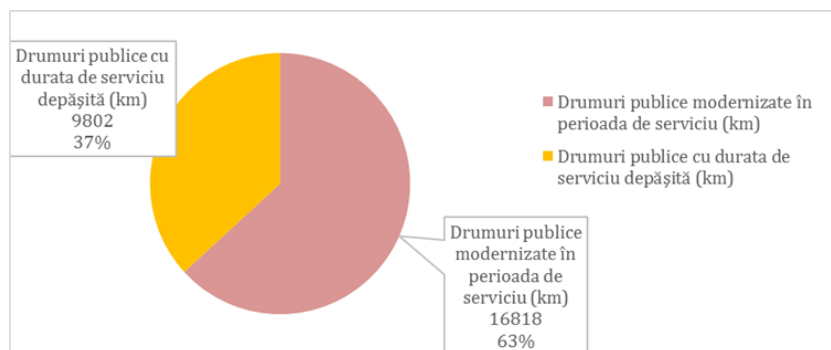


Fig. 1.7. Perioada de serviciu a drumurilor naționale modernizate (km) (prelucrare după INS) [11]

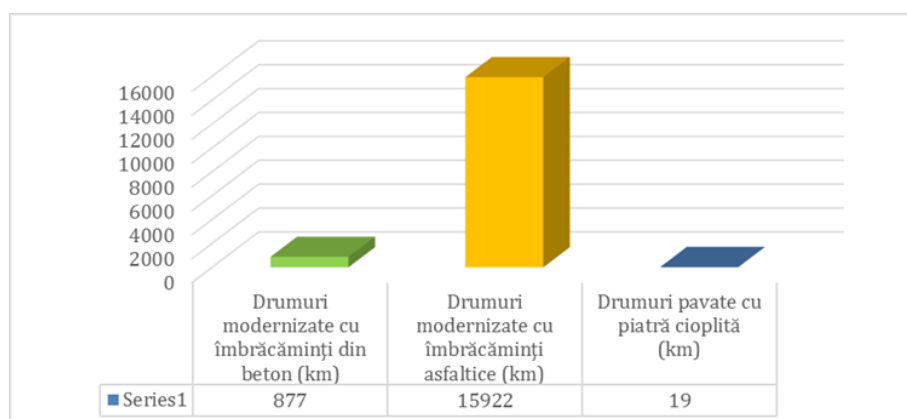


Fig. 1.8. Repartizarea tipurilor de îmbrăcămînți rutiere existente pe drumurile naționale modernizate (km) (prelucrare după INS) [11]

1.2. Infrastructura feroviară

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

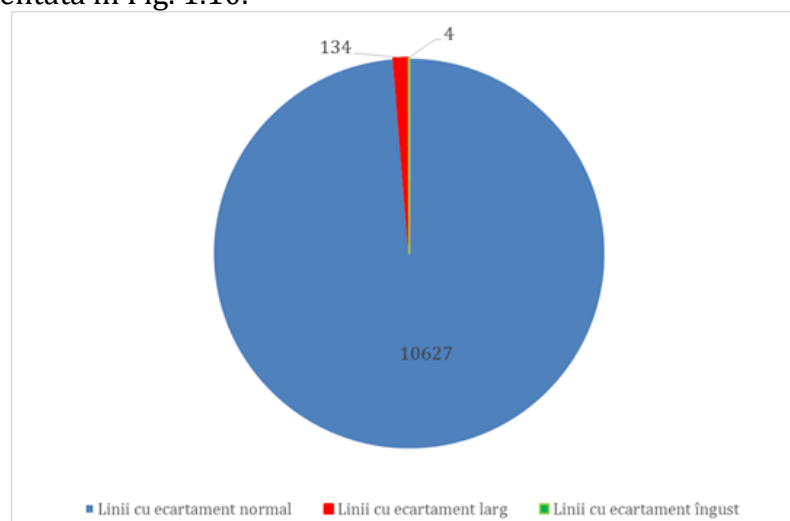


Fig. 1.9. Repartizarea tipurilor de ecartamente de linii ferate (km) (prelucrare după INS) [11]

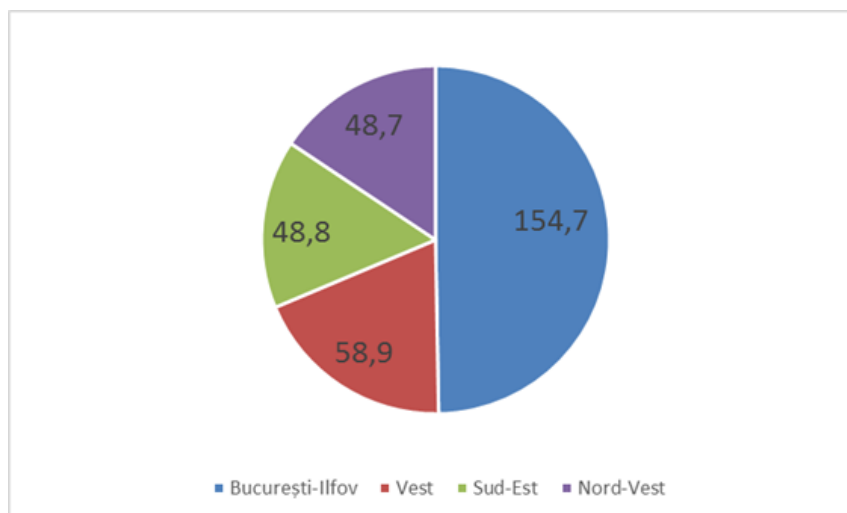


Fig. 1.9. Densitatea liniilor ferate pe regiuni geografice ale României (‰) (prelucrare după INS) [11]

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)

În acest capitol sunt prezentate informații generale despre materialele compozite cementoase cu proprietăți de auto-vindecare propuse a se utiliza la realizarea infrastructurilor de transport. Mecanismele de auto-vindecare identificate au fost de tip autonom și autogen. Pentru fiecare dintre acestea s-au prezentat avantajele și elementele de dificultate.

Betonul cu mecanismul de auto-vindecare autogenă este cel mai întâlnit în literatura de specialitate și este aplicabil la elementele de beton care intră în contact cu apa, inițiindu-se astfel reacția de hidratare-hidroliză a particulelor de ciment rămase nehidratate, astfel fisurile din elementele cementoase se închid parțial sau total.

Mecanismul de auto - vindecare autonomă al produselor cementoase se realizează prin înglobarea în compoziția matricei acestora a unor noi componente, 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 este mecanismul de auto - vindecarea autonomă cel indus de adaosuri hidroizolante cristaline.

CONTRIBUȚIA PERSONALĂ

3. Ipoteza de lucru/obiective

a) **Obiectivul general** al proiectului de cercetare a fost acela de a proiecta, produce și analiza un micorbeton 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 analiza microbetonului cu capacitatea de auto-vindecare s-a desfășurat în următoarele etape:

4.1. Proiectarea compozițiilor preliminară 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 posibilităților de dezvoltare a microbetonului cu capacitate de auto-vindecare ;

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

În vederea realizării compozițiilor de 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 de 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 rocii de marmură, 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 s-au analizat și caracterizat materiile prime componente ale microbetonului, respectiv determinările efectuate pe acestea pentru a determina tipul respectiv, cantitatea optimă a acestora, pentru a se obține proprietățile fizico-mecanice precum 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.) :

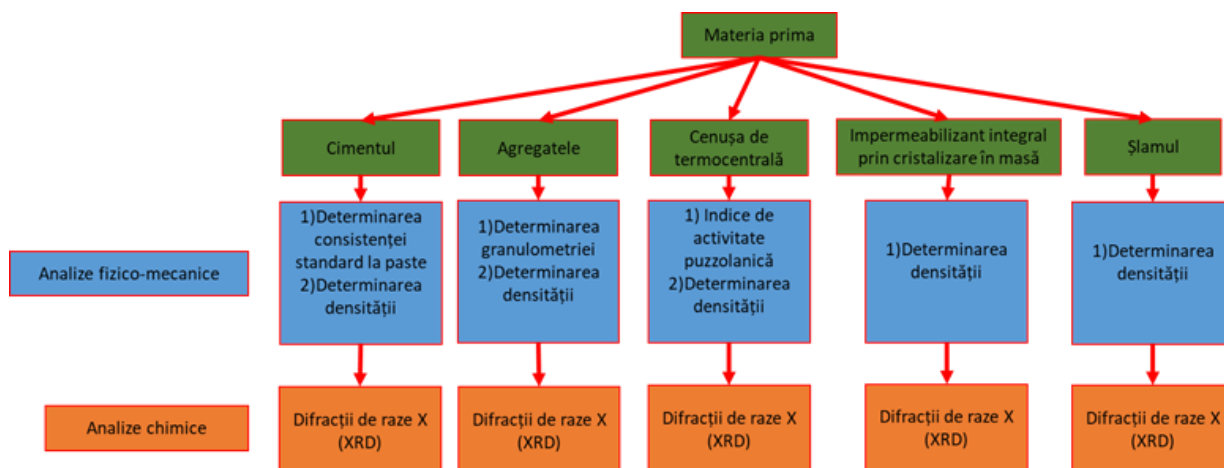


Fig. 3.1. Prezentare schematică a analizelor efectuate pe materiile prime componente ale microbetonului.

Concluziile rezultatelor experimentale pe materiile prime componente ale microbetonului sunt :

- creșterea necesarului de apă pentru obținerea pastei de consistență normal, de la 140 g (pasta martor cu 0% cenușă de termocentrală) la 150 g (pasta cu 52,4% cenușă de termocentrală), pe măsură ce cantitatea de ciment Portland - CEM I 42,5 R substituită cu cenușă 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 cenușă 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 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.

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 materiile 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_{sort 0-4}

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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 $TM_{\text{nisip standard}}$

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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

Materiale componente	U.M.	Cantitatea
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.

Compozițiile micorbetonului 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 micorbeton 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.

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

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).	
2) <u>Evaluarea zonelor de fisurare și măsurarea fisurilor</u> s-a făcut cu Microscop Leica tip DMC 2500+ PC (Fig. 6.2.) pentru analizarea zonelor fisurate ale epruvetelor, respective la măsurarea dimensiunilor fisurilor.	
3) <u>Standul experimental de condiționare și de realizare al ciclurilor de ud-uscă</u> t (16 ore ud – 8 ore uscat), Fig. 6.3.	

7. Caracterizarea performanțelor compozițiilor preliminare propuse pentru realizarea microbetonului.

7.1. Determinarea densității

Tab. 7.1.- Densitate compoziții microbeton

Indicativ compoziție	Densitate [kg/m ³]
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

Tab. 7.2.- Coeficientul de absorbție al compozițiilor microbetonului

Indicativ compoziție	Coeficientul de absorbție [%]
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

7.3.1. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere

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

Indicativ compoziție	R_{ti} (N/mm²)
TM sort 0-4	15,6
T1	16,2
T2	16,3
T3	16,5
TM nisip standardizat	16,7
T4	15,7
T5	18,9
T6	20,2

7.3.2. Determinarea rezistenței la compresiune

Tab. 7.3.2- Rezistența la compresiune a compozițiilor microbetonului

Indicativ compoziție	R_c (N/mm²)
TM sort 0-4	57,4
T1	58,2
T2	56,6
T3	54,3
TM nisip standardizat	56,3
T4	56,7
T5	55,1
T6	55,0

7.4. Evaluarea capacității de auto - vindecare a microbetonului

Evaluare a capacității de auto-vindecare se realizează de la modul de inducere a stării de fisurare în epruvetele de microbeton studiate și anume, prismele au fost fisurate la 90 % din forța de cedare la întindere, prin încovoiere.

Analiza respectiv măsurarea deschiderii micro-fisurilor a fost efectuată cu un microscop de tip Leica DMC2900 racordat la un PC. Măsuarea 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-uscă (16 ore în apă – 8 ore uscat) și a fost făcută 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 s-au analizat 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 lății 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 lății medii a fisurii, asociată la un interval de timp „t” corespunzător de zile:

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

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_{cr}^i – aria segmentului de fisura i, (mm²);

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

7.4.1. Evaluarea capacității de auto - vindecare pentru compoziția proiectată

TM_{sort 0-4}

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-uscă, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 109 μm la 33 μm. În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 83 μm la 29 μm, Fig. 7.4.1.1..
- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, (GV_t^M) este reprezentat în Fig. 7.4.1.2. 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 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..
- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, (GV_f^m), este reprezentat în Fig. 7.4.5.3. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscate (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.
 - Viteza de închidere a fisurii, între două intervale de timp de condiționare și indică faptul că, în primele ore 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, 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)μm.

7.4.2 Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T1

Pe baza măsurărilor 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-uscate, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 139 μm la 33 μm. În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 104,9 μm la 31 μm, Fig. 7.4.2.1.
- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, (GV_f^M) este reprezentat în Fig. 7.4.2.2. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscate (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 zonei 1, rămânând neînchisă total fisura cu deschidere maximă de 139 μm, Tab. 7.4.2.2..
- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, (GV_f^m), este reprezentat în Fig. 7.4.2.3. și se observă că se îmbunătățește odată cu creșterea numărului de cicluri ud-uscate (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..
- 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 μm.

7.4.3 Evaluarea capacității de auto - vindecare pentru compoziția proiectată T2

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 μm la 40 μm . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de 65 μm la 31,8 μm , Fig. 7.4.3.1.
- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, (GV_{f}^{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 μm , zona 6 cu deschidere maximă de 60 μm , zona 7 cu deschidere maximă de 51 μm și zona 17 cu deschidere maximă de 79 μm , Fig. 7.4.3.2..
- 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..
- 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) μm .

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

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.

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 μm la 16 μm . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la valoarea inițială de la 49,9 μm la 14,4 μm , Fig. 7.4.4.1..

- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, (GV_{f}^{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 mm și în cazul zonei 8, rămânând neînchisă total fisura cu deschidere maximă de 56 μm , și este reprezentat în Fig.7.4.4.2..
- Gradul de vindecare mediu al fisurilor identificate, (GV_t^m), 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 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. 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 (37-56) μm .

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

Pe baza măsurărilor 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 $TM_{\text{nisip standard}}$.

Se observă că:

- Pe măsură ce se parcurge diagrama de cicluri de condiționare ud-uscă, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 114 μm la 29 μm . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la o valoare inițială de 94,9 μm la 19 μm , Fig. 7.4.5.1..
- Gradul de vindecare a deschiderii maxime a fisurilor, (GV_t^M) este reprezentat în Fig.7.4.5.2., 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 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..
- 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-uscă (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.
- 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..

7.4.6. Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T4

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.

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. 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..
- 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-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 pentru fisurile cu gradul de vindecare mediu final deschiderile prezentate în Tab. 7.4.6.2..
- 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..

7.4.7 Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T5

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-uscă, deschiderea maximă a fisurilor se reduce de la un maxim de 140 μm la 19 μm . În mod similar, deschiderea medie a fisurilor scade de la o valoare inițială de 75,1 μm la 16 μm , Fig. 7.4.7.1..
- 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..
- 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.

- 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 $(36,4 - 75,1)\mu\text{m}$.

7.4.8 Evaluarea capacității de autovindecare pentru compoziția proiectată T6

Pe baza măsurărilor 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..
- 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-uscat (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-uscat (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.

Imagini reprezentative ce evidențiază evoluția fenomenului de autovindecare pentru compozițiile cementoase studiate

Compoziția T1 – Detaliul 1

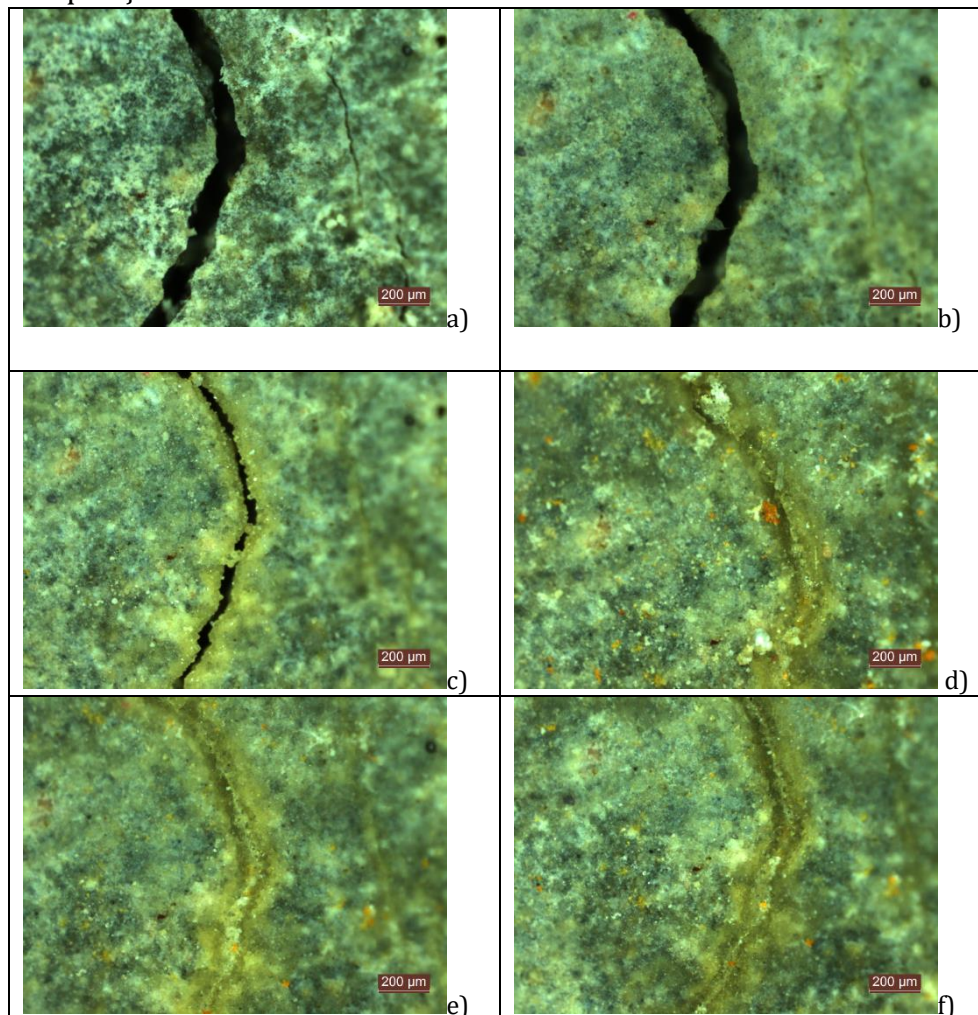
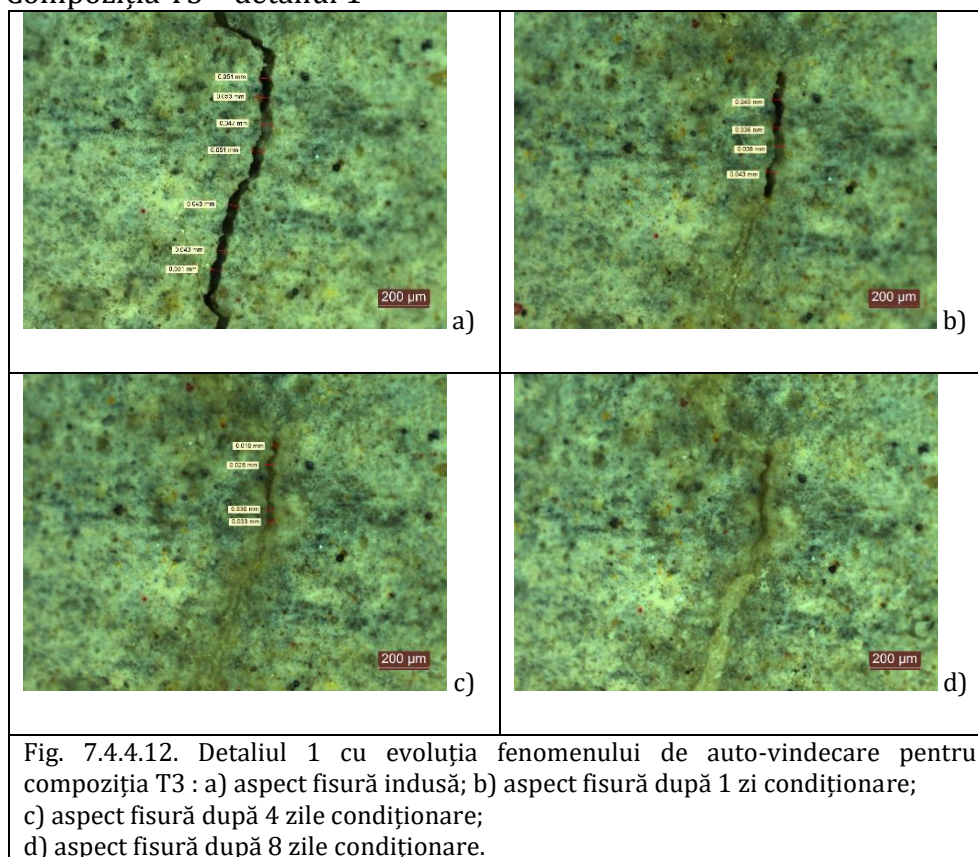
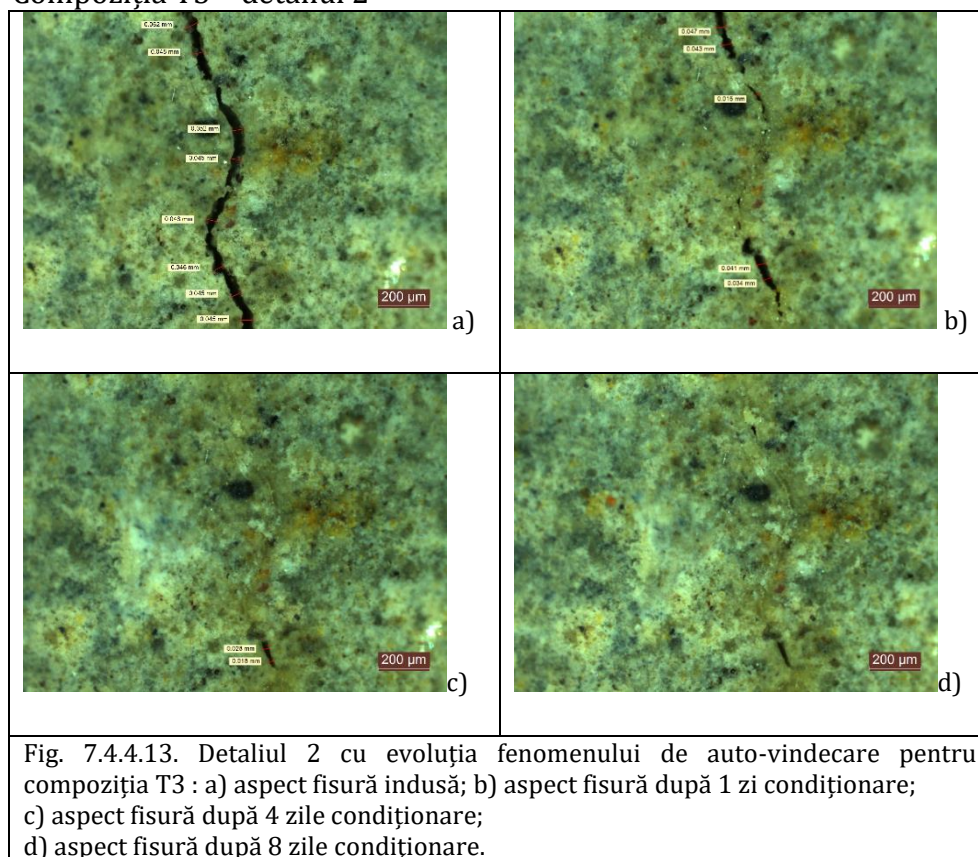


Fig. 7.4.2.10. Evoluția fenomenului de auto-vindecare pentru compoziția T1 (Detaliul 1): a) aspect fisură indusă; b) aspect fisură după 1 zi condiționare; c) aspect fisură după 4 zile condiționare; d) aspect fisură după 8 zile condiționare; e) aspect fisură după 14 zile condiționare; f) aspect fisură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

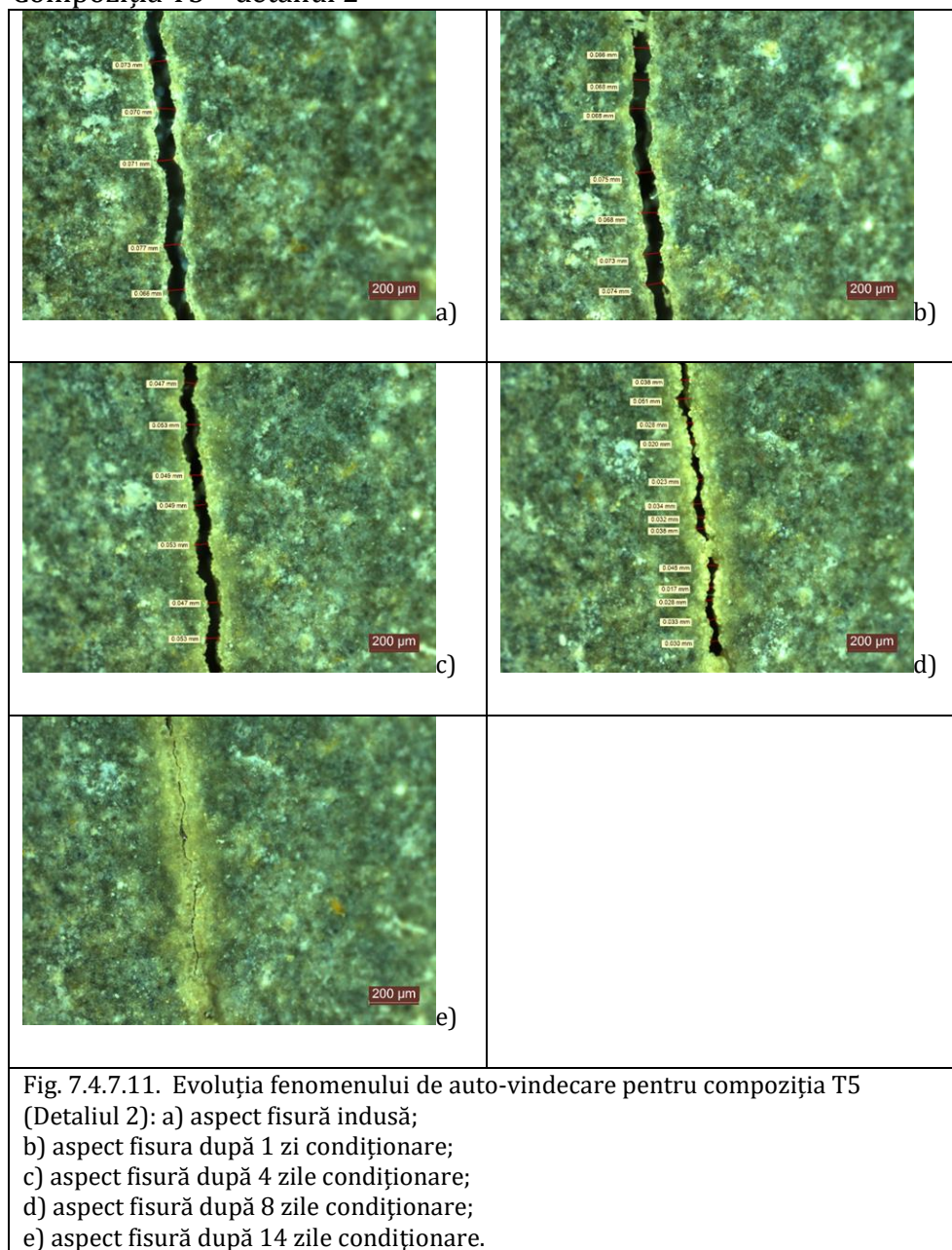
Compoziția T3 – detaliul 1



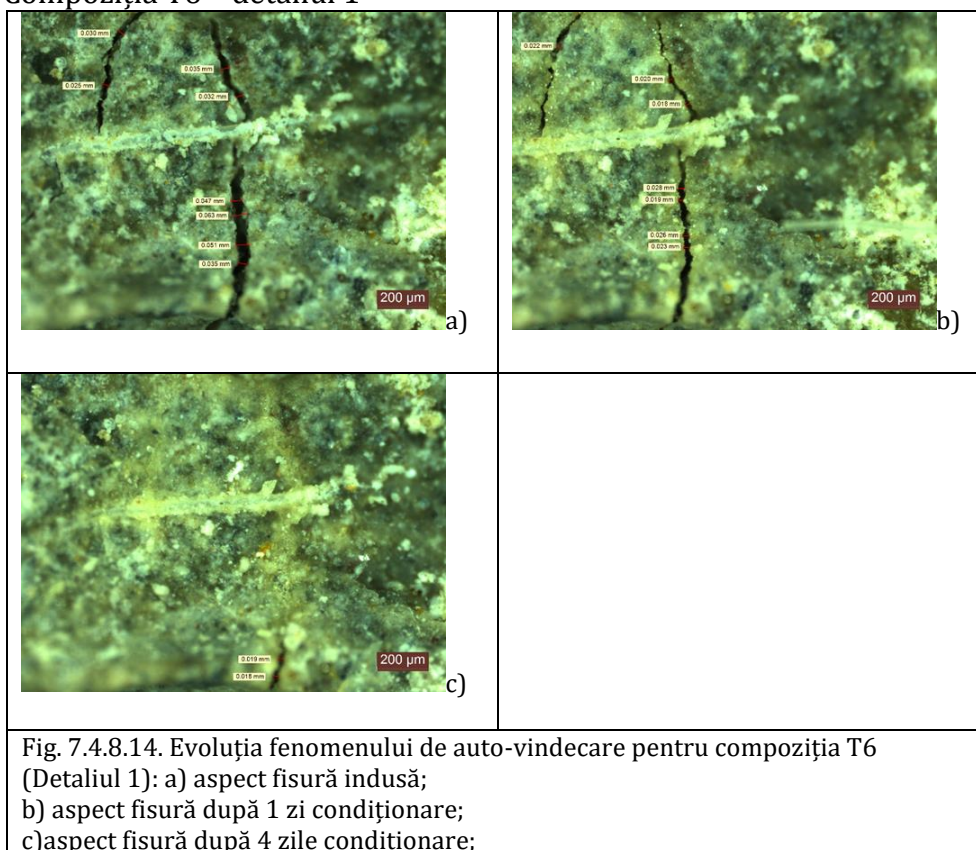
Compoziția T3 – detaliul 2



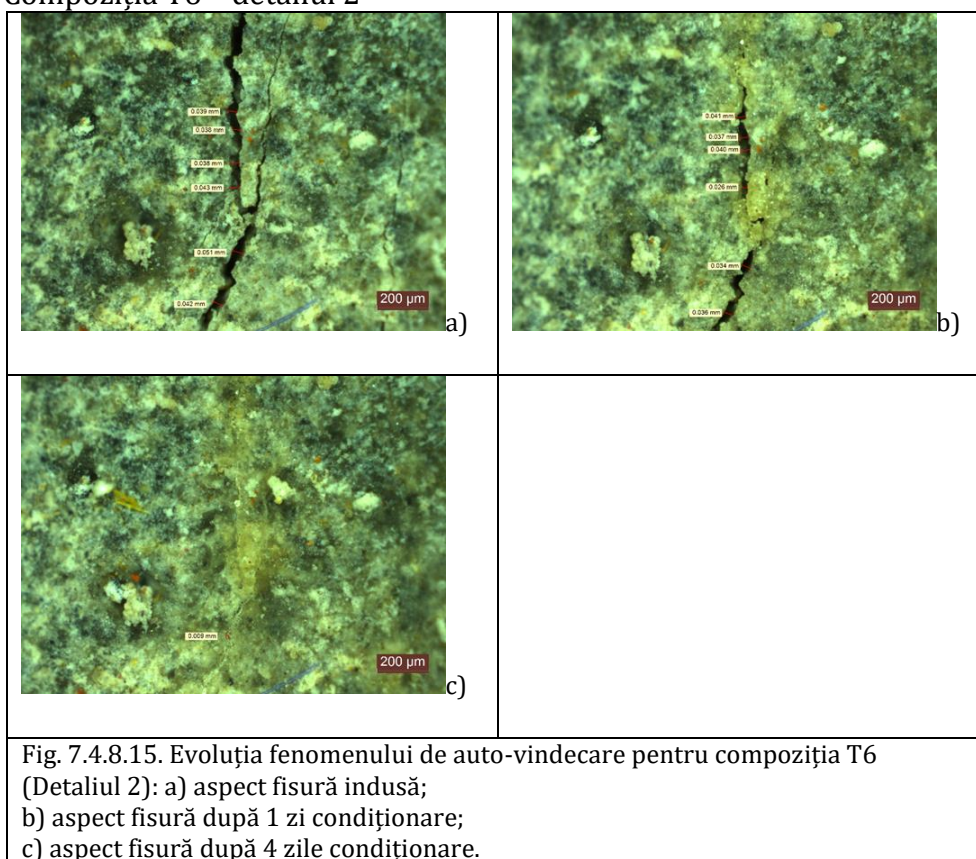
Compoziția T5 – detaliul 2



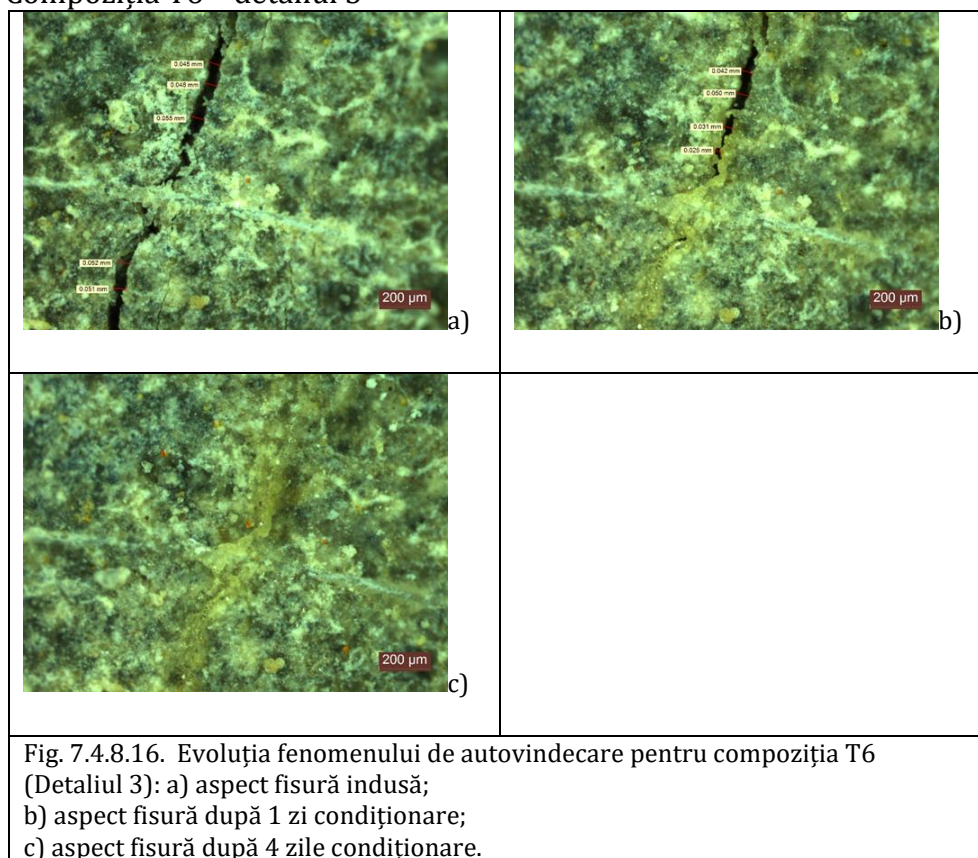
Compoziția T6 – detaliul 1



Compoziția T6 – detaliul 2



Compoziția T6 – detaliul 3



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 compozitele 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 lățimi ale fisurilor și anume 16-136 μm, 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 caractersitici fizico-mecanice superioare.

7.5. Determinarea structurii cristaline ale microbetonului cu ajutorul difracțiilor de raze X (XRD)

Determinarea structurii cristaline 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 materialul 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 structura cristalină a compozițiilor de microbeton.

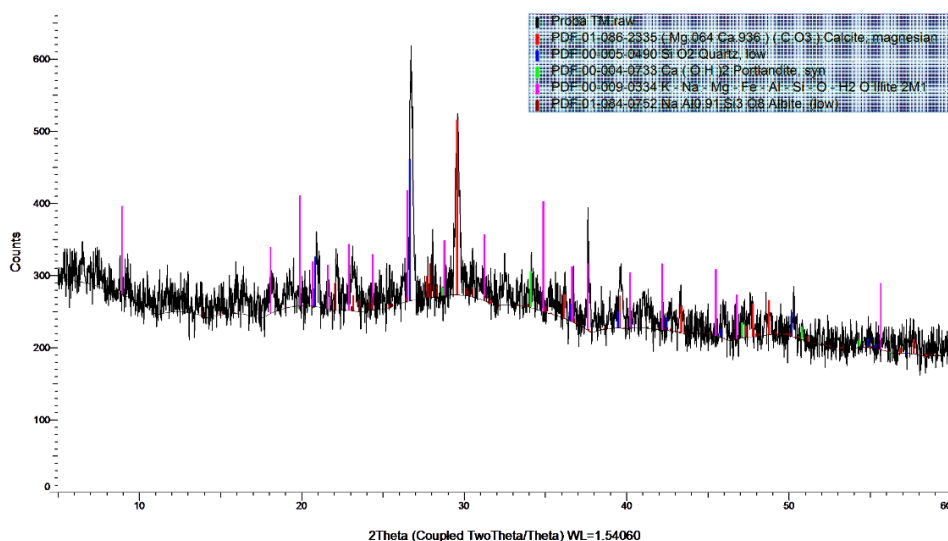


Fig. 7.5.1. Spectrul de difracție cu raze X al probei TM_{sort} 0-4

Spectrul de difracție pe proba de microbeton TM_{sort} 0-4, reprezentat în Fig. 7.5.1. a pus în evidență un amestec format din următoarele faze minerale: calcit, quartz, portlandite, ilite, albite.

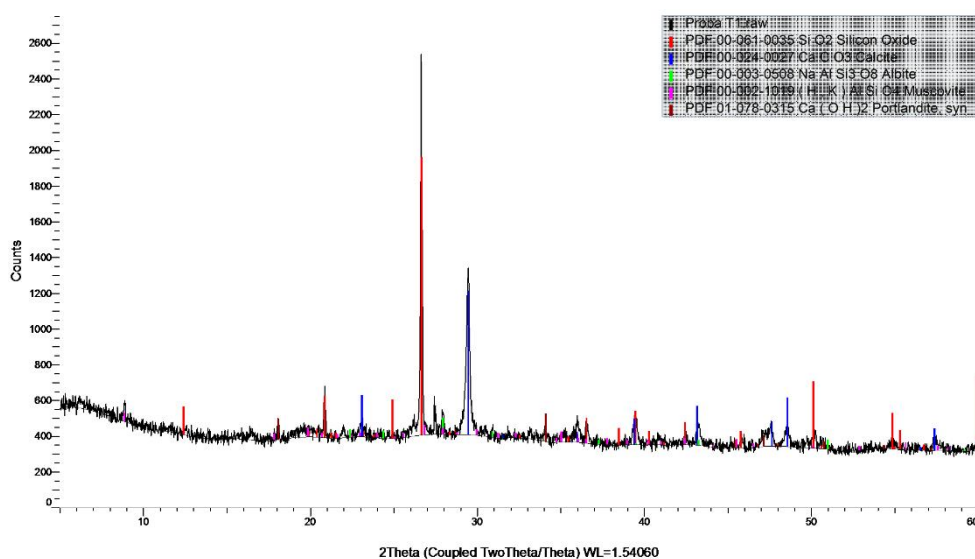


Fig. 7.5.2. Spectrul de difracție cu raze X al probei T1

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: quartz, calcit, albite, muscovite , portlandite.

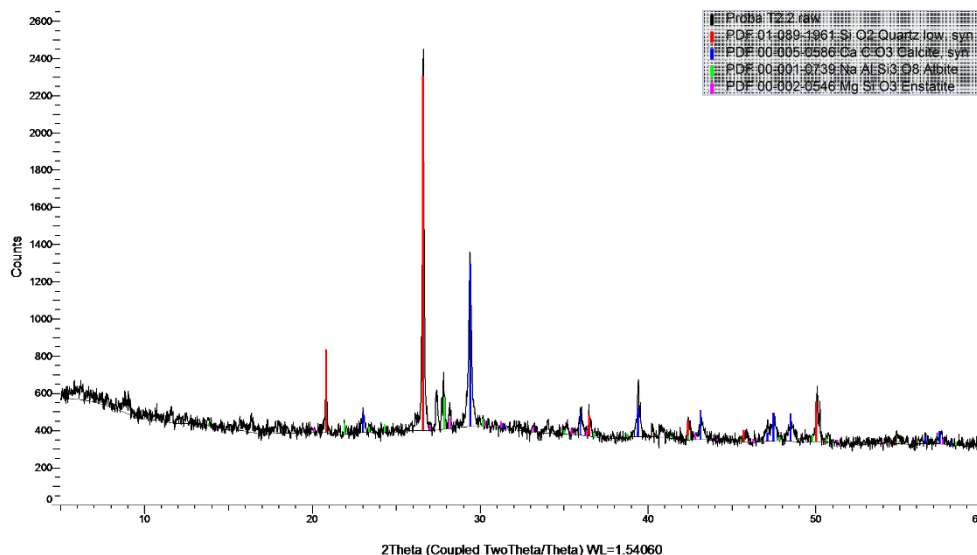


Fig. 7.5.3. Spectrul de difracție cu raze X al probei T2

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: quartz, calcit, albite, muscovite , portlandite.

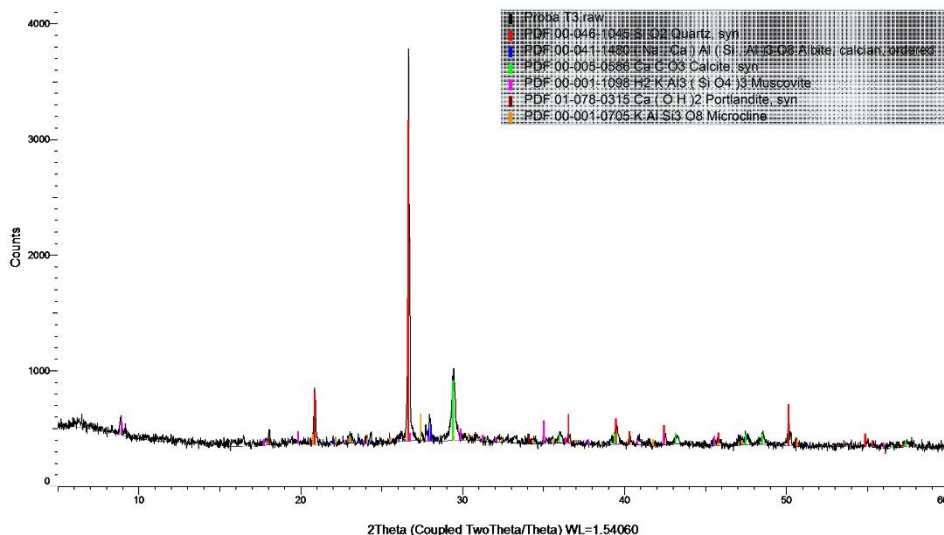


Fig. 7.5.4. Spectrul de difracție cu raze X al probei T3

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: quartz, albite, calcite, , muscovite , portlandite, microcline.

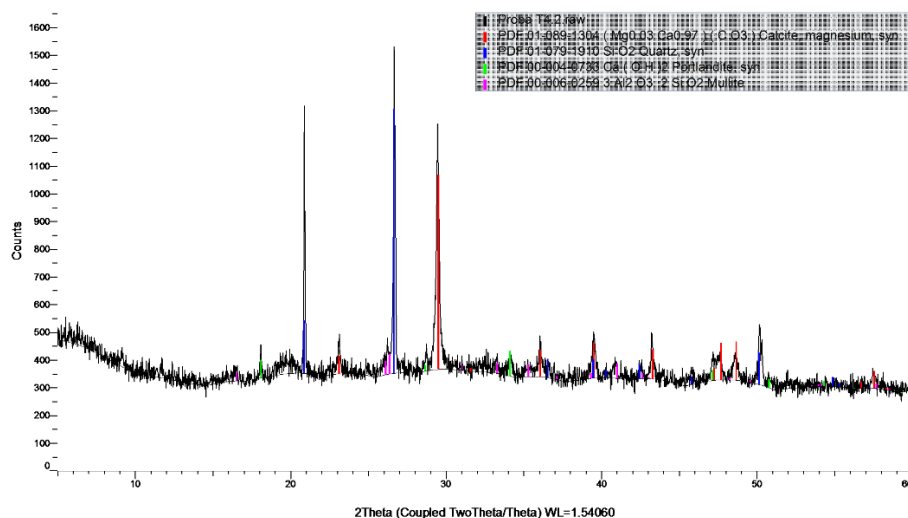


Fig. 7.5.5. Spectrul de difracție cu raze X al probei T4

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: calcite, quartz, portlandite, mulite.

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: quartz, calcite, microcline, portlandite.

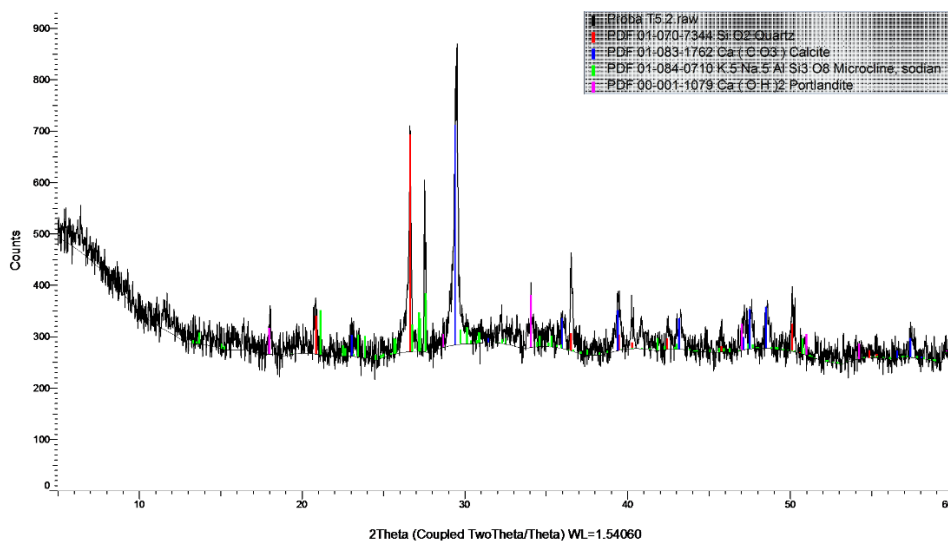


Fig. 7.5.6. Spectrul de difracție cu raze X al probei T5

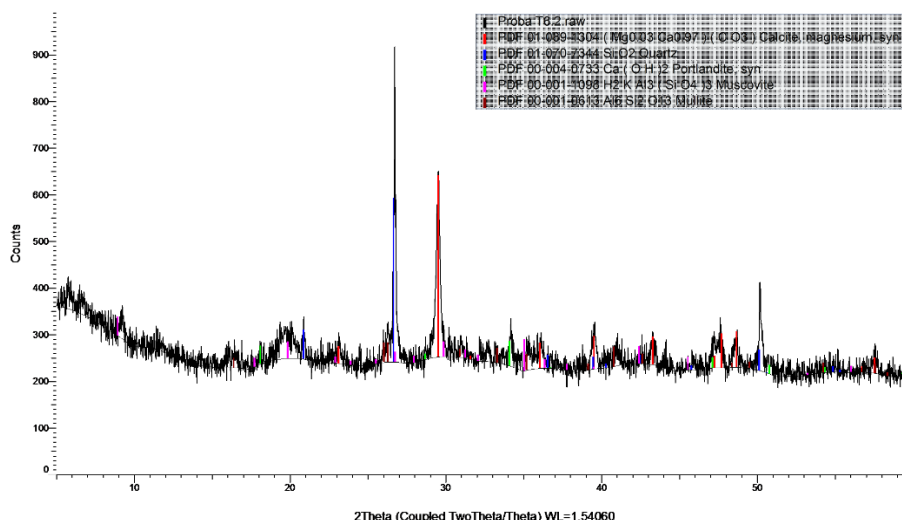


Fig. 7.5.7. Spectrul de difracție cu raze X al probei T6

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: quartz, albite, calcite, muscovite, portlandite, microcline.

- **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:

- Quartz-ul;
- Albite;
- Clacite;
- Muscovite;
- Microcline;
- Portalndite.

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 crislaline, silicaților încapsulați, tuburilor umplute cu diferite substanțe și bacterii. Pentru a satisface criterii 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, inițiindu-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 reaprezentat de cel indus de adaosuri hidroizolante cristaline. Mecanismul de auto - vindecarea autonomă realizat cu polimeri superabsorbanți, 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 preliminară 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-uscă 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-uscă.
- compoziția T1 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim $136 \mu\text{m}$, după 8 cicluri ud-uscă.
- compoziția T2 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim $85 \mu\text{m}$, după 8 cicluri ud-uscă.
- compoziția T3 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim $85 \mu\text{m}$, după 8 cicluri ud-uscă.
- compoziția $TM_{\text{nisip standard}}$ prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim $68 \mu\text{m}$, după 20 cicluri ud-uscă.
- compoziția T4 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim $78 \mu\text{m}$, după 20 cicluri ud-uscă.
- compoziția T5 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim $74 \mu\text{m}$, după 20 cicluri ud-uscă.
- compoziția T6 prezintă vindecare completă a fisurilor cu deschidere de maxim $60 \mu\text{m}$, după 4 cicluri ud-uscă.

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, evidențiindu-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-uscă (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 cementoase 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.