

PREFAȚĂ

Lucrarea de față, intitulată „Studiul comportării materialelor compozite prin metode complexe” se încadrează în domeniul de doctorat „Inginerie Civilă și Instalații”, fiind realizată în cadrul Departamentului Construcții Civile și Management, Facultatea de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, derulată în perioada 2014-2018.

Având ca punct de plecare provocările prezente în industria construcțiilor, care se referă la utilizarea redusă a energiei și a materiilor prime, combinată cu exigențe ridicate, această lucrare constituie o cercetare a materiilor neconvenționale, a compozitelor și a investigațiilor contemporane. De asemenea, își propune găsirea răspunsurilor la următoarele întrebări: Cum pot fi îmbunătățite materialele tradiționale utilizate în construcții, precum betonul și/sau mortarul, în vederea obținerii unor proprietăți mecanice îmbunătățite cu o durabilitate crescută? Cum poate fi redus consumul de materii prime implicate în conceperea materialelor noi? Care sunt metodele moderne de investigație care pot fi utilizate în analiza materialelor compozite cu matrice minerală, armate cu fibre discontinue?

Această lucrare reprezintă, deci, o contribuție în vederea dezvoltării cunoștințelor în ceea ce privește compozitele în domeniul construcțiilor civile, în special a celor cu matrice minerală și fibre discontinue, realizată în urma analizei literaturii de specialitate și culegerea informațiilor, respectiv a datelor necesare în acest sens. Studiarea aprofundată a compozitelor și a materialelor care pot intra în compoziția acestora a avut ca scop înțelegerea fenomenelor complexe care au loc la nivel de constituenți, la mezo- și micro-scară, în vederea îmbunătățirii materialelor tradiționale și simularea comportamentului folosind metode analitice și numerice. Această abordare, relativ nouă atât pe plan național, cât și internațional, permite o analiză complexă și reducerea numărului testelor de laborator, precum și utilizarea cât mai bună a componentelor și resurselor de materii prime. Bineînțeles, această abordare nu înlocuiește testele tradiționale și încercările de laborator.

Se poate afirma deci, că acest studiu datorită importanței pe care îl prezintă din punct de vedere tehnic și constructiv se înscrie în sfera preocupărilor de mare actualitate a cercetătorilor din domeniul materialelor de construcții.

Desfășurarea cercetării, respectiv elaborarea tezei a fost realizată cu ajutorul și îndrumarea permanentă a doamnei prof. dr. ing. Daniela Lucia MANEA. Doresc să-i mulțumesc pe această cale și să-mi exprim stima și, nu în ultimul rând, recunoștința față de conducătorul științific al acestei lucrări, care, pe parcursul programului de doctorat, mi-a acordat o deosebită atenție și ajutor, respectiv tot sprijinul pentru îmbunătățirea și finalizarea lucrării.

Doresc să-i aduc mulțumiri speciale domnului Conf. dr. ing. Claudiu ACIU pentru ajutorul și sprijinul acordat în perioada elaborării tezei de doctorat și îndrumarea pe toată această perioadă, respectiv domnilor tehnicieni din cadrul Laboratorului de Materiale de Construcții, ing. Augustin SUCIU și Marin POTRA pentru seriozitatea și dăruirea cu care au contribuit la realizarea programului experimental a lucrării. În același timp, vreau să-i mulțumesc companiei Romfracht Fibre, România, pentru sprijinul și contribuția acordată, oferind fibrele de polipropilenă și cele de oțel, utilizate în programul experimental.

Adresez, de asemenea, mulțumiri membrilor comisiei de îndrumare, pentru sugestiile și analiza rapoartelor științifice și a tezei de doctorat, domnilor prof. dr. ing. Ioan POP și prof. dr. ing. Horia-Aurel ANDREICA.

Finalizarea programului experimental și efectuare încercărilor nu era posibilă fără ajutorul domnului decan prof. dr. ing. Cristian Mircea DUDESCU, Facultatea de Mecanică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, respectiv ajutorul doamnei director dr. ing. Henriette SZILAGYI de la N.I.R.D. URBAN-INCERC Cluj-Napoca. Folosesc acest prilej pentru a le mulțumi încă o dată pentru atenția, ajutorul și amabilitatea acordată.

Nu în ultimul rând, vreau să dedic această lucrare, și vreau să îi mulțumesc mamei mele, care singură, a făcut posibilă finalizarea tuturor studiilor mele și m-a susținut de-a lungul acestor ani.

CUPRINS

PREFAȚĂ

CUPRINS

LISTA DE FIGURI

LISTA DE TABELE

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

1.1.	Aspecte generale și introducere în tema de cercetare	15
1.2.	Motivația cercetării.....	17
1.3.	Obiectivele lucrării	19
1.1.	Structura lucrării	21

CAPITOLUL 2

STADIUL ACTUAL CU PRIVIRE LA MATERIALELE COMPOZITE

2.1.	Definirea conceptului de material compozit.....	23
2.2.	Tipurile și clasificarea materialelor compozite.....	25
2.3.	Aspecte cu privire la fazele constituente ale materialelor compozite.....	28
2.3.1.	Matrice	29
2.3.1.1.	<i>Matricea polimerică</i>	31
2.3.1.2.	<i>Matricea metalică</i>	33
2.3.1.3.	<i>Matricea ceramică</i>	33
2.3.2.	Ranforsant	34
2.3.2.1.	<i>Fibrele de carbon</i>	39
2.3.2.2.	<i>Fibre de sticlă</i>	46
2.3.2.3.	<i>Fibre de aramid</i>	49
2.3.2.4.	<i>Fibre de polipropilenă</i>	52
2.3.2.5.	<i>Fibre metalice</i>	54
2.3.2.5.	<i>Fibre naturale organice și minerale</i>	55
2.3.3.	Conceptul de transfer al eforturilor și interfața matrice-armătură	58
2.4.	Mortar armat dispers cu fibre	62
2.4.1.	Definirea și evoluția mortarelor armate cu fibre	62
2.4.2.	Particularitățile mortarelor pe bază de ciment armat dispers cu fibre	66
2.4.2.1.	<i>Influența componenților matricei asupra proprietăților compozitului</i>	67
2.4.2.2.	<i>Rigiditatea relativă fibră-matrice</i>	72
2.4.2.3.	<i>Geometria și influența caracteristicilor fizice ale fibrelor</i>	72

2.4.2.4.	<i>Morfologia și structura mortarelor armate cu fibre</i>	74
2.4.2.5.	<i>Aderența și interfața mortar-fibră</i>	77
2.4.2.6.	<i>Lucrabilitatea mortarelor armate dispers. Proprietățile în stare proaspătă</i>	80
2.4.2.7.	<i>Capacitatea portantă și procesul de fisurare a mortarelor cu fibre</i>	81
2.4.2.8.	<i>Tipurile de fibre și reglementările privind utilizarea acestora în mortare</i>	86
2.4.2.9.	<i>Prepararea și punerea în operă a mortarelor armate dispers.</i> ..	91
2.5.	Avantajele utilizării fibrelor scurte în compoziția mortarelor	94
2.6.	Domenii de utilizare ale mortarelor armate cu fibre	96
2.6.1.	Reparații locale ale structurilor degradate din beton	97
2.6.2.	Reabilitarea rosturilor la structuri de zidărie.....	98
2.6.3.	Lucrări de sub-turnare	99
2.6.4.	Tencuieli și lucrări de finisare rezistente la deformări	100
2.6.1.	Lucrări de zidărie și îmbinări dintre tipuri diferite de materiale	102
2.6.5.	Elemente și panouri prefabricate	102
2.7.	Mortare armate cu fibre predozate.....	102

CAPITOL 3

ASPECTE PRIVIND TESTAREA VIRTUALĂ A MORTARELOR

3.1	Introducere în conceptul de analiză virtuală multi-scalară	108
3.2	Analiza multi-scalară a materialelor compozite	111
3.3	Teoria câmpului-mediului (Mean-Field Homogenization).....	114
3.4	Metode analitice și semi-analitice. Scheme de omogenizare	119
3.4.1	Modelul lui Voigt și Reuss	119
3.4.2	Modelul Kröner și Eshelby.....	120
3.4.3	Modelul Mori-Tanaka.....	124
3.5	Metode numerice de analiză. Metoda elementului finit.....	128
3.5.1	Prezentarea generală a metodei	128
3.5.2	Procedura simplificată MEF.....	131
3.5.3	Aspecte privind analiza mortarelor cu MEF	133

CAPITOL 4

PROGRAMUL EXPERIMENTAL

4.1	Aspecte generale.....	137
4.2	Materiale utilizate la realizarea mortarelor	138

4.2.1	Ciment Portland compozit	139
4.2.2	Apă	139
4.2.3	Agregat. Compoziția granulometrică a nisipului.....	139
4.2.4	Alegerea fibrelor și caracteristicile acestora	141
4.2.4.1	<i>Fibre de oțel RFC</i>	141
4.2.4.2	<i>Fibre de polipropilenă RoFero</i>	143
4.2.4.3	<i>Fibre de carbon scurte</i>	144
4.3	Stabilirea și prepararea rețetelor de mortar.....	146
4.4	Determinări asupra mortarelor în stare proaspătă și stare întărită.....	149
4.4.1	Determinarea consistenței mortarelor.....	149
4.4.2	Omogenizarea și verificarea gradului de omogenitate	149
4.4.3	Determinarea densității aparente.....	150
4.4.4	Determinarea aderenței la stratul suport.....	151
4.4.5	Determinarea rezistenței la încovoiere	153
4.4.5.1	<i>Epruvetele de încercare</i>	153
4.4.5.2	<i>Aparatura și echipamentele utilizate</i>	154
4.4.5.3	<i>Procedura de determinare</i>	155
4.4.5.4	<i>Rezultatele obținute în urma încercării la încovoiere</i>	155
4.4.6	Determinarea rezistența la compresiune	161
4.4.6.1	<i>Considerente generale. Scopul determinării</i>	161
4.4.6.2	<i>Epruvetele de încercare</i>	161
4.4.6.3	<i>Aparatura și echipamentele utilizate</i>	162
4.4.6.4	<i>Procedura de determinare și rezultatele încercării</i>	164
4.4.7	Determinarea rezistenței la întindere directă	171
4.4.7.1	<i>Considerente generale. Scopul determinării</i>	171
4.4.7.2	<i>Eșantioanele de încercare</i>	173
4.4.7.3	<i>Aparatura și echipamentele utilizate</i>	173
4.4.7.4	<i>Procedura de determinare și rezultatele încercării</i>	174
4.4.8	Determinarea modului de elasticitate la compresiune.....	175
4.4.8.1	<i>Considerente generale. Scopul determinării</i>	175
4.4.8.2	<i>Eșantioanele de încercare</i>	175
4.4.8.3	<i>Aparatura și echipamentele utilizate</i>	175
4.4.8.4	<i>Procedura de determinare și rezultatele încercării</i>	175

CAPITOL 5

ANALIZA VIRTUALĂ ALE COMPOZITELOR STUDIAȚE

5.1	Considerente generale privind proiectarea asistată de calculator și modelarea mortarelor armate dispers.....	176
-----	--	-----

5.2	Generalități privind metodologia și programul de calcul utilizat	178
5.2.1	Analiza structurii compozitelor în vederea definirii RVE-urilor.....	179
5.2.2	Modele materiale și legile constitutive	181
5.2.3	Legătura fazelor constituente	182
5.3	Aplicarea metodelor semi-analitice	183
5.3.1	Definirea și construirea modelului de material	183
5.3.2	Model compozit cu două faze constituente: matrice și fibră.....	185
5.3.2.1	<i>Compresiune uni-axială</i>	185
5.3.2.2	<i>Întindere directă uni-axială</i>	185
5.3.3	Model compozit cu trei faze constituente: matrice, fibră și ITZ.....	185
5.3.3.1	<i>Compresiune uni-axială</i>	185
5.3.3.2	<i>Întindere directă uni-axială</i>	185
5.3.4	Analiza privind modificarea compozitelor prin schimbarea caracteristicilor fibrelor și a fracției volumice.....	185
5.3.5	Estimarea coeficientului de eficiență privind orientarea fibrelor	186
5.4	Aplicare MEF și modelarea numerică a materialelor studiate.....	187
5.4.1	Definirea și construirea modelului de material	187
5.4.2	Determinarea modulelor de elasticitate folosind MEF	189
5.4.3	Testarea virtuală la întindere directă a compozitelor folosind MEF	189

CAPITOL 6

INTERPRETAREA REZULTATELOR

6.1	Evaluarea încercărilor experimentale și interpretarea rezultatelor obținute privind testele de laborator.....	190
6.2	Evaluarea eficienței testelor virtuale și comparația metodelor semi-analitice și numerice	195
6.3	Evaluarea eficienței fibrelor studiate și comparația acestora.....	197

CAPITOL 7

CONCLUZII, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE

7.1	Concluzii	271
7.2	Contribuții personale	279
7.3	Direcții viitoare de cercetare.....	280

BIBLIOGRAFIE	213
--------------------	-----

LISTA DE FIGURI

Figura 1.1 – Compozit cu matrice argiloasă armat cu păr de animal (fibre proteice); (a) Imagine SEM cu matrice argiloasă și fibra de lână; (b) Imagine SEM cu fibra de lână și fibrilația acestuia. [42]	17
Figura 2.1 – Morfologia lemnului (analiza SEM) (a) lemn de esență moale și secțiunea transversală aferentă; (b) lemn de esență tare și secțiunea aferentă. [78]	24
Figura 2.2 – Fazele constituente ale materialelor compozite: matricea și ranforsantul (particule, fibre etc.).....	25
Figura 2.3 – Analiza compozitelor armate cu fibre de carbon folosind microscopia electronică de baleiaj (SEM), având matrice; (a) polimerică [56]; (b) metalică [119]; (c) ceramică (pastă de ciment) [75]; (d) carbonică (compozit carbon-carbon)[17]. Imagini SEM după încercări mecanice - cedarea compozitelor.	26
Figura 2.4 – Tipurile de materiale compozite în funcție de armătură.	28
Figura 2.5. – Imagine SEM cu fibre sintetice: (a) sticlă; (b) carbon; (c) aramid. [100].....	30
Figura 2.6 – Influența direcției solicitării uni-axiale asupra proprietăților materialelor compozite armate cu fibre orientate uni-direcțional; (a) solicitare aplicată după direcția fibrelor; (b)(c) solicitare după direcția transversală.	36
Figura 2.7 – Imagine SEM cu fibre de nailon (a)(b) și fibre de poliester (c)(d) – Încercarea la întindere; (a) Fisură inițială transversală; (b) Fisura de forfecare de-a lungul fibrei de nailon, rupere și cedare prin oboseală; (c) Ruperea fibrei de poliester după 83 000 de cicluri la o sarcină de 65% din efortul de rupere normal; (d) Ruperea finală – oboseala fibrei la încercarea uni-axială de întindere.....	38
Figura 2.8 – Modul de ruperea la întindere a fibrelor fragile; (a) fibră de sticlă – rupere având un singur plan de clivaj (despicare paralelă cu rețeaua structurii cristaline); (b) fibra de sticlă – mai multe zone și planuri de rupere; (c) fibră ceramică – carbură de siliciu cu deviere la rupere; (d) Fibră de elastan sau spandex.....	39
Figura 2.9 – Curba caracteristică efort-deformație pentru diferite tipuri de fibre și rezistența la întindere.....	40
Figura 2.10 – Fibre de carbon; (a) Imagine SEM – microstructura betonului armat cu fibre de carbon și micro-fisuri în matricea cimentoasă; (b) Imagine SEM – fibra de carbon (culoare închisă) în comparație cu firul de păr uman (culoare deschisă și grosime mare).[117][82]...	41
Figura 2.11 – Structura fibrei de grafit. Imagine SEM [107] și reprezentarea schematică....	42
Figura 2.12 – Efectul temperaturii asupra fibrelor de carbon PAN în timpul procesului de carbonizare. Suprafața fibrelor supuse la aceeași temperatură, dar două viteze de încălzire diferite, conform [95].	43

Figura 2.13 – Suprafața și secțiunea filamentelor de fibre de carbon, pe bază de: (a) PAN; (b) Hidrocarburi. [107]	44
Figura 2.14 – Tipurile de fibre de carbon în funcție de performanțele mecanice: rezistența la întindere și modulul de elasticitate.	46
Figura 2.15 – Fibre de sticlă (a) Imagine SEM: fibre de sticlă în matricea polimerică; (b) Imagine SEM: fibre de sticlă în matrice cimentoasă (mortar). [74][70]	48
Figura 2.16 – Imagine SEM – efectul absorbției de apă asupra rezistenței la întindere: interfața slăbită dintre materialul de ranforsare (fibră de sticlă) și matricea de polimer; (a) $\times 400x$ și $\times 5000x$: 1.7% conținut de apă; (b) $\times 400x$ și $\times 5000x$: 5.2% conținut de apă; suprafața și ruperea fibrelor indică scăderea forțelor de aderență la interfața polimer – ranforsant odată cu creșterea conținutului de apă. [102].....	49
Figura 2.17 – Imaginea SEM a unui compozit cu matrice polimerică armat cu fibre de aramid.	52
Figura 2.18 – Compozit stratificat armat cu fibre de aramid; (a) Modul de rupere a fibrei de aramid, Kevlar 29 la întindere; (b) Fracturi multiple: fractură coezivă (în matrice) și adezivă (între matrice și fibră). Propagarea fisurilor în matrice provoacă slăbirea și fisurarea în zona de interfață matrice-fibră. Acest tip de fractură se numește fractură adezivă.	53
Figura 2.19 – Morfologia fibrelor naturale celulozice; (a) fibră de iută; (b) fibră de in; (c) fibră de sisal. [38][140].....	56
Figura 2.20 – Imagini SEM: modul de rupere a fibrelor naturale la întindere: (a) sisal; (b) bambus; (c) nucă de cocos.	57
Figura 2.21 – Conceptul de transfer al eforturilor între matrice și armătura; (a) interfață neglijată: fazele constituente se deformează liber; (b) interfață și legătură chimică bună între constituenți: influența armăturii asupra deformării matricei.....	60
Figura 2.22 – Fibra supusă la solicitări de întindere înglobată într-o matrice oarecare.	61
Figura 2.23 – Reprezentarea compoziției și a microstructurii mortarului simplu și a mortarului armat cu fibre. Microstructură tipică la $1200x$ mărire (mortar simplu) și (b) $120x$ mărire pentru compozit, conform [79] analiză SEM.	63
Figura 2.24 – Analiza mortarelor istorice prin difracție cu raze X (a) și microscopia electronică; 1 – matrice argiloasă; 2 – ghips; 3 – cuarț; 4 – pori; (a) Analiza compoziției mortarului de la piramida Meidum; (b) Imagine SEM, proba E ₁ – Meidum, Egipt; (c) Imagine SEM, proba E ₂ – Meidum, Egipt; (d) mortar de la piramida Unas, Saqqara, lângă Cairo, Egipt; (e) granule de nisip cu formă eoliană în mortarul de la Piramida Cheops.....	65
Figura 2.25 – Forma particulelor de nisip; (a) artificial; (b) natural.....	68
Figura 2.26 – Distribuția efortului de întindere în fibră când lungimea este (a) mai mică decât l_c ; (b) egală cu l_c ; (c) mai mare decât l_c	74

Figura 2.27 – Fibre de armare mono-filament și fibrilate. Distribuția eforturilor de-a lungul fibrelor.	75
Figura 2.28 – Influența geometriei fibrelor de oțel asupra aderenței la matrice evidențiat prin testul „pull-out”. Ancorare mecanică și aderență sporită datorită formei răsucită (curbă albastră) și capetelor îndoite (curbă roșie).	75
Figura 2.29 – Efectul conținutului de fibră asupra comportării și caracteristicile matricei cimentoasă; (a) Influența conținutului de fibră și a raportului l_f/df asupra lucrabilității compozitului; (b) Influența fibrelor de oțel asupra rezistenței la încovoiere.	76
Figura 2.30 – Testul „pull-out”; (a) Matricea cimentoasă și suprafața interfeței după smulgerea fibrei; (b) Efectuarea testului și mașina de încercare.	80
Figura 2.31 – Fibră de oțel în matricea de mortar și zona de tranziție. Imagine SEM.	81
Figura 2.32 – Schematizarea răspunsului mecanic la solicitări uni-axiale de întindere al compozitelor cimentoase armate cu fibre discontinue.	84
Figura 2.33 – Influența armării cu fibre discontinue asupra comportamentului matricei cimentoase; (a) influența fracției volumică; (b) influența raportului geometric ale fibrelor.	86
Figura 2.34 – Comportarea mortarelor armate cu fibre discontinue la solicitări de încovoiere; (a) Efectul armării cu fibre – caz general; (b) Mortar armat cu fibre de carbon.	87
Figura 2.35 – Tipurile de fibre de oțel; (1) lise/drepte; (2) cu ciocuri; (3) ondulate; (4) capete lărgite; (5) secțiuni lărgite; (6) răsucită; (7) frezată.	88
Figura 2.36 – Fibre de polipropilenă utilizate pentru armarea matricelor cimentoase; (a)(b)(c) Macro-fibre; (d) Micro-fibre; (a) Pachet de fibre mono-filament, răsucite nefibrilate; (b) Fibre mono-filament ondulate nefibrilate; (c) Rețea de fibre fibrilate [19]; (d) Fibre scurte (micro) mono-filament.	90
Figura 2.37 – Efectul compoziției sticlei asupra rezistenței la întindere a fibrelor după expunere acestora în soluție de ciment Portland. Analiza SEM a fibrelor după 200 ore în mediu alcalin (ciment, pH = 12.9) la 80 °C.	91
Figura 2.38 – Pagoda Longhu, China – starea degradată în cutremurul din Wenchuan în 2008 și reparată.	97
Figura 2.39 – Repararea elementelor din beton utilizând mortar armat cu fibre; (a) Repararea suprafeței stâlpului și protejarea armăturii cu mortar; (b) Umplerea dislocării și protejarea armăturii cu mortar la grinda de beton.	98
Figura 2.40 – Utilizarea mortarelor de sub-turnare armate cu fibre de oțel și aspectul compoziției acestuia.	101
Figura 2.41 – Fațade reabilite folosind mortare de tencuiele speciale armate cu fibre folosind mortar Lasselsberger-Knauf pe bază de var-ciment cu adaos de fibre, adecvat pentru renovarea tencuielelor vechi [154]. Primăria orașului Sf. Gheorghe, România (primul caz) și fațade reabilite în Ungaria (cazul doi și trei).	102





Figura 2.42 – Reabilitarea viaductului Pescara, Italia. În cadrul proiectului s-a utilizat mortarul armat cu fibre flexibile Mapegrout FMR pentru reabilitarea structurilor degradate de beton armat.	106
Figura 2.43 – Reabilitarea viaductului Valea lui Stan, 2014. Refacerea secțiunii din beton prin turnarea unui mortar de reparații structurale, Mapegrout Colabile GF armat cu fibre de oțel. Beton degradat de la baza stâlpului.	106
Figura 2.44 – Aplicarea mortarului armat cu fibre Mapei pe structuri subterane din beton, metroul M4, Budapesta [200].	106
Figura 2.45 – Reabilitarea pistei de aeroport Rimini, Italia (a) și consolidarea substratului pardoselii la galeria Vittorio Emanuele II, Milano, Italia (b) folosind mortar armat cu fibre rigide de oțel, Mapei, 2012. (b) O legendă spune că rotirea cu călcâie pe simbolul de taur aduce noroc. Astfel, pardoseala din mozaic necesita un substrat puternic.	107
Figura 2.46 – Reabilitarea coșului de fum CET Palas, Constanța cu mortar armat EuroCret (a) și reabilitarea betonului degradat la pereții piscinei la Zoopark Chomutov, Cehia folosind mortar cu fibre Ceresit (b).	107
Figura 2.47 – Mortar armat cu fibre de oțel Pagel utilizat la lucrări de subturnare și ancorare la hale industriale.	107
Figura 2.48 – Pregătirea suprafeței și aplicarea mortarului de reparații EuroCret® cu fibre rezistente la atac sulfatic, Daewoo Mangalia Heavy Industries.	108
Figura 3.1 – Exemple de modele 3D – compozite armate cu particule și fibre orientate aleatoriu, realizate prin intermediul Digimat-FE.	110
Figura 3.2 – Niveluri de modelare a materialelor.	113
Figura 3.3 – Ilustrarea conceptului de element reprezentativ de volum.	114
Figura 3.4 – Ideea principală a omogenizării luând în considerare rigiditatea fazelor constituente. Se dă un material eterogen (stânga) și condițiile la limită (BCs) și se determină prin omogenizare, utilizând MFH rigiditatea materialul echivalent omogen (dreapta) respectând condițiile la limită (BCs).	116
Figura 3.5 – Tipurile de elemente înglobate în matricea unui material polifazic.	123
Figura 3.6 – Operațiunea fictivă a lui Eshelby. Etapele principale.	123
Figura 3.7 – Ilustrarea modelului M-T (Mori-Tanaka). Izolarea incluziunii într-o matrice fictivă, luând în considerare efectul celorlalte incluziuni prin considerarea unei deformații inițiale produsă în matrice reală.	127
Figura 3.8 – Procedura MEF simplificată; (a) schema de grindă reală; (b) modelul matematic, considerând grinda ca și element linear; (c) discretizare în elemente finite e	132
Figura 3.9 – Analiza mortarului simplu [110], modelând ca și material compozit alcătuit din trei faze constituente: matrice cimentoasă (pasta de ciment), agregat (nisip) și ITZ; (a) RVE realistic 3D; (b) RVE discretizat în 867 309 de elemente finite.	136

Figura 4.1 – Curba granulometrică și histograma granulației.	141
Figura 4.2 – Aspectul fibrelor utilizate în programul experimental. [159][160][199].....	142
Figura 4.3 – Frația volumică ale fibrelor în compoziția mortarelor.....	148
Figura 4.4 – Masa epruvetelor 4x4x16 (a) și densitatea aparentă (b). Variația valorilor obținute în funcție de rețetă.	152
Figura 4.5 – Determinarea aderenței mortarelor la stratul suport. Aparatura utilizată și cărămida cu mortar armat cu fibre de carbon după realizare.	154
Figura 4.6 – Compactarea epruvetelor prismatice în Laboratorul de Materiale de construcții, UTCN.	154
Figura 4.7 – Presa utilizată în vederea determinării rezistențelor la încovoiere.	155
Figura 4.8 – Mașina automată pentru încercarea la încovoiere Controls 65-L0015/A din dotarea laboratorului UTCN și imaginea captată în timpul încercării. Ruperea epruvetei de mortar standard.	156
Figura 4.9 – Rezistențele obținute la încovoiere. Variația rezultatelor determinate pe trei epruvete și diferența față de matricea acestora.....	158
Figura 4.10 – Diagrama de efort-deformație înregistrată la încovoiere în prima etapă de încercare.....	159
Figura 4.11 – Modul de cedare (b) și suprafața de rupere (b) al epruvetei R1-O1. Aspectul R2-P1 după separarea părților de prismă.	160
Figura 4.12 – Determinarea rezistenței la compresiune în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca; (a) presa hidraulică Tecnotest, laboratorul de Materiale de Construcții; (b) plăcuțele utilizate în cazul resturilor de prisme, laboratorul Facultății de Mecanică; (c) presa hidraulică Advantest 9, Laboratorul Central.....	163
Figura 4.13 – Modul de cedare a resturilor de prisme după încercarea la compresiune. Tip și mod de cedare corespunzător, conform standardul în vigoare.	165
Figura 4.14 – Rezistențele obținute la compresiune. Variația rezultatelor determinate pe patru epruvete și diferența față de matricea acestora.....	167
Figura 4.15 – Diagrama de efort-deformație înregistrată la compresiune în prima etapă de încercare.....	169
Figura 4.16 – Epruvetele cilindrice după încercarea la compresiune.....	171
Figura 4.17 – Diagrama de efort-deformație idealizată pentru compozite testate în prima etapă. Curbele reale înlocuite cu cele approximate prin interpolare polinomială.	171
Figura 4.18 – Posibilitățile de determinare și estimare a rezistenței la întindere în cazul betoanelor și mortarelor. Relația între rezistențe în funcție de modul de determinare.	172
Figura 4.24 – Ruperea epruvetelor și distanța față de mijlocul secțiunii constante. Hașura roșie indică ruperea necorespunzătoare (distanță prea mare față de ± 0.00) și proba care a fost eliminată.	175

Figura 5.1 – Exemple de geometrii implementate în Digimat-FE pentru definirea formei incluziunilor.....	180
Figura 5.6 – Ilustrarea conceptelor de legătură perfectă, interfață coezivă, inter-fază coezivă și inter-fază material continuu conform Digimat [147].....	183
Figura 5.7 – Model FE discretizat utilizând tipul „tetra” (Tetra mesh type); (a) Model FE cu matricea eliminată: fibre și stratul de elemente coezive; (b) Vedere close-up a incluziunilor (roșu) și inter-faza coezivă (verde).....	183
Figura 6.1 – Imagine close-up: gol în structura matricei cimentoase în vecinătatea fibrei de oțel – R1-O1.....	192
Figura 6.2 – (a) Fibre de polipropilenă: fibrele lungi leagă părțile separate și după cedare; (b) Fibre de carbon: cedarea matricei este urmată de separarea părților și ruperea bruscă. ...	192

LISTA DE TABELE

Tabelul 2.1 – Tipurile și clasificarea materialelor compozite în funcție de ranforsant.....	26
Tabelul 2.2 – Principalele proprietăți ale materialelor utilizate pentru compozite [58].	28
Tabelul 2.3 – Exemple de matrice în funcție de tipul acestora și proprietățile lor principale..	30
Tabelul 2.4 – Caracteristicile generale ale polimerilor termoplaste și termorigide.....	32
Tabelul 2.5 – Tipurile de fibre utilizate ca ranforsant.	36
Tabelul 2.6 – Exemple de armături și proprietățile principale ale acestora [144].	36
Tabelul 2.7 – Clasificarea materiilor prime utilizate pentru obținerea fibrelor de carbon în funcție de starea de agregare.....	41
Tabelul 2.8. – Proprietățile principale ale fibrelor de carbon în funcție de polimerul de bază.	43
Tabelul 2.9 – Clasificarea fibrelor de carbon în funcție de proprietățile mecanice.	44
Tabelul 2.10 – Clasificarea fibrelor de carbon în funcție de temperatura de tratament termic.	44
Tabelul 2.11 – Avantajele și dezavantajele fibrelor de carbon.	45
Tabelul 2.12 – Compoziția și proprietățile fibrelor de sticlă utilizate pentru compozite.....	47
Tabelul 2.13 – Avantajele și dezavantajele utilizării fibrelor de sticlă.	49
Tabelul 2.14 – Proprietățile generale ale fibrelor de sticlă, carbon și aramid.	50
Tabelul 2.15 – Caracteristicile și comparația fibrelor de sticlă, carbon și aramid.	50
Tabelul 2.16 – Avantajele și dezavantajele fibrelor de aramid.	51
Tabelul 2.17 – Proprietățile principale ale fibrelor de polipropilenă în comparație cu fibrele de polietilenă și nailon.	53
Tabelul 2.18 – Avantajele și dezavantajele fibrelor de polipropilenă.....	53
Tabelul 2.19 – Proprietățile fizico-mecanice ale principalelor tipuri de fibre metalice.....	55

Tabelul 2.20 – Proprietățile principale ale unor fibre naturale. [22][109]	56
Tabelul 2.21 – Proprietățile fizico-mecanice ale fibrei de azbest și comparația cu fibrele de PAV și polipropilenă.	58
Tabelul 2.22 – Rezistența la smulgere matrice cimentoasă – fibră.	79
Tabelul 2.23 – Tabel centralizator. Proprietățile principalelor tipuri de fibre utilizate pentru armarea dispersă a materialelor de construcții cimentoase și proprietățile generale ale matricei cimentoasă.	93
Tabelul 2.24 – Mortare armate cu fibre predozate. Exemple de produse în funcție de producător.	104
Tabelul 4.1 – Raport granulozitate în urma procedurii de cernere, conform EN 933-1.	139
Tabelul 4.2 – Avantajele utilizării fibrelor de oțel RFC 45/50 RomFracht în mortare și materiale de construcții cimentoase, respectiv proprietățile principale ale acestora. [159].....	142
Tabelul 4.3 – Avantajele utilizării fibrelor de polipropilenă ROFERRO în mortare și materiale de construcții cimentoase, respectiv proprietățile principale ale acestora. [160].....	143
Tabelul 4.4 – Avantajele utilizării fibrelor de carbon în mortare și materiale de construcții cimentoase, respectiv proprietățile principale ale acestora.	145
Tabelul 4.5 – Posibilitatea utilizării mortarului armat dispers cu cele trei tipuri de fibre.  nu este aplicabil;  aplicabil;  recomandat;  optim.	146
Tabelul 4.6 – Rețetă de mortar standard pe bază de ciment RS (RS-1/RS-2) pentru 1 m ³ și 4.5 litri.	147
Tabelul 4.7 – Rețeta mortarelor utilizate în programul experimental pentru 4.5 litri.	148
Tabelul 4.8 – Densitatea aparentă ale mortarelor la 28 de zile.	150
Tabelul 4.9 – Rezultatele obținute în urma determină adevăratei adeziunii la stratul suport.	152
Tabelul 4.10 – Valoarea rezistențelor la încovoiere ale mortarelor, determinate pe cale experimentală în prima și în a doua etapă.	156
Tabelul 4.11 – Clasa de rezistență și marca mortarelor, în funcție de rezistența la compresiune determinată la vârsta de 28 de zile [194][92].	161
Tabelul 4.12 – Valoarea rezistențelor la compresiune ale mortarelor, determinate pe cale experimentală în prima și în a doua etapă pe resturile de prismă.	164
Tabelul 5.3 – Comparația celor trei cazuri, considerând același matrice polimerică și fibră de sticlă: cazul 1 – inter-fază coezivă (Cohesive inter-phase), cazul 2 – interfață coezivă (Cohesive interface); cazul 3 – legătură perfectă (Perfectly bonded interface), realizat în Digimat-FE. [147], [146].....	182

1 CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

1.1. Aspecte generale și introducere în tema de cercetare

Proprietățile materialelor utilizate de către civilizația umană și transformarea materiilor prime în produse finite, respectiv îmbunătățirea proprietăților acestora a fost cercetată încă de la cele mai vechi timpuri, iar necesitatea acestuia continuă să aibă o deosebită importanță și în ziua de azi.

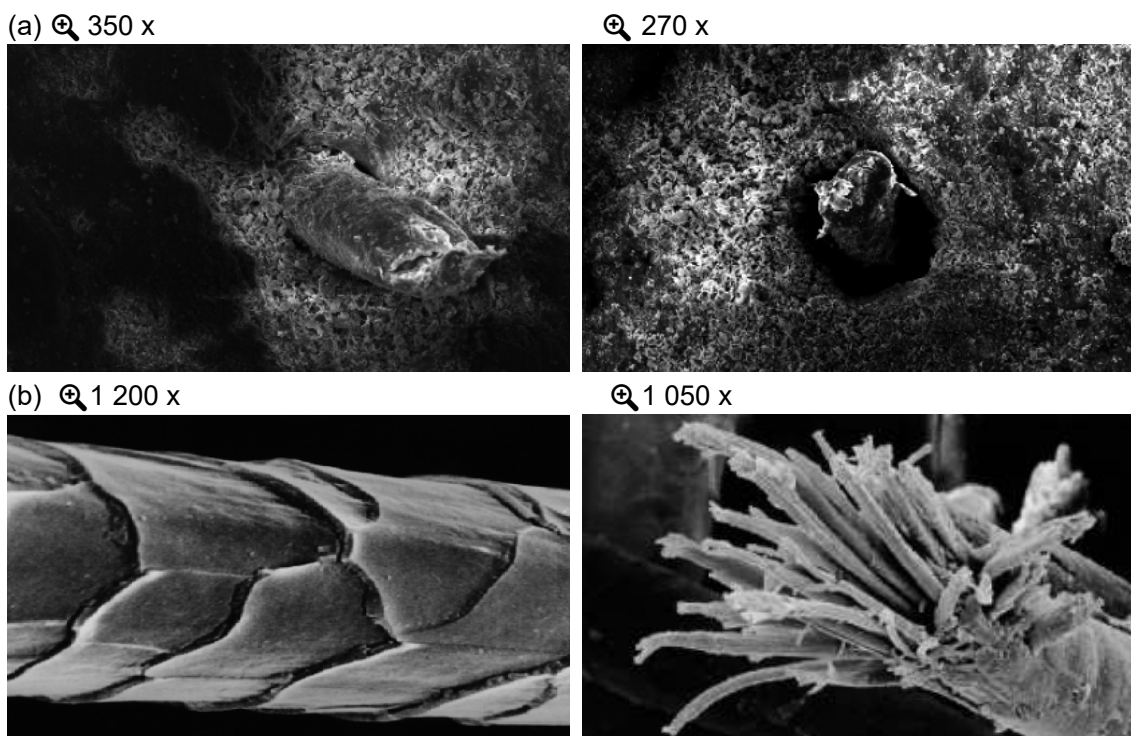
Termenul de compozit presupune sisteme de materiale și se poate aplica pentru orice combinație dintre două sau mai multe materiale diferite, având interfețe identificabile între ele. [105]

Deși conceptul de material compozit nu este deloc nou, acesta fiind folosit cu mult timp înainte de a fi pusă problema definirii lor, se utilizează pe scară din ce în ce mai largă fiind readus în actualitate odată cu apariția unor cerințe noi și exigențe crescute. După istoricul și evoluția acestora putem vorbi despre trei generații de materiale compozite. [66][104][90]

Apariția primei generații se datează încă din antichitate, când au fost folosite cărămizi realizate din argilă armate cu paie, păr de animal sau resturi lemnoase la realizarea caselor și adăposturilor (Figura 1.1). Diferiți polimeri naturali, precum albușul de ou, sângele de bou sau brânza de vaci au fost, de asemenea, adăugate în compoziție pentru a oferi materialelor de construcții rezistență sporită la acțiunea apei.

Cu toate acestea, dezvoltarea modernă a utilizării fibrelor și apariția generației a doua de materiale compozite se consideră în perioada anilor 1910-1960, când apare cererea pentru materiale rigide, puternice, dar, totodată, și ușoare. În 1910 apare bachelita armată cu fibre de lemn, azbest și fragmente de hârtii, iar cu câțiva ani în urmă apar betoanele, materialele plastice și metalice armate cu fibre și particule. Cerințele noi au dus la renașterea conceptului și aplicația acestora cunoaște și în prezent o dezvoltare intensă în mai multe domenii. [23] A treia generație reprezintă materialele noi și avansate.

Figura 1.1 – Compozit cu matrice argiloasă armat cu păr de animal (fibre proteice); (a) Imagine SEM cu matrice argiloasă și fibra de lână; (b) Imagine SEM cu fibra de lână și fibrilația acestuia. [42]



În termenul actual, compozitele fac parte din categoria materialelor noi și performante care sunt create special pentru a răspunde unor exigențe în ceea ce privește rezistența mecanică și rigiditatea, rezistența la coroziune, la acțiunea agenților chimici, la solicitări variabile, la șoc și uzură, și care au în același timp și greutate scăzută, stabilitate și estetică. [47]

Astfel, materialele compozite, în general, sunt considerate o clasă importantă de materiale utilizate în multe industrii, cum ar fi: industria automobilelor, industria și transportul aerian și spațial, industria chimică, aplicații marine și transportul naval, industria electrotehnică și electronică, construcții, domeniu medical etc. [118] Putem afirma deci, că sunt prezente practic în toate domeniile și ramurile industriei, ceea ce determină o varietate mare de forme și materiale, cu proprietăți și performanțe diferite.

În domeniul materialelor de construcții cimentul hidraulic și materialele pe bază de ciment, inclusiv betonul și mortarul, pot fi considerate principalele materiale folosite pe scară largă și implică cantități mari de materii prime. Aceste materiale oferă multe avantaje în diferite aplicații, datorită caracteristicilor mecanice, permeabilitate scăzută

și rezistență la atac chimic și în comparație cu alte materiale costul de fabricație ale acestora este redus. Deși comportamentul acestor materiale este caracterizat de rezistența bună la compresiune, există două proprietăți care necesită îmbunătățiri, și anume: rezistența redusă la întindere și/sau încovoiere și fragilitatea mare care poate provoca degradarea sau chiar prăbușirea prematură după formarea primei fisuri. Prin urmare, introducerea unui material de armare, pentru a spori rezistența la întindere, blocarea fisurilor și reducerea comportamentul ductil al materialului este esențial. Un beton obișnuit are o rezistență la tracțiune mai mică de 4-5 MPa, iar în cazul mortarului această valoare este și mai mică (~2-3 MPa). Pentru îmbunătățirea acestor neajunsuri, o varietate mare de fibre, inclusiv oțel, sticlă sau fibre din polimeri, au fost introduse în compoziția betoanelor și mortarelor cu mult sau mai puțin succes în ultimele decenii. În comparație cu materialul nearmat, prin ranforsarea cu fibre, rezistența la încovoiere sau întindere poate să crească cu un factor de 2-2.5 și rigiditatea de 5 până la 10 ori (în funcție de proprietățile fibrei și cantitatea adăugată).

În momentul de față, în domeniul materialelor de construcții, fibrele pot fi folosite direct în masa compozitelor (armarea dispersă) sau sub formă de materiale compozite (pânză și țesătură din fibre, lamele etc.) pentru armarea elementelor și consolidarea acestora.

1.2. Motivația cercetării

Având în vedere că materialele compozite joacă un rol precursor prin noutățile aduse în inovațiile tehnologice și reprezintă un domeniu prioritar, se poate afirma că teza de doctorat „Studiul comportării materialelor compozite prin metode complexe” se înscrie în sfera preocupărilor actuale, existente atât pe plan național, cât și pe plan internațional, aflându-se într-o zonă de investigație interdisciplinară.

Conștientizarea mondială a deficitului de resurse energetice și cantitatea limitată de resurse naturale neregenerabile utilizate în industria construcțiilor, solicită intensificarea eforturilor în ceea ce privește găsirea de noi materiale și/sau îmbunătățirea celor existente și a modalității de utilizare a acestora, respectiv găsirea unor metode de analize prin intermediul cărora se pot reduce cantitățile de materii prime implicate.

Tema tezei de doctorat a luat naștere deci, plecând de la problema de necesitate a unor materiale neconvenționale, respectiv de la dezvoltarea accentuată a producției și criza îngrijorătoare a surselor de materii prime în domeniul de construcții civile și nu numai. Scopul prezentei lucrări constituie studiul și optimizarea compoziției unui material de construcție bine cunoscut și folosit pe scară largă, respectiv elaborarea unui model semi-analitic și numeric pentru determinarea caracteristicilor și comportarea acestuia în vederea reducerii numărului elementelor de testare și economisirea materiilor prime.

Se poate afirma că în domeniul materialelor de construcții (și nu numai), tipurile de materii prime cunoscute, respectiv posibilitatea de modificare și/sau combinarea a constituenților de bază în vederea realizării unor materiale compozite este aproape infinită. S-a optat ca elaborarea studiului teoretic și experimental privind materialele compozite să fie axată pe mortare, datorită importanței pe care îl are de foarte mult timp în acest domeniu, a cantității în care este folosit în diverse aplicații și, nu în ultimul rând, datorită avantajului pe care microstructura acestuia o reprezintă în comparație cu betonul când este vorba de armarea cu fibre. Dimensiunea crescută a particulelor de agregat la betoane are un efect negativ în cazul armării cu fibre scurte, astfel eficacitatea în cazul mortarelor este mult mai ridicată și utilizarea acestora este mai indicată.

Așa cum a fost prezentată, ideea armării cu fibre nu este nouă, datează de mai multe decenii, însă cunoștințele nu sunt încă depline privind comportarea acestora. Noutatea reprezintă analiza și modelarea conceptului folosind metode moderne și fibre neconvenționale, introduse în ultimii ani. De obicei, materialele pe care le implică acest studiu în cantități mici sunt relativ ieftine, dar sunt folosite în cantități mari și îmbunătățirea compozitului poate afecta în mod semnificativ durata de viață, cantitatea de materii prime implicate și prin urmare costul lucrării.

Pentru importanța lucrării și a compozitului ales, este suficient să luăm în considerare istoricul și evoluția pe care mortarele le-au avut de-a lungul timpului, cunoscându-se construcțiile și lucrările care au fost realizate folosind acest tip de material. Evoluția sa a fost progresivă: inițial gama s-a diversificat în funcție de liant, iar ulterior în funcție de adaosurile care au intervenit în alcătuirea acestora, ajungând

treptat de la mortarele cu lianți nehidraulici (argilă, ipsos sau var), la mortarul cu ciment, respectiv la mortare modificate cu polimeri sau armate cu fibre noi și performante.

Importanța compozitului ales, respectiv a cercetării, este confirmată, de asemenea, și de gama de produse prezente pe piață în momentul actual, adică a mortarelor îmbunătățite cu fibre și adaosuri de polimeri. Este important de remarcat că, deși piața materialelor de construcții oferă o gamă relativ largă de produși, datele sunt limitate și rețetele sunt confidențiale, cunoscute doar de producători și în multe situații informațiile sunt limitate sau chiar insuficiente. În multe situații nici tipul sau natura fibrei utilizată în compoziție nu este declarată în fișa tehnică a produsului.

Datorită însușirilor pe care acest material compozit le are, respectiv datorită celor menționate, interesul pentru investigarea îmbunătățirii compoziției acestuia a fost amplificat și a devenit o preocupare de mare actualitate atât la nivel național, cât și internațional și reprezintă motivația principală a cercetării de față.

1.3. Obiectivele lucrării

Având la bază studiile și cercetările anterioare privind materialele compozite și metodele clasice (distructive), efectuate în timpul studiilor de masterat, teza de doctorat își propune aprofundarea domeniului materialelor compozite și analiza prin metode complexe a mortarelor armate cu fibre, combinând metodele clasice cu cele nedistructive.

Procedeele și metodele de investigație depășesc sfera normală a procedeelelor clasice pe care le cunoaștem și prin analize de calcul, care iau în considerare structura materialului încă din faza de formare. În urma investigațiilor există posibilitatea propunerii de dozaje optime, forme și geometrii, respectiv materii prime în vederea obținerii unor materiale noi, care răspund unor cerințe specifice în funcție de domeniul de aplicare.

Conceperea și realizarea unor materiale noi și durabile care satisfac cerințele economice și ecologice din ce în ce mai exigente este o preocupare importantă în toate domeniile de inginerie. Tot mai frecvent întâmpinăm situații în care materialele convenționale nu mai satisfac aceste cerințe, iar materialele noi necesită analize îndelungate, costisitoare care implică o cantitate semnificativă de materii prime. Din acest motiv rezultă necesitatea cercetării materialelor noi sau optimizarea unor

materiale tradiționale, care satisfac toate cerințele menționate, având proprietăți adecvate în funcție de domeniul de aplicare, și totodată permit dezvoltarea și testarea într-un mod economic și ecologic.

Mortarul este încă unul dintre cele mai utilizate materiale de construcții cu toate că are proprietăți și caracteristici care necesită îmbunătățiri, precum rezistența la întindere și fragilitatea. Pentru a îmbunătăți aceste două proprietăți și pentru a obține un înlocuitor al armăturilor și materialelor care necesită manoperă multă și timp de execuție îndelungat, se pot utiliza fibre scurte discontinue, dispersate aleatoriu în matricea de mortar. În ciuda proprietăților și efectelor pozitive, mortarul fibros nu a găsit o adevărată recunoaștere și aplicare, datorită lipsei unor experimente sau date exacte, ținând seama de toate fenomenelor complexe care pot apărea în cazul acestui material de construcție.

Astfel, lucrarea are două obiective principale. Primul îl constituie sinteza celor mai importante proprietăți mecanice și fizice ale materialelor compozitelor și mortarului armat cu fibră pe baza experimentelor și datelor descrise în literatura de specialitate în vederea optimizării materialului tradițional și urmărirea influenței fibrelor scurte la diverse solicitări mecanice (încovoiere, întindere, compresiune), respectiv evidențierea eficienței acestora și comparația soluțiilor studiate.

Al doilea obiectiv important este de a examina tendințele specifice, care pot fi urmărite în vederea analizei materialelor compozite, cu un accent deosebit pe materiale armate cu fibre scurte, în vederea reducerii numărului probelor supuse testelor de laborator. Astfel, teza de doctorat reprezintă o sinteză a modului în care proprietățile cele mai importante ale compozitelor noi pot fi estimate ținând cont de proprietățile constituenților individuali. S-a propus în simulările 3D ale specimenelor de mortar armat dispers analiza efectul volumului de fibră, distribuția, orientarea și lungimea fibrelor, respectiv determinarea caracteristicilor compozitelor cu diferite tipuri de fibre.

Lucrarea prezintă, de asemenea, o încercare rar folosită pe plan național în cazul materialelor cu matrice fragilă, mai exact încercarea la întindere uni-axială. Sunt analizate diferențele între valorile obținute experimental prin această încercare și valorile determinate folosind formule de calcul pe baza comportamentului materialului la solicitări de încovoiere.

Ca și concluzie, s-a stabilit ca lucrarea de față să aibă ca obiective principale analiza compozitelor folosind metode analitice și numerice, și comparația rezultatelor cu investigații propriu-zise și încercări mecanice, identificarea caracteristicilor mortarului fibrat, propunerea domeniilor de utilizare în funcție de rezultate, evidențiind aspecte legate de îmbunătățirea ductilității materialului.

1.1. Structura lucrării

Lucrarea se dezvoltă pe 7 capitole, într-o ordine graduală, plecând de la definirea materialelor compozite și a mortarului ca material compozit, la descrierea în detaliu a fiecărui component care intră în alcătuirea acestora și prezentarea detaliată a tipurilor de fibre care pot fi utilizate în masa mortarului cu rol de ranforsant, urmând în partea centrală prezentarea metodelor de investigare, programelor de calcul și a teoriilor care stau la baza acestora, prezentarea programului experimental, interpretarea rezultatelor, respectiv formularea concluziilor și a recomandărilor încheie lucrarea de față.

Capitol 1 – Introducere, prezintă în ansamblu lucrarea de față enumerând argumentele în ceea ce privește motivația și importanța lucrării, respectiv prezintă obiectivele și structura tezei de doctorat.

Capitolul 2 – Stadiul actual cu privire la materialele compozite descrie cunoștințele cu privire la acest tip de material în construcții, proprietățile și rolul fazelor constituente, respectiv tratează mortarele armate cu fibre și particularitățile acestor compozite. Sunt prezentate atât proprietățile matricei cimentoase, cât și a fibrelor cele mai importante în vederea armării mortarelor, domeniul de utilizare și avantajele sistemului compozit în domeniul de construcții civile. Tot în acest capitol, sunt prezentate produsele de mortare armate cu fibre predozate, existente momentan pe piața materialelor de construcții și exemple de lucrări realizate folosind aceste produse.

Capitolul 3 – Aspecte privind testarea virtuală a mortarelor analizează metodele moderne de investigare și posibilitatea utilizării programelor de calcul în vederea analizei materialelor compozite. De asemenea, prezintă teoriile fundamentale care stau la baza acestor analize și evoluția lor de-a lungul timpului. Este prezentat un program special conceput pentru analiza multi-scalară a materialelor compozite și studiază eficiența și aplicabilitatea acestuia în cazul mortarelor.

Capitolul 4 – Programul experimental, prezintă rețetele și determinările efectuate pe mortarele armate cu diferite tipuri de fibre. O încercare mai puțin obișnuită în cazul materialelor fragile, în special pe plan național, este descrisă și prezentată detaliat, folosind tipare și epruvete speciale de „dog-bone” în vederea determinării rezistenței uni-axială la întindere a compozitului. Modulul de elasticitate pentru fiecare probă în parte a fost determinat atât pe probe cilindrice, cât și pe baza curbelor caracteristice înregistrate la fiecare încercare și tip de solicitare în parte.

Capitolul 5 – Analiza virtuală ale compozitelor studiate parcurge etapele în vederea simulării comportamentului mortarelor armate cu fibre folosind metodele studiate și cunoștințele dobândite în Capitolul 3. Sunt descrise în acest capitol considerațiile care au stat la baza modelării microstructurii și obținerii pe cale analitică și numerică a proprietăților mortarelor cu fibre.

Capitolul 6 – Interpretarea rezultatelor, centralizează datele obținute pe cale experimentală și determinate folosind programele de calcul, prezintă analiza grafică și comparația acestora, respectiv analiza rețetelor și eficienței tipurilor de fibre utilizate în acest studiu.

Capitolul 7 – Concluzii, contribuții și direcții viitoare de cercetare: acest capitol cuprinde atât aspectele și concluziile generale, cât și contribuțiile personale și valorificarea rezultatelor, respectiv recomandările și direcțiile viitoare de cercetare.

2 CAPITOLUL 2

STADIUL ACTUAL CU PRIVIRE LA MATERIALELE COMPOZITE

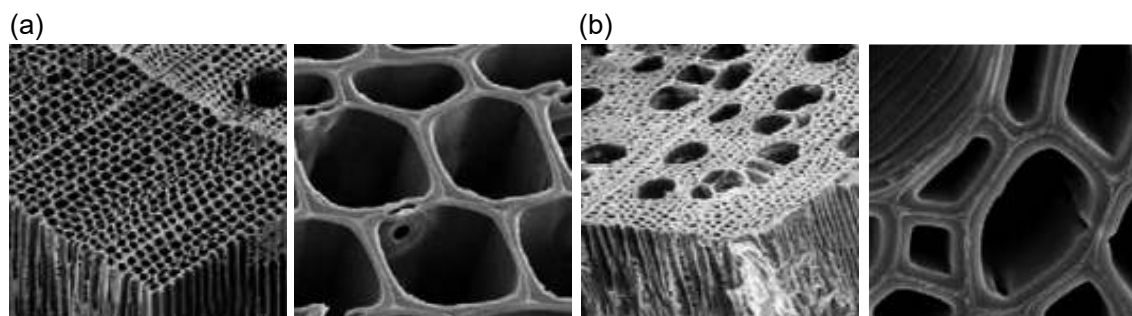
2.1. Definirea conceptului de material compozit

Pe un spectru larg, mai mult sau mai puțin, orice material poate fi considerat ca și material compozit. Privind pe o scară macro, micro sau nano, toate materialele sunt alcătuite din diferite compuși/constituenți, fie vorba de defecte structurale, pori, impurități sau alte materiale/elemente de aliere.

Această afirmație este valabilă chiar și în cazul materialelor naturale, care adesea sunt alcătuite din doi constituenți: dintr-o componentă cu o rezistență mai mare comparativ cu cealaltă și o rigiditate mai accentuată (numită armătură), încorporată într-un material mai moale care constituie matricea compozitului.

Un exemplu bun de astfel de compozit natural este lemnul, alcătuit din lanțuri fibroase, numit celuloză, care sunt înglobate într-o matrice care poartă numele de lignină. Fibra de celuloză oferă rezistența și lignina este "adezivul" care leagă și stabilizează fibrele (Figura 2.1). Osul (material compozit nano-structurat) sau dinții sunt, de asemenea, compuși din cristale anorganice tari într-o matrice organică dură, numită collagen.[78], [132]

Figura 2.1 – Morfologia lemnului (analiza SEM) (a) lemn de esență moale și secțiunea transversală aferentă; (b) lemn de esență tare și secțiunea aferentă. [78]



Deși natura ne oferă multe exemple de structuri compozite performante care au inspirat omenirea de-a lungul timpului în diferite aplicații ingineresti (de exemplu bambusul, structură tubulară rezistentă și ușoară), când vorbim în sensul strict al

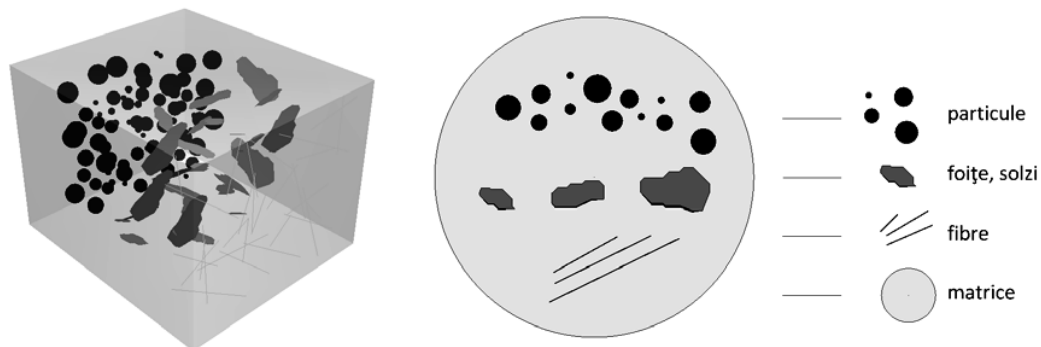
cuvântului, aceste materiale naturale sunt excluse din categoria materialelor compozite. Definierea precisă a conceptului este deci primordială.

Astfel, nu numai materialele compozite, dar și definierea lor a evoluat pe parcursul timpului. Conform primelor definiții întâlnite în literatura de specialitate, materialele compozite sunt sisteme formate din cel puțin două materiale distincte, iar materialul astfel rezultat are proprietăți pe care componentii luați separat (când lucrează singuri) nu le posedă.

Având în vedere că în această categorie de materiale, conform definiției menționată anterior, intră o clasă foarte largă de materiale (materiale naturale și/sau tradiționale), compuși care în mod obișnuit nu sunt considerați materiale compozite, definiția lor ulterior a fost regândită și reformulată.

În momentul de față, prin definiția lor, materialele compozite sunt considerate sisteme create prin asamblarea artificială a două sau mai multe componente compatibile, mai precis a unui component de armare și a unei mase de bază, numit matrice (Figura 2.2), a cărei rezistență mecanică este mai mică decât a armăturii, astfel încât să se obțină caracteristici și proprietăți dorite.[90]

Figura 2.2 – Fazele constituente ale materialelor compozite: matricea și ranforsantul (particule, fibre etc.)



Prin definiție deci, materialele compozite sunt:

- sisteme complexe multifazice;
- obținute pe cale artificială (astfel sunt excluse materialele naturale ca de exemplu lemnul);
- creat cu intenția și scopul obținerii unor proprietăți dorite (astfel sunt excluse materiale precum betonul simplu sau mortarul tradițional);

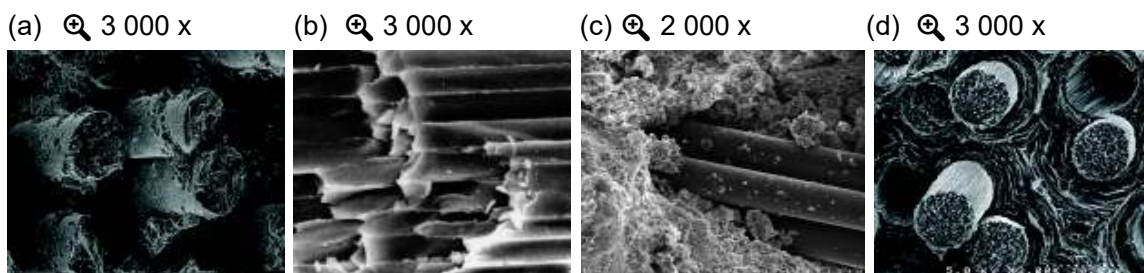
- alcătuite din mai multe materiale de natură diferită (cel puțin două materiale chimic distincte) cu interfață de separare clară între componente;
- materiale cu o componentă de bază, numită matrice, în care sunt înglobate materialele de armare (ranforsant) sub formă de fibre sau particule;
- materiale performante, care posedă proprietăți superioare față de cele ale componentelor de bază.

2.2. Tipurile și clasificarea materialelor compozite

În momentul de față sunt mai multe tipuri de compozite, de natură diferită. Astfel, pot fi clasificate, luând în considerare mai multe criterii în funcție de tipul și natura matricei sau a ranforsantului. Având în vedere că matricea reprezintă componentul de bază, care în mod obișnuit este prezent în cantitatea cea mai mare în compoziție, principala clasificare a compozitelor este în funcție de tipul matricei. Astfel, se disting trei clase principale în funcție de natura acestuia: compozite cu matrice **polimerică (CMP)**, cu matrice **metalică (CMM)** și compozite cu matrice **minerală (ceramică, CMC)**.

Pe lângă cele trei tipuri menționate, în literatura de specialitate adesea se distinge o altă categorie, și anume compozite cu **matrice carbonice** (carbon sau grafit) armate cu fibre de carbon (fibre scurte, uni-direcționale, țesături bi- sau tridimensionale etc.), numit compozit „**carbon-carbon**”. În mod general, compozitele carbon-carbon intră în subcategoria CMC. Sunt foarte scumpe și au fost inițial dezvoltate pentru a fi utilizate în aplicații aerospațiale și de apărare.[5] Morfologia celor patru tipuri de compozite armate cu fibre și nano-fibre de carbon sunt prezentate în Figura 2.3.

Figura 2.3 – Analiza compozitelor armate cu fibre de carbon folosind microscopia electronică de baleiaj (SEM), având matrice; (a) polimerică [56]; (b) metalică [119]; (c) ceramică (pastă de ciment) [75]; (d) carbonică (compozit carbon-carbon)[17]. Imagini SEM după încercări mecanice - cedarea compozitelor.



Tipurile de materiale compozite se disting nu numai în funcție de matrice, dar și **în funcție de armătura folosită**. Apar diferite criterii de clasificare în funcție de natura, geometria sau dispersia acestora. Astfel, după configurația geometrică a armăturii, compozitele pot fi **armate cu fibre** sau **armate cu particule**. De asemenea, compozitele armate cu fibre se clasifică în subcategorii și diferă în funcție de tipul, lungimea și orientarea fibrelor. Atunci când sunt prezente mai multe tipuri de armături în alcătuirea compozitelor iau naștere compozite hibride. Categoriile principale și subcategoriile acestora sunt prezentate în Tabelul 2.1 și ilustrate în Figura 2.4.

Tabelul 2.1 – Tipurile și clasificarea materialelor compozite în funcție de ranforsant.

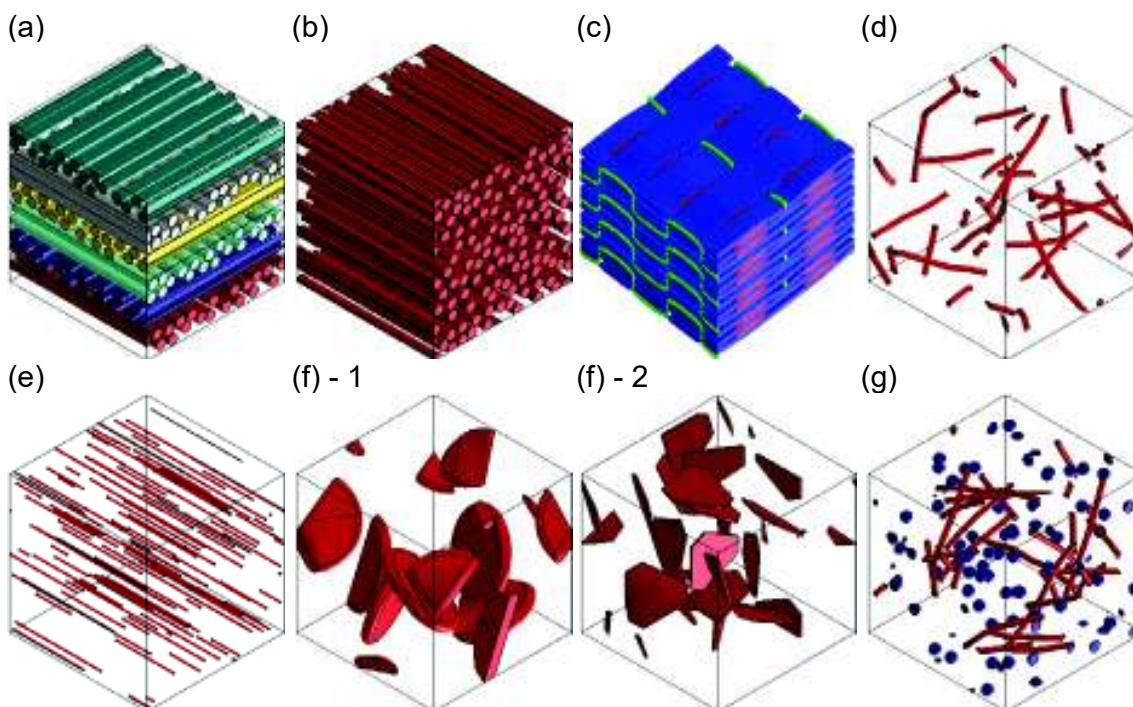
Compozite cu fibre		
stratificate (lamelare) (a)		
nestratificate	fibre continue	uni-direcționale (b)
		mult-direcționale – țesături (c)
	fibre discontinue	cu orientare aleatoriu (d)
		cu orientare aliniată (e)
Compozite cu particule		
	micro-particule (<i>dimensiuni cuprinse între 10-100 nm</i>)	(f)-1
	macro-particule (<i>d > 1 μm până la ordinul de milimetri</i>)	(f)-2
Compozite hibride	<i>combinația tipurilor de armături</i> (g)	

Trebuie menționat că în funcție de mărimea ranforsantului, putem vorbi despre **micro-compozite** (armătura dispersată în matrice se prezintă pe scară microscopică) și **macro-compozite** (compozite lamelare și cele armate cu fibre de dimensiuni macroscopice). În funcție de natura acestora, pot fi, de asemenea, **compozite armate cu metal**, cu **carbon**, cu **polimer** sau fibre **ceramice**.

După modul de distribuție a materialului ranforsant și izotropia structurală, compozitele pot fi **izotrope**, **cvasi-izotrope** sau **anizotrope** (armături orientate unidirecțional sau stratificate repartizate liniar) și stratificate (ranforsant bi- sau multi-dimensional). Orientarea și distribuția armăturii afectează deci în mod semnificativ izotropia sistemului. În general, se poate considera că sistemul are un comportament izotrop dacă armătura dispersată este uniform distribuită și are dimensiuni egale (de exemplu în cazul armării cu particule). Dacă sunt folosite fibre sau particule care nu respectă această condiție și sunt orientate aleatoriu în masa matricei, putem considera

că materialul compozit are un comportament **cvasi-izotrop**. Determinarea proprietăților anizotrope (dependente de direcție) este foarte importantă în cazul compozitelor armate uni-direcțional, și prezintă avantajul folosirii raționale a materialelor (proiectarea și utilizarea compozitului în funcție de solicitare prin controlul anizotropiei).

Figura 2.4 – Tipurile de materiale compozite în funcție de armătură.



În ceea ce privește conceperea unui material compozit, este foarte important să se ia în considerare proprietățile fiecărui constituent individual în parte, în funcție de domeniul de aplicare. Proprietățile cele mai importante în acest sens sunt rigiditatea (modulul de elasticitate sau modulul lui Young), rezistențele mecanice (în funcție de solicitare și domeniul de aplicare) și duritatea. Densitatea este de asemenea importantă în multe situații, deoarece masa componentelor și astfel greutatea compozitului poate fi critică atunci când aplicația nu permite greutatea sau încărcări mari, suplimentare. Proprietățile termice, cum ar fi dilatarea termică și conductivitatea, trebuie, de asemenea, luate în considerare, deoarece materialele compozite sunt supuse schimbărilor de temperatură (în timpul fabricării și/sau în exploatare), iar o nepotrivire între dilatarea termică a componentelor conduce la tensiuni reziduale interne. Acest fenomen poate avea un efect puternic negativ asupra comportamentului mecanic a materialului rezultat.

Proprietățile principale ale materialelor utilizate cel mai frecvent ca matrice și armătură în vederea realizării unor materiale compozite, respectiv proprietățile lemnului („compozit” natural) sunt prezentate în Tabelul 2.2.

Tabelul 2.2 – Principalele proprietăți ale materialelor utilizate pentru compozite [58].

Denumire material	Densitate ρ [10^3 kg/m ³]	Modulul lui Young E [MPa]	Rezistența la rupere [MPa]
Rășini termoreactive (epoxy)	1.25	3 500	50
Polimeri sintetici (nylon)	1.1	2 500	80
Cauciuc (poliuretan)	1.2	10	20
Metal (oțel moale)	7.8	208 000	400
Minerale (beton)	2.4	40 000	20
Ceramice oxidice (alumina)	3.9	380 000	500
Lemn (molid)	0.6	16 000 fibre 1 000 ⊥ fibre	80 2

Nu numai din exemple și lucrări realizate, dar și din datele prezentate în tabel reiese că sunt unele combinații din care rezultă proprietăți atractive pentru lucrări ingineresti, de exemplu rigiditate ridicată/rezistență mare combinată cu o greutate specifică redusă. Această combinație este probabil cel mai mare avantaj al materialelor compozite în momentul de față dacă privim în ansamblu aceste materiale. O sinteză a modului în care aceste proprietăți pot fi estimate ținând cont de proprietățile constituenților individuali constituie o parte importantă a lucrării de față.

2.3. Aspecte cu privire la fazele constituente ale materialelor compozite

Armarea unui material (matrice) are ca scop îmbunătățirea proprietăților fizico-mecanice a materialului inițial. Influența armăturii asupra materialului de bază (matrice) depinde de tipul și proprietățile materialului de armare, de modul de dispunere, de proporția în care este prezent în compozit, precum și de aderența între armătură-matrice. Alegerea armăturii adecvată și corespunzătoare scopului urmărit, presupune cunoașterea condițiilor pe care acesta trebuie să le îndeplinească:

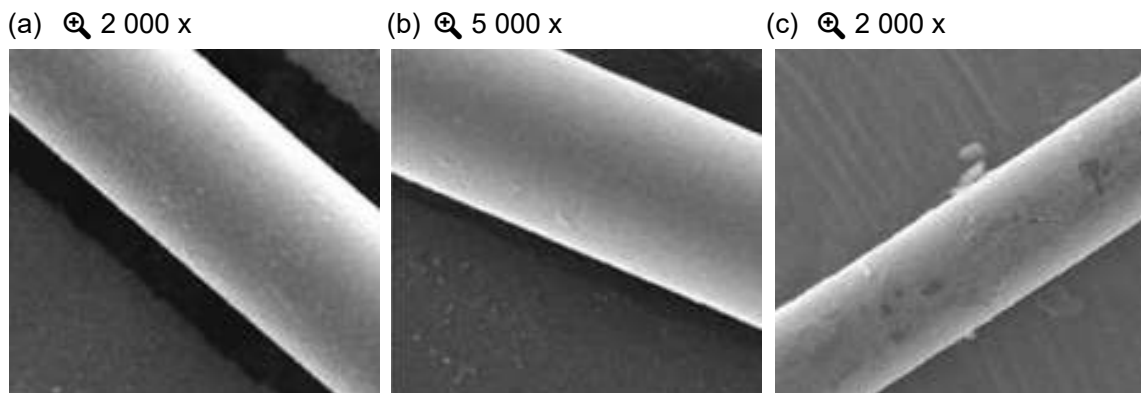
- rezistențe la întindere, la încovoiere și la șoc mai mari decât al matricei;
- modul de elasticitate mai ridicat comparativ cu matricea;
- rezistență și compatibilitate chimică cu matrice;
- suprafață care permită o aderență bună cu matrice.

În mod obișnuit, materialele compozite prezintă o anizotropie accentuată – materialul nu are aceleași proprietăți fizice în toate direcțiile (prezintă direcții privilegiate). Acest lucru se datorează, de obicei, constituentului de armare, mai exact a formei și a structurii fibroase al acestuia, respectiv axelor de fibre aliniate în direcții particulare, care influențează semnificativ comportamentul și rezistența materialului compozit. De asemenea, materialele componente pot prezenta anizotropie inerentă ca urmare a structurii lor cristaline.

Proprietățile fizico-chimice și mecanice a materialelor compozitelor sunt determinate, deci, de proprietățile și caracteristicile elementelor componente (distribuția, forma etc.), procentul de armare și interacțiunea dintre ele. Aceste aspecte, respectiv proprietățile și tipurile de materiale compozite sunt tratate detaliat în cele ce urmează.

O gamă foarte largă de ranforsanți (armături) sunt disponibile în comerț, din care partea cea mai semnificativă se prezintă sub formă de fibre. Proprietățile lor sunt legate direct de aranjamentul atomic și de defectele structurale, care pot apărea și în procesele de fabricație. Cele mai utilizate elemente de armare sunt: fibrele de sticlă, fibrele de carbon, fibrele de azbest, fibrele de silice, fibrele de cuarț, fibrele de bor, fibrele de grafit (Figura 2.5).

Figura 2.5. – Imagine SEM cu fibre sintetice: (a) sticlă; (b) carbon; (c) aramid. [100]



2.3.1. Matrice

Matricea compozitului reprezintă componenta de bază a materialului, care înglobează armăturile și menține poziția acestora. Pot fi polimerice, metalice sau ceramice (minerale). Alegerea tipului acestuia depinde de proprietățile dorite în funcție

de aplicație și metodele de fabricație. Indiferent de tipul acestuia, proprietățile depind de microstructura care, la rândul ei, este influențată de fabricație și de eventualele tratamente termice și mecanice la care materialul este supus. În cazul unui compozit, matricea are rolul de a îndeplini următoarele funcțiuni [126]:

- stabilește forma materialul compozit;
- învelește și protejează armăturile în fabricația – manipularea – exploatarea compozitului;
- leagă și menține poziția armăturii, respectiv împiedică flambajul fibrelor (fără material de bază fibrele nu preiau eforturi de compresiune);
- transferă tensiunile la ranforsant (transferul se realizează datorită adeziunii și frecării între cele două faze constituente);
- concentrările de tensiuni, respectiv deformații sunt redistribuite prin intermediul matricei.

Pe lângă cele menționate anterior, este foarte important ca matricea să fie compatibilă atât chimic, cât și termic cu fibrele (incompatibilitatea termică conduce la tensiuni reziduale interne). Incompatibilitatea fazelor constituente are un efect puternic negativ asupra comportamentului mecanic a materialului rezultat. În Tabelul 2.3 sunt prezentate câteva exemple pentru cele trei tipuri de matrice, respectiv proprietățile principale ale acestora. [58]

Tabelul 2.3 – Exemple de matrice în funcție de tipul acestora și proprietățile lor principale.

Matrice	Modulul lui Young [MPa]	Poisson [-]	Rezistența la întindere [MPa]	Deformație la rupere [%]
Polimeri termorigide				
<i>rășină epoxidică</i>	3 000 – 6 000	0.39	35 – 100	1 – 6
<i>poliester</i>	2 000 – 4 500	0.38	40 – 90	2
Polimeri termoplaste				
<i>nailon</i>	1 400 – 2 800	0.3	60 – 70	40 – 80
<i>polipropilenă</i>	1 000 – 1 400	0.3	20 – 40	300
Metal				
<i>Al - aluminiu</i>	70 000	0.33	200 – 600	6 – 20
<i>Ti – titan</i>	110 000	0.36	300 – 1 000	4 – 12
Ceramice				
<i>carbura de siliciu</i>	400 000	0.20	400	0.1
<i>sticlă borosilică</i>	64 000	0.21	500	0.2

Pe baza acestor informații, împreună cu proprietățile principale ale armăturilor, se poate evalua potențialul sistemelor compozite noi concepute. De exemplu, fibrele de sticlă nu sunt utile pentru armarea metalelor dacă creșterea rigidității este un obiectiv principal. Compatibilitatea termică a materialelor prin diferența coeficienților de dilatație termică poate fi, de asemenea, analizată în faza de concepere a materialelor (datorită diferenței mare între valorile acestor coeficienți iau naștere tensiuni termice și de contracție).

2.3.1.1. Matricea polimerică

Majoritatea compozitelor utilizate în industrie se bazează pe matrice polimerice, iar producția mondială ale acestor tipuri de materiale se dublează la fiecare 5 ani. Acestea sunt, de obicei, armate cu fibre de sticlă sau carbon cu orientare aliniată. Spre deosebire de un compozit cu matrice ceramică, unde armătura este folosită, în primul rând, pentru a îmbunătăți rezistența la rupere, ranforsantul într-un CMP asigură rezistența și rigiditatea ridicată.

Polimerii sunt compuși macromoleculari naturali sau sintetici și se utilizează o gamă variată de polimeri în cazul CMP. Se caracterizează prin faptul că pot fi prelucrați ușor (cu sau fără presiune) în diferite forme la o temperatură specifică. La fel ca și în cazul sticlelor, polimerii se comportă ca și un solid cristalin (din punct de vedere mecanic) sub temperatura de tranziție și se transformă într-un lichid vâscos peste temperatura de curgere. Astfel, după comportarea la încălzire pot fi compozite polimerice cu **matrice termorigide** (aproximativ trei sferturi de pe piață) și compozite polimerice cu **matrice termoplaste**. Pe lângă aceste două tipuri, în cazul polimerilor mai apare o grupă numită **elastomeri**, dar această nu se folosește în construcții.

Matricea polimerică **termorigidă** (termoreactivă) cel mai frecvent utilizată este din polistireni nesaturați și rășinile poliesterice, epoxidice, fenolice, vinilesterice, bismalmeidice și poliimidice [106]. Acestea acoperă o clasă foarte largă de substanțe chimice cu proprietăți fizice și mecanice foarte diferite. Se deosebesc de cele termoplaste prin faptul că la o reîncălzire ulterioară nu se mai prezintă sub starea vâscoasă.

Matricea polimerică **termoplastă** în vederea prelucrării poate fi încălzită la temperatura de curgere de câte ori este nevoie, dar cu condiția că această temperatură

trebuie să rămână sub temperatura la care materialul prezintă degradare. Prin răcirea la temperatura ambiantă, termoplastele revin la forma solidă și rețin această stare sub temperatura de tranziție. Principalele tipuri de termoplaste utilizate ca și matrice sunt: poliamidele, policarbonatul, polieterchetona și polietersulfona [106]. Pe lângă cele menționate, termoplastele utilizate și în construcții sunt polietilena, policlorura de vinil, polistirenul, polipropilena etc. [68]

Termoplastele avansate, precum materialele PEEK (materiale pe bază pe polimerul poli-eter-eter-cetonă), prezintă proprietăți mecanice ridicate cu o rezistență și stabilitate bună la temperaturi ridicate și o excelentă rezistență chimică. Datorită acestor proprietăți și combinației acestora, PEEK sunt cele mai populare materiale plastice avansate. Rigiditatea și rezistența acestui polimer este puțin afectată până la temperatura de 150 °C, la care majoritatea polimerilor prezintă deja degradări. Multe materiale termoplaste prezintă, de asemenea, o bună rezistență la absorbția apei, dar acest lucru nu este valabil, de exemplu pentru nailon.

Printre avantajele termoplastelor se numără fabricarea ușoară și faptul că există posibilitatea reutilizării deșeurilor rezultate din acestea. Inclusiv și în domeniul inginerie civilă, numeroase lucrări pot fi identificate având ca și scop reutilizarea deșeurilor industriale, în special al polimerilor termoplaste în compoziția materialelor de construcții tradiționale. [1]

Comparația celor două categorii de polimeri sunt prezentate în Tabelul 2.4, ținând cont de principalele proprietăți ale acestora.

Tabelul 2.4 – Caracteristicile generale ale polimerilor termoplaste și termorigide.

Proprietate	Polimeri termoplaste	Polimeri termorigide
Structură	amorfă – parțial cristalină	amorfă
Densitate [kg/m ³]	900 – 1 200	1 100 – 1 500
Modul de elasticitate [MPa]	1 000 – 4 800	1 300 – 6 000
Rezistența la întindere [MPa]	40 – 190	20 – 180
Temperatura maximă de utilizare [°C]	~ 230	~ 450
Rezistența chimică	foarte bună	excelentă

Din Tabelul 2.3 și Tabelul 2.4 reiese că polimerii termorigide au proprietăți puțin diferite față de cele termoplaste. Cea mai mare diferență este că termorigidele sunt materiale mai fragile, în timp ce termoplastele pot suferi deformații plastice mult mai

mari (Tabelul 2.3), dar proprietățile lor mecanice sunt puternic dependente de temperatură și de viteza de încărcare aplicată. Astfel, o redistribuire bună a eforturilor între matrice-armătură este posibilă în cazul compozitelor cu matrice termoplaste supuse la solicitări continue. Cu toate acestea, diferențe semnificative pot fi observate inclusiv și în aceeași categorie de polimeri, fie vorba de termorigizi sau termoplaste.

2.3.1.2. Matricea metalică

Dezvoltarea compozitelor cu matrice metalică (CMM) a fost concentrată pe trei metale cu densitate scăzută: aluminiu, magneziu și titan. Aceste matrice sunt, de obicei, ranforsate cu particule sau fibre, precum bor, de carbon (grafit) sau fibre ceramice (de obicei de alumină sau carbură de siliciu). Unele proprietăți ale matricelor metalice au fost prezentate în Tabelul 2.3. [58]

Deși în cazul CMM diferite aplicații industriale, respectiv procedee de producție au fost dezvoltate și pot fi armate cu fibre continue/discontinue, fibre scurte (whiskers) sau particule dispersate, utilizarea lor este încă limitată în comparație cu cea a compozitelor polimerice (CMP). [96]

În comparație cu metale, compozitele cu matricea metalică armate cu fibre sau particule, au rezistențe mai mari, respectiv o temperatură de utilizare mai ridicată. Pe lângă aceste proprietăți, conceptul permite posibilitatea de a selecta și controla aceste proprietăți pentru o anumită aplicație. Dezavantajul acestor compozite față de metale este costul ridicat de fabricație, precum și ductilitatea redusă.

Datorită prețului ridicat, CMM au fost răspândite în principiu în aplicații militare și aerospațiale. Componentele din materiale CMM au fost dezvoltate pentru a fi folosite în aeronave, sateliți, motoare, rachete și navetele spațiale NASA. Cea mai importantă aplicație comercială până în prezent a CMM este pistonul unui motor diesel fabricat de Toyota. [130]

2.3.1.3. Matricea ceramică

Această clasă de matrice include toate materialele solide care nu sunt nici metale și nici organice. Se împart în patru categorii mari: matricele **ceramice de sticlă** – exemplu silica de bor sau aluminiu; matricele **ceramice convenționale** – exemplu

carbura de siliciu (SiC), oxid de aluminiu (Al_2O_3) și zirconia (ZrO_2); matrice pe bază de **ciment (mortar sau beton)**; respectiv **carbon-carbon**, care formează o subclasă specială. În comparație cu celelalte, au rezistență mai bună la temperaturi ridicate și stabilitate chimică. [58]

Betonul și celelalte materiale obținute pe bază de ciment (inclusiv pasta de ciment), datorită rezistențelor mecanice scăzute la întinderea sau încovoierea (în comparație cu o matricea ceramică densă), nu sunt considerate în mod normal materiale avansate. Cu toate acestea, în ultimii ani, metode noi de prelucrare au dus la îmbunătățiri semnificative ale rezistențelor, iar dezvoltarea ulterioară va oferi îmbunătățiri suplimentare prin armarea cu fibre continue sau discontinue, având rezistență ridicată. Astfel, se poate afirma că cea mai importantă îmbunătățire a compozitelor ceramice este adusă de dezvoltarea sau utilizarea de noi fibre de armare.

Conceperea CMC necesită și presupune înțelegerea mecanismului micro-mecanic care determină deformarea sau cedarea materialului și a relațiilor cantitative explicite între proprietățile mecanice și caracteristicile micro-structurale. [130]

2.3.2. Ranforsant

Armătura sau ranforsantul este faza discontinuă, insolubilă în masa matricei care se prezintă sub diferite tipuri și forme (lamele, particule, solzi sau fibre) și contribuie la creșterea rigidității, respectiv rezistenței (în principal după direcția fibrelor - Figura 2.6). Are o influență semnificativă asupra proprietăților compozitului, determinată în mare măsură de fracția volumică, tipul, forma și dispunerea armăturii în compozit (față de direcția efortului aplicat). Așezarea armăturii în direcții diferite conduce la dirijarea caracteristicilor compozitului.

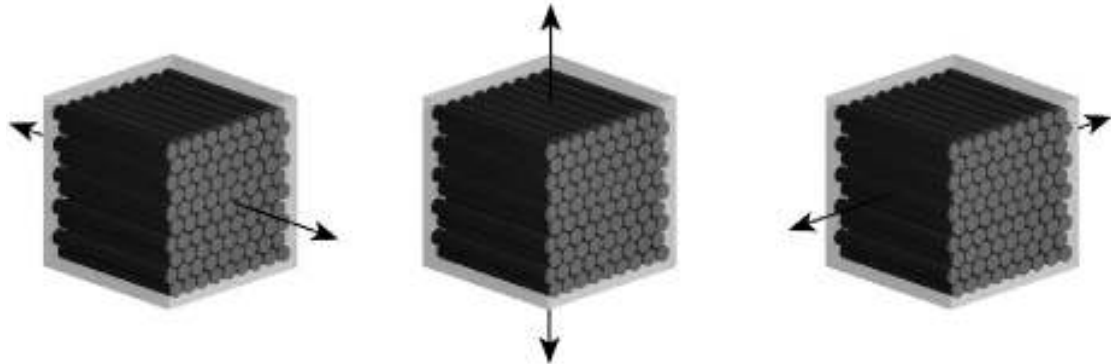
Așa cum a fost prezentată în § 2.2, armăturile se împart în două categorii mari: **fibre** (continue și discontinue) și **particule**. Compozitele cu fibre continue unidirecționale sunt materialele de înaltă performanță care se datorează utilizării raționale a elementelor de ranforsare ținând cont de direcția solicitării. Cele pe bază de fibre discontinue au, în general, proprietăți inferioare celor cu fibre continue și sunt, în general, utilizate pentru componente care sunt supuse unor sarcini ușoare în schimb ce fibrele continue sunt utilizate pentru elemente structurale.

Figura 2.6 – Influența direcției solicitării uni-axiale asupra proprietăților materialelor compozite armate cu fibre orientate uni-direcțional; (a) solicitare aplicată după direcția fibrelor; (b)(c) solicitare după direcția transversală.

(a) proprietăți superioare;

(b) proprietăți slabe;

(c) proprietăți slabe;



Direcția fibrelor: proprietăți superioare

Direcția transversală: proprietăți slabe

Indiferent de forma sau lungimea acestora, rolul fibrelor este asigurarea rezistenței la întindere, încovoiere, torsiune sau în cazul anumitor fibre îmbunătățirea proprietăților termice și electrice. Indiferent de tipul sau forma acestora, armăturile trebuie să îndeplinească următoarele condiții și funcțiuni în alcătuirea compozitului:

- să aibă o rezistență la întindere și încovoiere, respectiv un modul de elasticitate mai mare decât a materialului pe care îl armează;
- să fie compatibile din punct de vedere termic și chimic cu matricea, respectiv suprafața să aibă o aderență cât mai bună la matrice cu care vine în contact;
- să prezinte variații mici în ceea ce privește proprietățile individuale;
- să prezinte o stabilitate cât mai bună în timpul manipulării și punerii în operă;
- să nu fie toxice.

O gamă largă de armături, mai ales sub formă de fibre sunt deja disponibile în comerț, unele create și proiectate special pentru un anumit sistem de compozit, respectiv matrice. Proprietățile lor pot fi legate direct de aranjamentul atomic și de prezența unor defecte în structura lor, care în anumite cazuri pot fi controlate în procesul de fabricație.

Fibrele se clasifică în două categorii mari în funcție de raportul lungime / diametru: **fibre continue** > 1 000 (unidirecționale, țesături etc.) și **fibre discontinue** (fibre lungi cu raportul cuprins între 1 000 și 300; fibre scurte sau whiskers

având raportul ~ 100 și fibre foarte scurte). Lungimea ranforsantului este un factor critic în cazul compozitelor armate dispers și este detaliat în § 2.4.2.3.

După natură, fibrele utilizate ca ranforsant în materiale compozite se clasifică în două categorii mari: fibre **naturale** și **artificiale**, care la rândul lor pot fi minerale, organice, metalice, ceramice sau combinații, prezentate în Tabelul 2.5 conform [90].

Tabelul 2.5 – Tipurile de fibre utilizate ca ranforsant.

Tipuri de fibre	Exemple
Naturale	
Organice:	- <i>soia, in, sisal, iută, fibre de nuci de cocos, bumbac, păr de animale, celuloză, vegetale;</i>
Minerale:	- <i>azbest;</i>
Artificiale	
Organice:	- <i>nitroceluloză sau vâscoză (1888);</i> - <i>acetat de celuloză (1920);</i> - <i>nailon (1934); poliesteri sau acrilice (1941);</i> - <i>polipropilenă modificată (1960); polietilenă;</i>
Minerale:	- <i>pe bază de subproduse industriale (zgură de furnal);</i> - <i>pe bază de roci naturale (bazalt, loess);</i> - <i>ceramică (silico-aluminoase);</i> - <i>carbon (grafit);</i> - <i>oțel;</i> - <i>sticlă specială (fibre de sticlă zirconică).</i>

Câteva exemple de fibre și proprietățile cele mai importante ale acestora sunt prezentate în Tabelul 2.6.


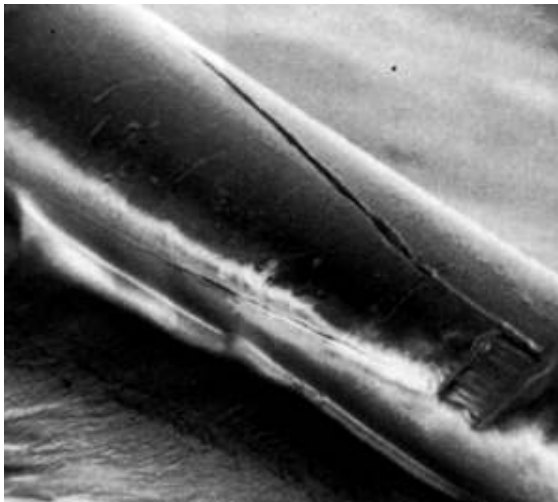
Tabelul 2.6 – Exemple de armături și proprietățile principale ale acestora [144].

Tipul de fibră	Densitate ρ [10^3 kg/m^3]	Modulul lui Young E [GPa]	Rezistența la întindere [GPa]	Poisson ν [-]	Cond. termică K [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
SiC mono-filament	3.0	400	2.4	0.20	10
SiC (whisker)	3.2	450	5.5	0.17	100
Bor	2.6	400	4.0	0.20	38
Carbon HM	1.9	380 (axial) 12 (radial)	2.4	0.20	105
Carbon HS	1.7	230 (axial) 20 (radial)	3.4	0.20	24

E-sticlă	2.5	76	2.0	0.22	13
Kevlar® 49	1.4	130 (axial) 10 (radial)	3.0	0.35	0.04
Celuloză (in)	1.0	80	2.0	0.30	-

Aceste armături se caracterizează prin rigiditate ridicată și densitate relativ scăzută. Fibrele, precum sticla și carbonul, sunt mai fragile și au o rezistență la încovoiere mai mică față de fibra de nailon care este mult mai flexibilă. Cele de carbon, sticlă și aramid au fost utilizate în multe domenii și continuă să aibă succes în ceea ce privește utilizarea în multe tipuri de compozite (cel mai des în matrice polimerică). Fibrele ceramice, tip whiskers sau particule sunt folosite, în primul rând, pentru armarea matricelor metalice și ceramice. Modul de rupere și comportarea fibrelor la solicitări de întindere și comparația acestora sunt ilustrate în Figura 2.7, Figura 2.8 și Figura 2.9. Examinările privind ruperea și degradarea fibrelor în urma încercării la întindere au fost realizate folosind microscopia electronică cu scanare (SEM) [103]. Exemplele includ fibre de nailon, fibre poliesterice, fibre de sticlă sau fibre naturale organice precum bumbacul, lâna etc.

Figura 2.7 – Imagine SEM cu fibre de nailon (a)(b) și fibre de poliester (c)(d) – Încercarea la întindere; (a) Fisură inițială transversală; (b) Fisura de forfecare de-a lungul fibrei de nailon, rupere și cedare prin oboseală; (c) Ruperea fibrei de poliester după 83 000 de cicluri la o sarcină de 65% din efortul de rupere normal; (d) Ruperea finală – oboseala fibrei la încercarea uni-axială de întindere.

(a)  3 000 x(b)  400 x

(c) $\times 150$



(d) $\times 1\,500$

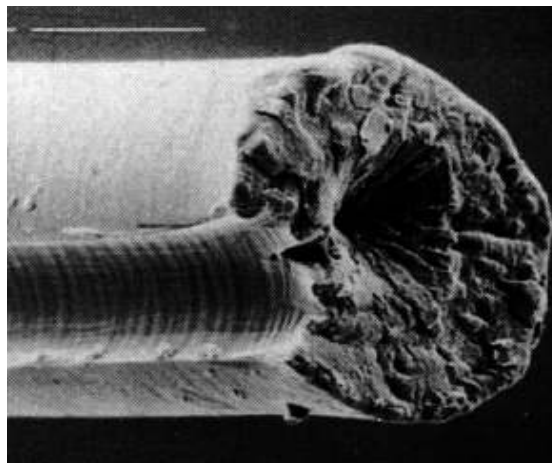
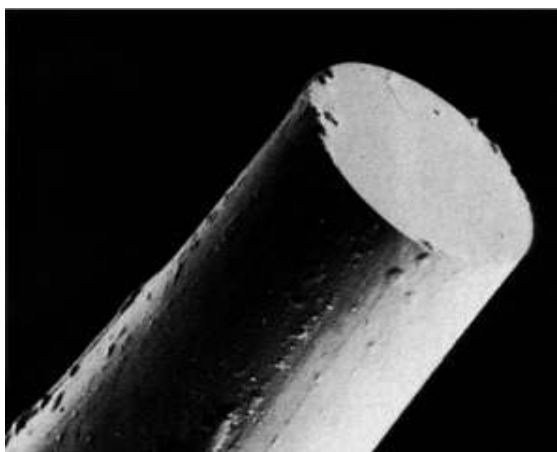


Figura 2.8 – Modul de ruperea la întindere a fibrelor fragile; (a) fibră de sticlă – rupere având un singur plan de clivaj (despicare paralelă cu rețeaua structurii cristaline); (b) fibra de sticlă – mai multe zone și planuri de rupere; (c) fibră ceramică – carbură de siliciu cu deviere la rupere; (d) Fibră de elastan sau spandex.

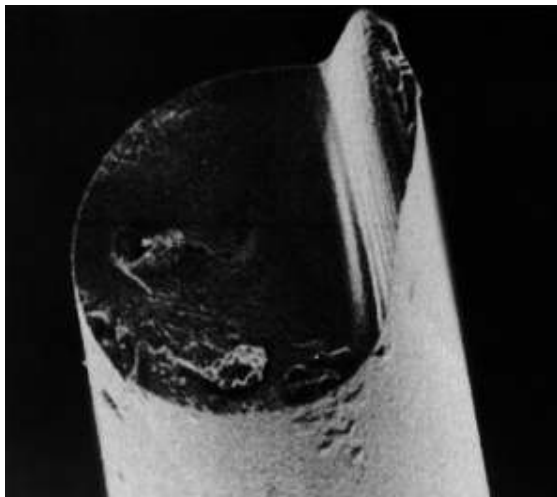
(a) $\times 900$



(b) $\times 2\,000$



(c) $\times 3\,000$



(d) $\times 1\,200$

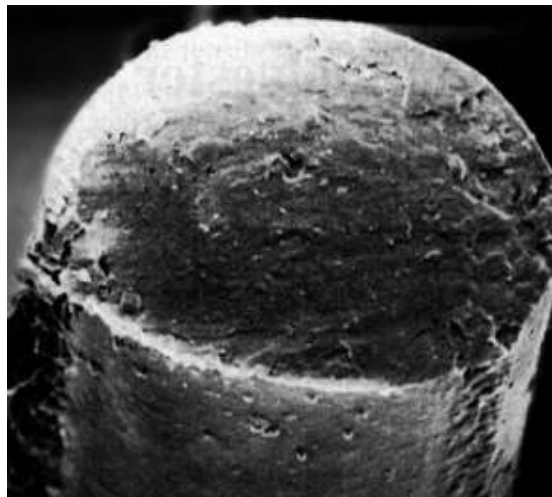
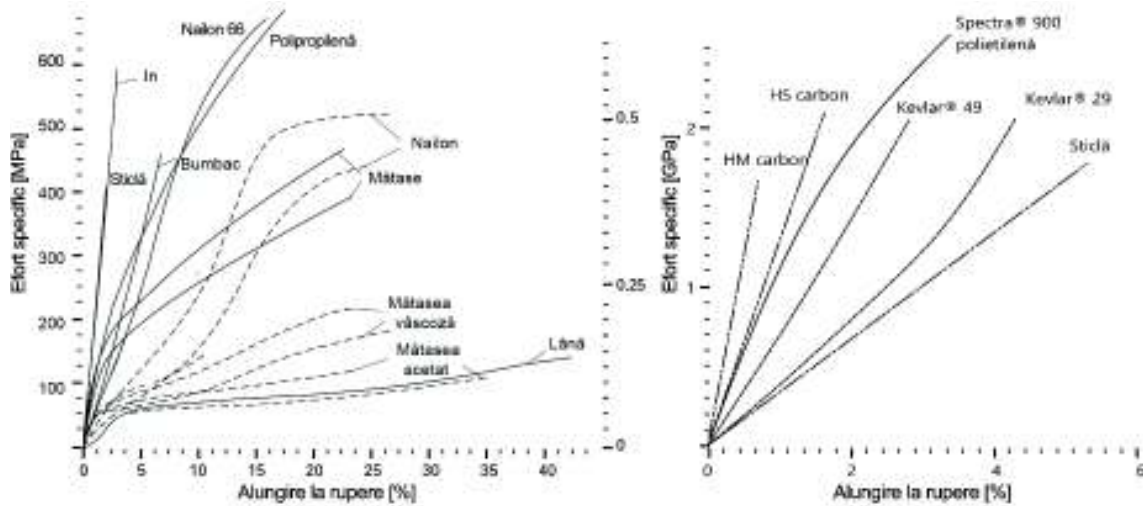


Figura 2.9 – Curba caracteristică efort-deformație pentru diferite tipuri de fibre și rezistența la întindere.



În cazul matricelor ceramice, precum betonul sau mortarul, fibrele utilizate în mod frecvent includ fibrele artificiale organice (fibrele acrilice, poliacetat de vinil, copolimeri de polietilenă-polipropilenă), fibre naturale (lemn de esență tare și moale) și fibre artificiale minerale (fibre de sticlă rezistente la alcalii, carbon, oțel etc.). Aceste fibre care prezintă un interes deosebit în cazul mortarelor, și nu numai, sunt prezentate detaliat în cele ce urmează.

2.3.2.1. Fibrele de carbon

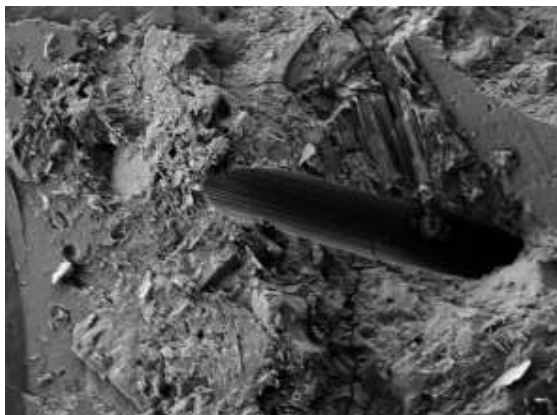
Fibrele de carbon se numără printre materialele neconvenționale și performante, care s-au răspândit cu repeziciune și vor continua să fie printre cele mai populare materiale de ranforsare când vine vorba de compozite performante, cu rezistențe ridicate și greutate redusă (Figura 2.10).

Aceste fibre sunt materiale alcătuite din filamente cristaline subțiri și puternice de carbon, folosite ca armătură, în special în rășini și materiale ceramice. Fascicolele răsucite conțin în general 10 000 sau chiar 20 000 de filamente, cu diametru cuprins între 7-9 mm. Având elasticitate mare, bune proprietăți mecanice, greutate redusă, rezistență bună la alungire, coeficient de dilatare și contracție termică mică, respectiv stabilitate la temperaturi înalte, sunt utilizate în mod frecvent în diferite domenii de inginerie, mai ales în aeronautică, inginerie militară sau civilă.

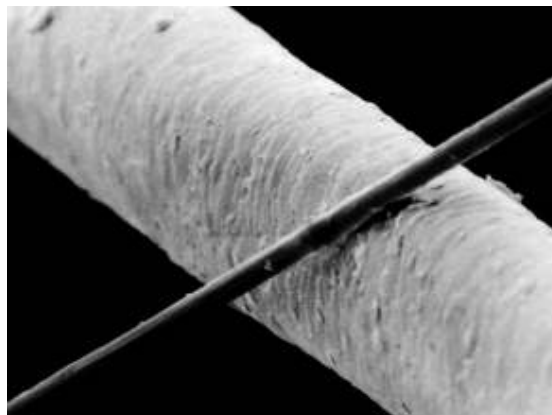
Datorită faptului că este un material relativ costisitor în comparație cu fibrele de sticlă, plastic sau alte materiale similare, utilizarea lor este încă limitată.

Figura 2.10 – Fibre de carbon; (a) Imagine SEM – microstructura betonului armat cu fibre de carbon și micro-fisuri în matricea cimentoasă; (b) Imagine SEM – fibra de carbon (culoare închisă) în comparație cu firul de păr uman (culoare deschisă și grosime mare).[117][82]

(a) 🔍 2 000 x



(b) 🔍 1 400 x



Dezvoltarea acestor fibre datează încă din anii 1950, când au fost obținute prima dată fibre de carbon prin încălzirea mătăsii artificiale. Prin acest proces inițial s-au obținut fibre cu conținut redus de carbon, având proprietăți mecanice, respectiv rigiditate redusă. Abia în anii 1960, a fost dezvoltat un proces nou în vederea obținerii fibrelor de carbon, utilizând ca materie primă poliacrilonitril, însă descoperirea procesului cu adevărat viabil a fost doar în anul 1963 de către Royal Aircraft Establishment, Marea Britanie. În timpul anilor '70, au fost efectuate numeroase cercetări pentru găsirea unor alternative de materii prime în vederea obținerii fibrelor de carbon. În urma acestor cercetări au fost obținute fibre utilizând ca materie primă produse petroliere.

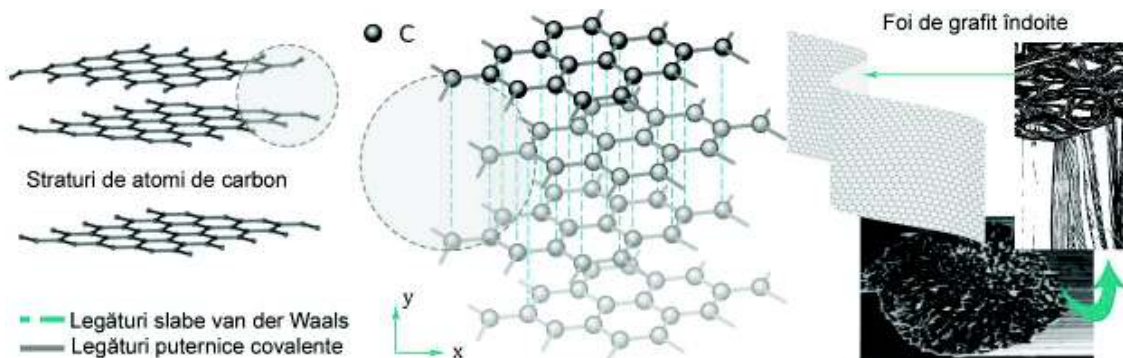
În momentul de față, obținerea filamentelor de carbon sau grafit, se face utilizând un polimer precursor, precum acrilice (poliacrilonitril sau mătase artificiale), sau materialele reziduale al produselor petroliere (de exemplu reziduu de la distilarea țițeiului). Materiile prime din care pot fi obținute fibre de carbon, în funcție de starea de agregare, sunt prezentate în Tabelul 2.7.

Tabelul 2.7 – Clasificarea materiilor prime utilizate pentru obținerea fibrelor de carbon în funcție de starea de agregare.

Starea de agregare	Materii prime utilizate
Solidă	cărbune amorf; asfalt de petrol; fibre organice (celuloză, mătase)
Lichidă	petrol; gudroane; uleiuri aromatice;
Gazoasă	hidrocarburi; acetilenă

Structura atomică a fibrelor de carbon este similară cu cea a grafitului, constând din straturi de atomi de carbon, dispuse într-o formă hexagonală regulată, iar diferența constă în modul în care se unesc aceste straturi de atomi. Grafitul este un material cristalin, în care straturile de atomi de carbon sunt așezate paralel, iar acești atomi sunt legați prin legături covalente puternice, cu forțele intermoleculare slabe Van der Waals dintre straturi (Figura 2.11). Materialul prezintă prin urmare proprietăți anizotrope accentuate: valoarea modulului lui Young după direcția straturilor de atomi este aproximativ 1 000 GPa (după direcția x), în timp ce valoarea modulului de elasticitate după direcția y (perpendicular pe straturi) este doar 35 GPa. Alte proprietăți, cum ar fi coeficientul de dilatare termică și conductivitatea termică, de asemenea, sunt anizotrope.

Figura 2.11 – Structura fibrei de grafit. Imagine SEM [107] și reprezentarea schematică.



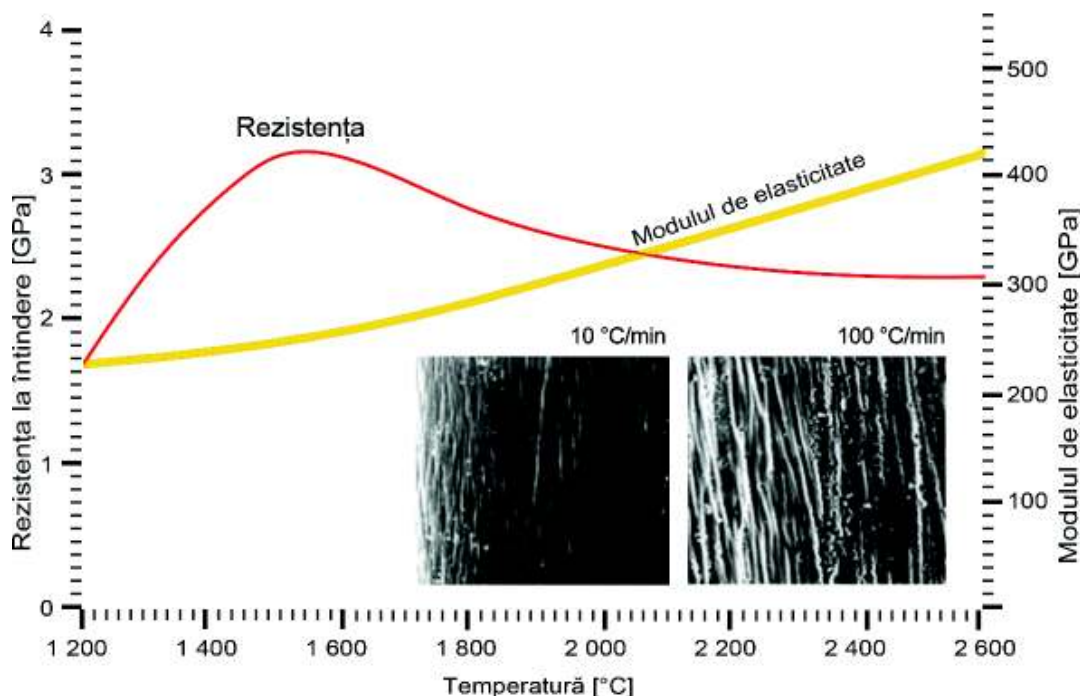
Metoda de fabricație presupune tratarea termică a polimerului precursor în vederea eliminării atomilor non-carbon, la o temperatură ridicată, cuprinsă între 1000÷2500°C în cazul carbonizării. Peste această valoare, polimerul precursor este transformat în fibre de grafit. În comparație cu fibrele de carbon cele de grafit, au un modul de elasticitate mai mare, dar rezistența la întindere este mai mică. Fibre cu calitate superioare se obțin de obicei din poliacrilonitril.

În momentul de față sunt trei posibilități principale pentru obținerea și fabricarea fibrelor de carbon, în funcție de polimerul precursor:

(a) **carbonizarea** fibrelor acrilice (poliacrilonitril): proces dezvoltat de Royal Aircraft Establishment, cu contribuții importante ale lui Watt (1966-1967). Materia primă este polimerul poliacrilonitril (PAN, rășină polimerică organică semi-cristalină), care are o structură și formulă chimică asemănătoare cu polietilenă, dar din doi în doi, unul dintre cei doi atomi de hidrogen este înlocuit cu un grup nitril ($-C\equiv N$) care la încălzire intră în reacție. Deși este un polimer termoplastic, se topește doar la temperatura de 300 °C. Este cel mai utilizat precursor (reprezintă 90% din producția de fibre de carbon). Efectul temperaturii finale asupra proprietăților fibrelor de carbon PAN este prezentat în

Figura 2.12. Se poate observa că există un control asupra modulului de elasticitate și rezistența la întindere a fibrelor în timpul procesului de fabricație prin temperatura de încălzire.

Figura 2.12 – Efectul temperaturii asupra fibrelor de carbon PAN în timpul procesului de carbonizare. Suprafața fibrelor supuse la aceeași temperatură, dar două viteze de încălzire diferite, conform [95].



(b) **extragerea gudronului rezidual** din produse petroliere: acest proces a fost inițial introdus de Otani (1965). Prin gudron se înțelege un amestec complex de diferite

hidrocarburi și molecule heterociclice (compus ciclic). Reprezintă o metodă mai ieftină de obținere a fibrelor în comparație cu metoda descrisă anterioară, dar fibrele au proprietăți inferioare.

(c) prin **depunere pirolitică**: fibrele de carbon pot fi produse prin depunerea pirolitică a hidrocarburilor gazoase: metan, benzen sau naftalină. Temperatura la care are loc acest proces este ~ 1 100°C. Această metodă a fost inițial descrisă de Oberlin (1976). Un tub de carbon subțire este mai întâi format pe un substrat adecvat și diametrul crește mai apoi printr-un mecanism de difuzie. Dezavantajul metodei este controlul scăzut asupra diametrului fibrei, dar printre avantajele se numără gradul mare de grafitizare care poate fi obținut.

Proprietățile principale ale fibrelor de carbon în funcție de polimerul precursor sunt date în Tabelul 2.8. și sunt prezentate în Figura 2.13.

Tabelul 2.8. – Proprietățile principale ale fibrelor de carbon în funcție de polimerul de bază.

Polimer precursor	Densitate [kg/m ³]	Rezistența la întindere [MPa]	Modulul de elasticitate [MPa]
Fibre de rayon *	1 350 – 1 450	660 – 820	34 000 – 41 000
Fibre de PAN	1 750 – 1 870	900 – 6 370	40 000 – 588 000
Hidrocarburi	1 900 – 2 200	1 380 – 4 050	159 000 – 966 000

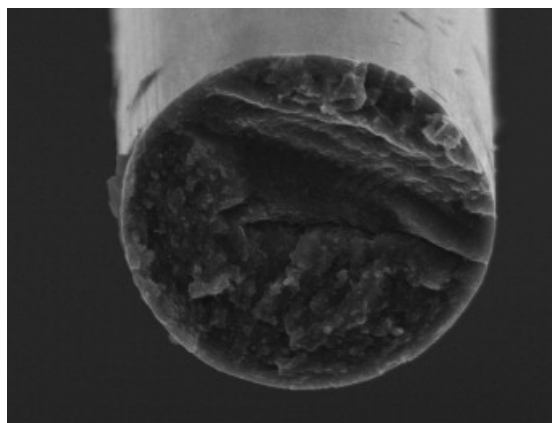
* Mătase artificială, primele fibre de carbon comerciale. Este greu de produs și are un randament scăzut; se utilizează în principal în programe spațiale existente.

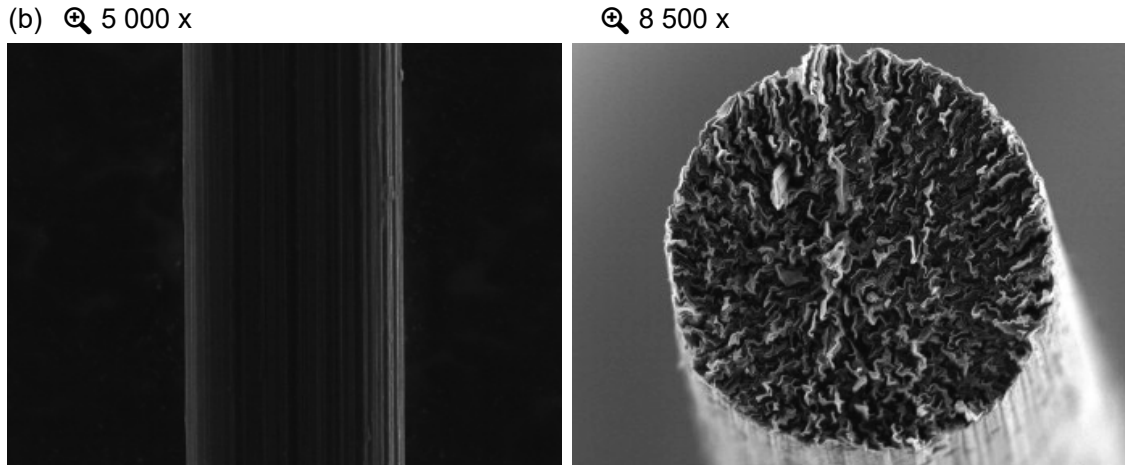
Figura 2.13 – Suprafața și secțiunea filamentelor de fibre de carbon, pe bază de: (a) PAN; (b) Hidrocarburi. [107]

(a) 🔍 5 000 x



(b) 🔍 15 000 x





Clasificarea fibrelor de carbon. În funcție de proprietățile mecanice (Tabelul 2.9), fibrele de carbon se clasifică în următoarele categorii [197][54]:

Tabelul 2.9 – Clasificarea fibrelor de carbon în funcție de proprietățile mecanice.

Notăție/Denumire		Descriere	E [GPa]
LM	<i>Low-Modulus</i>	- modul de elasticitate scăzut	E < 100
HT	<i>Standard-Modulus/High-Tensile</i>	- modul de elasticitate standard	E = 200-280
IM	<i>Intermediate-Modulus</i>	- modul de elasticitate intermediar	E = 200-325
HM	<i>High-Modulus</i>	- modul de elasticitate ridicat	E = 325-450
UHM	<i>Ultra-High-Modulus</i>	- modul de elasticitate foarte ridicat	E > 450
SHT	<i>Super-High-Tensile</i>	- rezistență la întindere foarte mare	E ~ 200

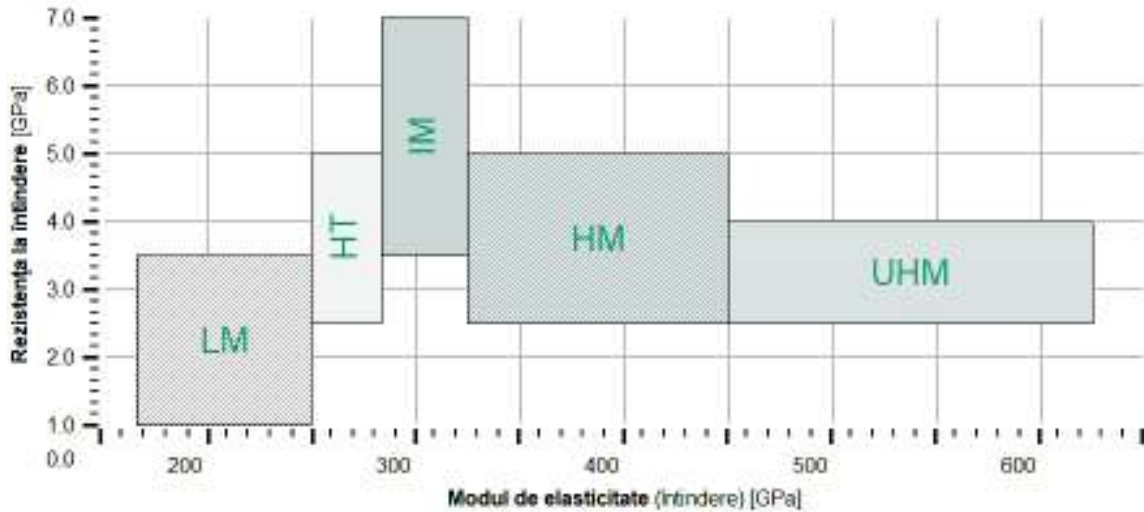
Rezistența la întindere și modulul de elasticitate al acestor categorii de fibre de carbon sunt prezentate schematic în Figura 2.14 conform [197].

În funcție de temperatura de tratament termic, se clasifică în trei categorii mari conform [54], prezentat în Tabelul 2.10.

Tabelul 2.10 – Clasificarea fibrelor de carbon în funcție de temperatura de tratament termic.

TIP I	temperatură înaltă (> 2000 °C)	<i>asociat cu modul de elasticitate înalt</i>
TIP II	temperatură intermediară (între 1500-2000 °C)	<i>asociat cu rezistență ridicată</i>
TIP III	temperatură scăzută (<1000 °C)	<i>asociat cu modul de elasticitate și rezistență redusă</i>

Figura 2.14 – Tipurile de fibre de carbon în funcție de performanțele mecanice: rezistența la întindere și modulul de elasticitate.



Avantajele și dezavantajele fibrelor de carbon sunt prezentate în Tabelul 2.11.

Tabelul 2.11 – Avantajele și dezavantajele fibrelor de carbon.

Avantaje	Dezavantaje
<ul style="list-style-type: none"> • disponibilitate în multe clase și forme cu proprietăți foarte variate; • modul de elasticitate ridicat, în special în cazul produselor petroliere (mai mare decât a oțelului); • rezistență la întindere ridicată, în special în cazul fibrelor pe bază de PAN (ca la oțel și sticlă); • densitate scăzută (ca la bumbac); • stabilitate termică bună; • conductibilitate termică ridicată; • coeficient de dilatare termică scăzut; • rezistență chimică bună; • nu reprezintă niciun pericol pentru sănătate. 	<ul style="list-style-type: none"> • cost încă relativ ridicat; • rezistență scăzută la rupere și probleme de manipulare; • rezistența la compresiune mică; • rezistența slabă la impact; • conductivitate electrică (probleme cu sistemele electrice și manipulare); • oxidează în aer la temperaturi de peste 450 °C; • anizotropie accentuată.

2.3.2.2. *Fibre de sticlă*

Sunt cele mai cunoscute tipuri de fibre pentru armarea compozitelor, în special al compozitelor cu matrice polimerică. Principalele avantaje ale folosirii acestor tipuri de fibre reprezintă costul relativ redus și proprietățile/rezistențele mecanice convenabile. Între dezavantaje se numără rezistența scăzută și nesatisfăcătoare la abraziune, sensibilitate structurală în timpul amestecării, respectiv scăderea aderenței la matrice în anumite cazuri (exemplu aderență scăzută la matrice polimerică în prezența apei). Folosirea lor este limitată și în cazul matricelor ceramice precum betonul, mortarul sau pasta de ciment datorită instabilității fibrelor de sticlă obișnuite în mediu alcalin.

Materia primă a fibrelor de sticlă sunt produsele anorganice pe bază de silicați: silice (SiO_2) cu adaosuri de oxizi de calciu, bor, sodiu, fier și aluminiu. Adăugarea oxizilor metalici determină schimbarea proprietăților sticlei. Rezultă din topitură prin: centrifugare, suflare sau tragere prin plăci cu orificii. Tragerea în fire a fost descoperită încă de egipteni, dar a fost utilizată doar din prima jumătate a secolului al XVIII – lea, iar adevărata producție industrială a început în anul 1930. Prin suflare rezultă fibre cu lungimi relativ mici, care sunt utilizate la obținerea produselor pe bază de vată de sticlă. Fibre lungi și discontinue se obțin prin centrifugare. [58]

Fibrele de sticlă sunt formate de obicei din 200-400 de filamente individuale cu o legătură ușoară între ele. Fibrele astfel create pot fi tăiate în diferite lungimi, sau combinate pentru crearea unor benzi sau țesături.

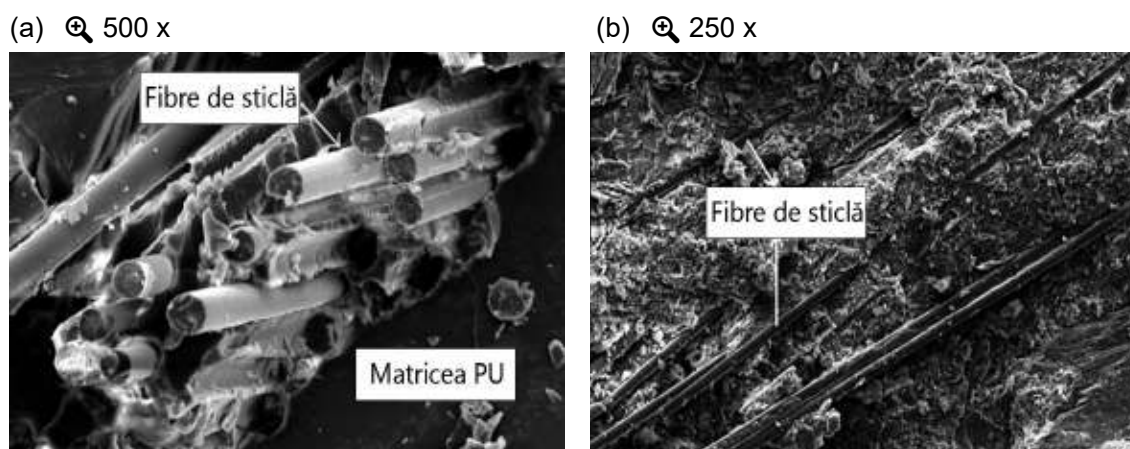
În funcție de compoziția chimică și proprietățile principale, fibrele de sticlă se împart în următoarele categorii:

- tip **E** – fibre de sticlă cu rezistență electrică mare;
- tip **C** – fibre de sticlă cu rezistență chimică mare;
- tip **S** – fibre de sticlă cu rezistență mecanică mare;
- tip **L** – fibre absorbante de radiații;
- tip **A** – rezistență crescută în mediu alcalin.

Cele mai frecvent utilizate sunt fibrele de tip **E**, **C** sau **S**. Sticla **E** nu numai că are o rezistență electrică mare, dar prezintă și o bună rezistență mecanică și rigiditate

crescută, respectiv este rezistent la intemperii. În unele cazuri, este preferat tipul **C**, având o rezistență mai bună la coroziune decât sticla **E**, dar are în același timp o rezistență mecanică mai slabă. Sticla **S** comparativ cu cele menționate anterior, posedă proprietăți superioare în ceea ce privește rezistențele mecanice, modulul de elasticitate și rezistența la temperaturi ridicate, dar este mai scumpă decât tipul **E**. În cazul matricelor cimentoase Portland, fibrele de sticlă tip **A** pot fi folosite, având caracteristici și rezistențe crescute în mediu alcalin (Figura 2.15).

Figura 2.15 – Fibre de sticlă (a) Imagine SEM: fibre de sticlă în matricea polimerică; (b) Imagine SEM: fibre de sticlă în matrice cimentoasă (mortar). [74][70]



Fibrele de sticlă, în general, sunt amorfe, dar poate să apară o anumită cristalizare după încălzirea prelungită a acestora la temperaturi ridicate, ceea ce conduce la o scădere a rezistenței materialului. Compoziția chimică variată a materiei primă determină o gamă destul de largă de produși, cu proprietăți foarte diferite între ele. Aceste compoziții, respectiv proprietățile principale ale tipurilor de fibre cele mai des utilizate pentru compozite sunt prezentate în Tabelul 2.12. [58]

Tabelul 2.12 – Compoziția și proprietățile fibrelor de sticlă utilizate pentru compozite.

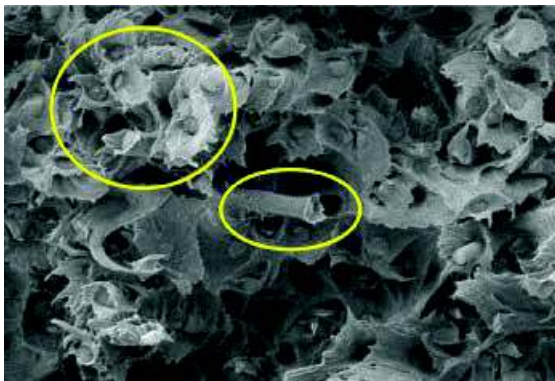
Caracteristici	Tip E	Tip C	Tip S
Compoziție [%]			
SiO ₂	52.40	64.40	64.40
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	14.50	4.10	25.00
CaO	17.20	13.40	-
MgO	4.60	3.30	10.30
Na ₂ O + K ₂ O	0.80	9.60	0.30
B ₂ O ₃	10.6	4.70	-
BaO	-	0.90	-
Proprietăți			

ρ [g/cm ³]	2.60	2.49	2.48
σ [GPa]	3.45	3.30	4.60
E [GPa]	76.0	69.0	85.50
T_{\max} [°C]	550	600	650

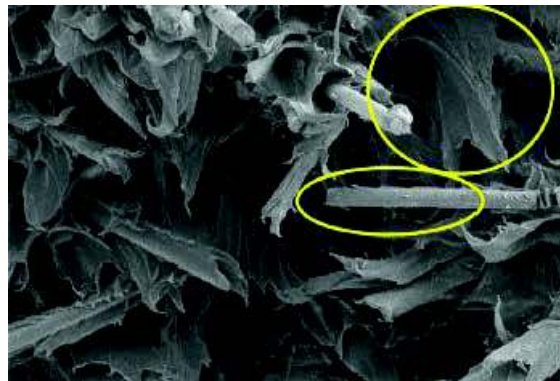
Spre deosebire de fibrele de carbon, proprietățile fibrelor de sticlă sunt izotrope. Astfel, valoarea modulului de elasticitate longitudinal și transversal sunt aceleași. Rezistența la întindere, așa cum a fost prezentat și în Tabelul 2.12, depinde de compoziția chimică, respectiv condițiile de fabricare și de mediul de testare. În cazul sticlei tip E, rezistența scade chiar și în aer umed, datorită adsorbției apei pe suprafață (Figura 2.16 [102]), respectiv o scădere și mai accentuată a rezistenței se poate constata dacă suprafața este expusă la acizi minerali. Totuși, un factor mai important care influențează rezistența tuturor tipurilor de fibre de sticlă, este deteriorarea în timpul operațiilor de procesare. Pentru a minimaliza această deteriorare, fibrele de sticlă sunt de obicei tratate, prin pulverizarea cu un strat subțire de apă conținând polimer peliculogen, cum ar fi acetatul de polivinil. Acest tratament cu polimeri are mai multe avantaje: (a) protejarea suprafeței fibrelor pentru a evita deteriorarea; (b) leagă fibrele pentru a ușura prelucrarea; (c) lubrifierea fibrelor – crește rezistența la uzură în timpul operațiilor de prelucrare ulterioară; (d) oferă proprietăți anti-statice; (e) creează o legătură chimică mai puternică între suprafața de sticlă și matricea compozitului – crește forța de aderență la interfață. [58]

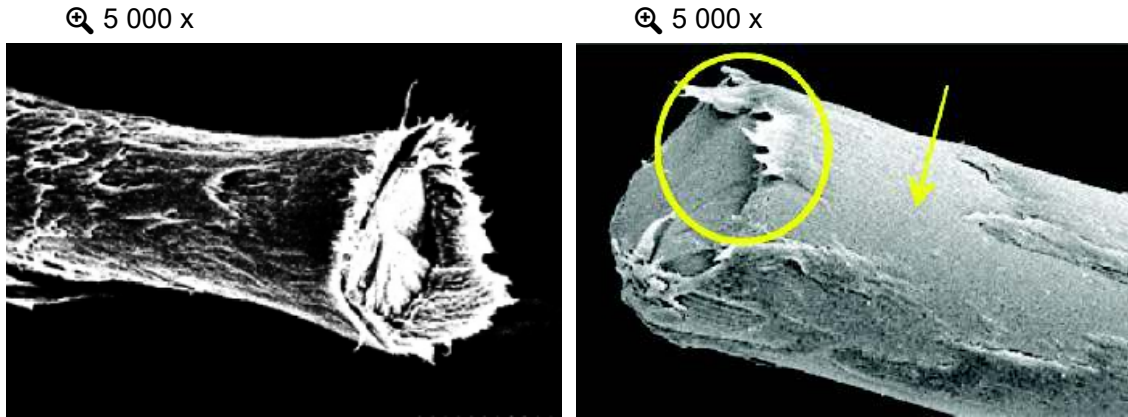
Figura 2.16 – Imagine SEM – efectul adsorbției de apă asupra rezistenței la întindere: interfața slăbită dintre materialul de ranforsare (fibră de sticlă) și matricea de polimer; (a) $\times 400x$ și $\times 5\,000x$: 1.7% conținut de apă; (b) $\times 400x$ și $\times 5\,000x$: 5.2% conținut de apă; suprafața și ruperea fibrelor indică scăderea forțelor de aderență la interfața polimer – ranforsant odată cu creșterea conținutului de apă. [102]

(a) $\times 400x$



(b) $\times 400x$





Caracteristicile principale, respectiv avantajele și dezavantajele utilizării fibrelor de sticlă sunt prezentate în Tabelul 2.13.

Tabelul 2.13 – Avantajele și dezavantajele utilizării fibrelor de sticlă.

Avantaje	Dezavantaje
<ul style="list-style-type: none"> • disponibilitate în multe clase cu proprietăți variate; • preț avantajos și proprietăți mecanice convenabile; • densitate redusă în comparație cu oțel; • nu putrezesc și au rezistențe apreciabile la coroziune și atacul insectelor și microorganismelor; • rezistență bună la foc (nu ard); • au proprietăți izotrope; • nu reprezintă pericol la sănătate. 	<ul style="list-style-type: none"> • utilizare limitată în cazul cimentului Portland; • nu sunt higroscopice: necesitatea adăugării de polimeri pentru îmbunătățirea proprietăților fizice; • sunt casante și au rezistență scăzută la impact, respectiv abraziune în timpul proceselor tradiționale de preparare (amestecare) – se deteriorează ușor; • instabilitate în mediu alcalin – incompatibilitatea fibrelor de sticlă obișnuite cu ciment Portland;

2.3.2.1. Fibre de aramid

Cea mai importantă fibră polimerică organică avansată, cu modul de elasticitate ridicat și duritate excepțională a fost realizat din poliamide aromatice și poartă numele de aramid. Aramidul a fost dezvoltat în 1960 de către Stephanie Kwoleck, S.U.A, înregistrată de compania americană DuPont, sub denumirea comercială Kevlar®. Inițial

a fost utilizată pentru înlocuirea azbestului, respectiv ca material de armare pentru anvelope.

Fibrele de aramid sunt derivate din molecule de polimer cu un grad înalt de aromatizare (conținând inele de benzen) și sunt produse prin procese de extrudare și de filare, care determină anizotropia fibrelor. Ele sunt caracterizate printr-o rezistență mecanică ridicată, modul de elasticitate, de asemenea, foarte mare și o stabilitate chimică excelentă. Utilizarea fibrelor de aramid determină inclusiv îmbunătățirea performanțelor betonului, măbind, în special, rezistența la întindere și la încovoiere, durabilitatea, respectiv rezistența la șoc.

În comparație cu fibrele de carbon, cele de aramid nu se deteriorează la fel de ușor și sunt mai rezistente în procesele de manipulare și punere în operă. În ceea ce privește rezistența la compresiune, respectiv forfecare, valorile sunt similare cu cea a fibrelor de sticlă E, dar rezistența la tracțiune este, în general, de două ori mai mare ca a fibrelor de sticlă (mai aproape de valoare rezistenței a fibrelor de carbon). Proprietățile principale ale fibrelor de aramid (Kevlar®) în comparația cu cele două tipuri de fibre (carbon și sticlă) sunt prezentate în Tabelul 2.14 [198] și Tabelul 2.15 [198].

Tabelul 2.14 – Proprietățile generale ale fibrelor de sticlă, carbon și aramid.

Tipul de fibră	Densitate [g/cm ³]	Rezistența la întindere [MPa]	Modulul de elasticitate [MPa]
Sticlă tip E	2.60	3 450	30 000 – 40 000
Carbon	1.58	4 127	125 000 – 181 000
Kevlar®	1.44	2 757	70 500 – 112 400

Tabelul 2.15 – Caracteristicile și comparația fibrelor de sticlă, carbon și aramid.

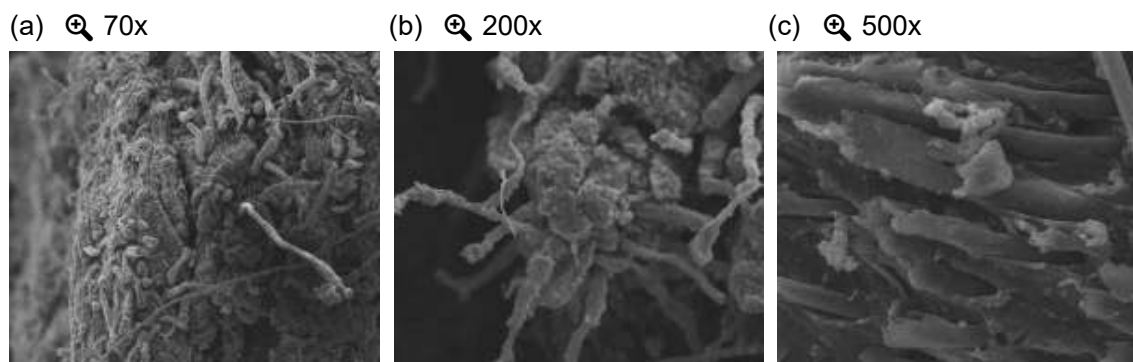
Tipul de fibră	Rezistența chimică	Aderența rășini	Rezistența la umezeală	Rezistența la abraziune	Rezistența la oboseală
Sticlă tip E	excelentă	excelentă	bună	slabă	bună
Carbon	excelentă	excelentă	bună	slabă	bună
Kevlar®	satisfăcătoare	satisfăcătoare	satisfăcătoare	excelentă	excelentă

Se cunosc mai multe tipuri de fibre de Kevlar, dar în momentul de față se produc în principal trei tipuri diferite: balistic (Kevlar[®] 29), structural (Kevlar[®] 49) și cu modul de elasticitate ridicat (Kevlar[®] 149). Pe plan mondial, producția acestor fibre este mai mare decât cea a fibrelor de carbon. Cererea globală de fibre de aramid a fost 38 000 tone în 2009 și se preconizează, totodată, să atingă 110 mii de tone până în 2020. În cazul fibrelor de carbon această valoare era aproximativ 23 mii de tone în 2009 cu o creștere anuală de ~15% conform estimărilor [128].

Datorită durității superioare este ideală în aplicații militare, pentru producerea de echipamente de protecție, pentru subansamble aeronave și spațiale etc. Compatibilitatea cu alte fibre permite realizarea unor structuri rigide și rezistente hibride, folosind de exemplu în combinație cu fibre de carbon. De asemenea, se poate utiliza în vederea armării unor matrice polimerice, de exemplu armarea cauciucului Figura 2.17 [143], dar nu este compatibil cu orice polimer. Modul de rupere ale fibrelor de aramid (țesătură hibridă) într-un compozit stratificat, având matricea de rășină termorezistentă este prezentat în Figura 2.18. [21]

Rezumatul caracteristicilor fibrelor de aramid și principalele avantaje și dezavantaje ale utilizării acestora este prezentat în Figura 2.17.

Figura 2.17 – Imaginea SEM a unui compozit cu matrice polimerică armat cu fibre de aramid.



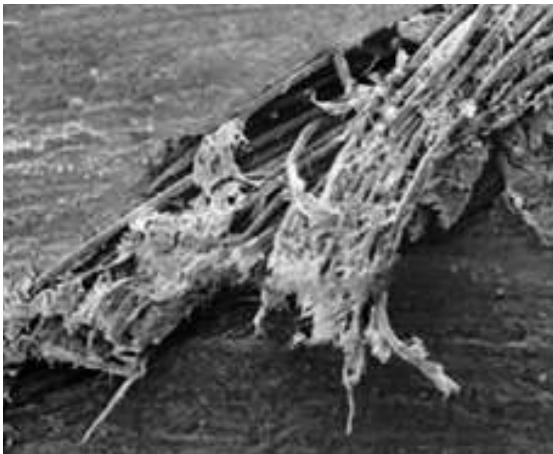
Tabelul 2.16 – Avantajele și dezavantajele fibrelor de aramid.

Avantaje	Dezavantaje
<ul style="list-style-type: none"> rezistență ridicată la șoc și rezistență bună la întindere (mai mare ca rezistența fibrelor de sticlă, dar mai mică decât fibrelor de carbon); 	<ul style="list-style-type: none"> preț ridicat; producție costisitoare datorită necesității menținerii polimerului insolubil în apă în timpul producției (utilizând acid sulfuric concentrat);

- stabilitate și rezistență foarte bună la temperaturi înalte (până la 500 °C);
- modul de elasticitate ridicat (~220 GPa).
- densitate redusă (1.70 g/cm³) – reduce greutatea structurilor cu ~30%;
- durabilitate excepțională – crește durabilitatea chiar de 5 ori, comparativ cu o structură tradițională;
- rezistență chimică satisfăcătoare;
- rezistență bună și stabilitate în timpul manipulării și punerii în operă;
- nu reprezintă niciun pericol pentru sănătate.
- prelucrare dificilă cu metodele convenționale a pieselor armate cu fibre de aramid;
- dificultăți de impregnare;
- aderență scăzută în combinație cu anumite polimeri;
- durabilitatea în matrice este nesigură; sunt sensibile la acizi puternici, la baze și la câteva oxidanți;
- absorb umezeala și sunt sensibile la radiațiile UV;

Figura 2.18 – Compozit stratificat armat cu fibre de aramid; (a) Modul de rupere a fibrei de aramid, Kevlar 29 la întindere; (b) Fracturi multiple: fractură coezivă (în matrice) și adezivă (între matrice și fibră). Propagarea fisurilor în matrice provoacă slăbirea și fisurarea în zona de interfață matrice-fibră. Acest tip de fractură se numește fractură adezivă.

(a) 🔍 80x



(b) 🔍 150x



2.3.2.3. Fibre de polipropilenă

Polipropilena este unul dintre cei mai răspândiți și versatili polimeri cunoscuți, fiind folosit atât sub formă de „plastic”, cât și sub forma de fibră. [59]

Din polipropilenă se realizează o gamă foarte mare de materiale, dintre care fac parte și fibrele utilizate în construcții pentru armarea dispersă a betoanelor și

mortarelor. Acest tip de fibră ocupă locul al patrulea în ceea ce privește producția, după fibrele de poliesteri, poliamidă și fibre acrilice. Aproximativ 4 milioane de tone de fibrele de polipropilenă sunt produse în lume într-un an. Utilizarea fibrei de polipropilenă în construcții a fost amintită prima dată în 1965, recomandată ca și adaos în beton la construirea clădirii rezistente la explozii pentru Corpul de ingineri americani (US Corps of Engineers). [85]

Ca și material, polipropilena este un polimer termoplastic obținut prin polimerizarea monomerului propenă (numită și propilenă), având forma moleculară $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ [48]. În condiții normale, propilena este un gaz cu miros specific (hidrocarbură nesaturată), iar polipropilena se fabrică prin polimerizarea acestuia în prezența unor complecși metalici (catalizatori) și/sau altor monomeri. Materialul astfel obținut se remarcă printr-un comportament bun și stabilitate dimensională la temperaturi mari în comparație cu alte materiale plastice (de exemplu în comparație cu PVC - policlorura de vinil), ceea ce determină folosirea cu succes și la instalații de încălzire. Datorită structurii sale cristaline, polipropilena își păstrează proprietățile chiar până la temperatura de topire 160-170 °C.

Proprietățile caracteristice ale fibrelor de polipropilenă sunt prezentate și comparate cu cele de polietilenă și nailon în Tabelul 2.17, pe baza lucrărilor [48][138], iar Tabelul 2.18 prezintă principalele avantaje și dezavantaje ale utilizării acestora.

Tabelul 2.17 – Proprietățile principale ale fibrelor de polipropilenă în comparație cu fibrele de polietilenă și nailon.

Proprietate	Polipropilenă (PP)	Polietilenă de joasă densitate (LDPE)	Nailon
Densitate [g/cm^3]	0.90	0.91 – 0.925	1.15
Temperatura de trecere în stare sticloasă [$^{\circ}\text{C}$]	-20 °C	-100 °C	-40 °C
Temperatura de topire [$^{\circ}\text{C}$]	175 °C	98 – 115 °C	190 – 200 °C
Rezistența la întindere [MPa]	450 – 900	100 – 600	750 – 1 100
Alungire la rupere [%]	15 – 20	3 – 100	16 – 20
Modulul de elasticitate [MPa]	3 500 – 10 000	5 000	4 000 – 5 000

Tabelul 2.18 – Avantajele și dezavantajele fibrelor de polipropilenă.

Avantaje	Dezavantaje
<ul style="list-style-type: none"> bună rezistență la solicitări continue, șoc uzură; 	<ul style="list-style-type: none"> rezistență mecanică mai slabă în comparație cu nailon sau alt tip de fibră;

- rezistență al acțiunea microorganismelor/insectelor și rezistență chimică excelentă;
- nu sunt higroscopice (nu absoarbe umezeala/apa); proprietățile în stare/mediu umed și uscat nu diferă;
- conductibilitatea termică redusă (bun izolator termic);
- rezistență la foc: se aprind greu (doar în contact direct cu focul);
- greutate specifică cuprinsă între 0.895-0.910 g/m³ – cea mai mică dintre fibrele sintetice/textile;
- preț redus, disponibil în cantitate mare;
- nu se corodează, sunt antimagnetice și antistatice;
- au o durabilitate mare pe termen lung;
- nu reprezintă pericol la sănătate.
- rezistență slabă la radiații UV, conduce la reducerea rezistențelor mecanice; necesită stabilizatori și antioxidanți costisitori în vederea eliminării acestor neajunsuri;
- aderența slabă în cazul unor materiale cum este de exemplu latexul;
- la temperaturi relativ scăzute (-20 °C) trec în stare sticloasă, deci intervalul de temperatură de utilizare se consideră în mod obișnuit între 0 și 135 °C;
- nu înlocuiește armarea clasică la structuri/elemente de rezistență, dar se poate folosi împreună cu aproape orice soluție clasică.

2.3.2.4. *Fibre metalice*

În vederea obținerii fibrelor metalice se utilizează metale și aliaje feroase, respectiv neferoase cum sunt oțelurile aliate/nealiate, aluminiu, cupru, nichel, titan, cobalt, metalele prețioase, respectiv aliajele fiecăruia, wolfram etc. Procesele la care sunt supuse și tratamentele ulterioare determină mici modificări în ceea ce privește proprietățile acestor fibre, în cea mai mare parte păstrând proprietățile și caracteristicile materialului din care sunt obținute. [20]

Fibrele metalice apar sub diferite forme: fibre discontinue (scurte sau lungi) sau sub forma de fibre continue multi-direcționale (țesături) [69][57]. În cazul betoanelor, mortarelor și pastei de ciment se utilizează în principal fibrele de oțel.

Densitatea mare a fibrelor metalice, precum și costul mai ridicat în comparație cu alte tipuri de fibre (de exemplu fibrele de sticlă) determină folosirea lor restrânsă și limitată. Principalele caracteristici și proprietăți pentru fibrele metalice cele mai cunoscute sunt prezentate în Tabelul 2.19, conform [20].

Tabelul 2.19 – Proprietățile fizico-mecanice ale principalelor tipuri de fibre metalice.

Tipul de fibră	Densitate [kg/m ³]	Rezistența la întindere [MPa]	Modulul de elasticitate [MPa]
Oțel carbon	7 800	4 000	200 000
Oțel inoxidabil	8 200	2 100	224 000
β Ti	4 600	2 300	119 000
Aluminiu	2 700	170	70 000

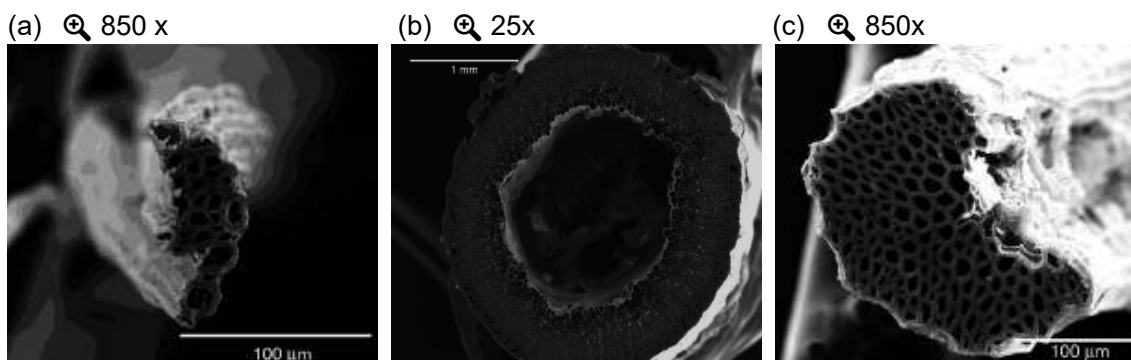
Așa cum reiese din tabel, fibrele metalice de oțel au densitatea cea mai mare, combinată cu modulul de elasticitate cel mai ridicat, în schimb ce fibrele de aluminiu au rezistențe, modul de elasticitate și densitate mai scăzută.

2.3.2.5. Fibre naturale organice și minerale

Există o gamă destul de largă de fibre naturale care au potențial ridicat în vederea utilizării lor ca armătură în diferite compoziții. Există trei tipuri de fibre naturale: **fibre naturale proteice**, care cuprinde fibrele din mătase naturală, părul din blana animalelor și lâna; **fibre naturale pe bază de minerale** (azbest, bazalt etc.) și **fibre naturale pe bază de plante**, numite și fibre celulozice. Cea mai obișnuită și probabil și cea mai cunoscută fibră naturală este celuloza, care ia naștere prin polimerizarea moleculelor de glucoză. Acestea sunt aranjate în diferite configurații complexe și reprezintă constituentul principal al membranelor celulelor vegetale.

Rezistența și rigiditatea fibrelor celulozice depinde de conținutul de celuloză și de orientarea micro-fibrelor în peretele celular (Figura 2.19), respectiv sunt influențate de metodele de extracție a fibrelor. [109]

Figura 2.19 – Morfologia fibrelor naturale celulozice; (a) fibră de iută; (b) fibră de in; (c) fibră de sisal. [38][140]



Proprietățile principale ale unor fibre naturale sunt evidențiate în Tabelul 2.20.

Tabelul 2.20 – Proprietățile principale ale unor fibre naturale. [22][109]

Fibră	Densitate [kg/m ³]	Rezistența la întindere [MPa]	Modulul de elasticitate [GPa]	Alungire la rupere [%]
Iută	1 440	393 – 773	10 – 30	1.5 – 1.8
Sisal	1 500	350 – 700	9 – 22	2 – 7
Cocos	1 150	131 – 175	4 – 6	15 – 40
Bumbac	1 550	287 – 597	5.5 – 12.6	7 – 8
In	1 500	345 – 2 000	27.5 – 85	1 – 4

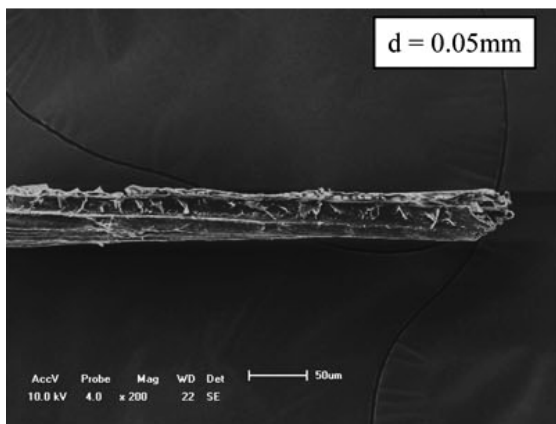
Deși fibrele naturale au un modul scăzut de elasticitate și prezintă variații mari ale rezistențelor mecanice, aceste fibre au rezistența la întindere relativ mare.

Fibrele naturale, în special cele celulozice, au densitate scăzută și un preț mic. Totuși, producția compozitelor pe baza acestor fibre naturale este în prezent foarte limitată. Acest lucru se datorează în principiu degradării fibrelor în compozit (scăderea rezistențelor datorită umidității și acțiunii ciupercilor și bacteriilor, atac chimic etc.).

Dintre fibrele naturale organice, fibrele de cocos și bambus sunt cele utilizate și cercetate în vederea îmbunătățirii compozitelor cimentoase, printre care le amintim [32][29][94][122]. Modul de rupere ale fibrelor naturale supuse la eforturi de întindere este prezentată în Figura 2.20 conform lucrării [100].

Figura 2.20 – Imagini SEM: modul de rupere a fibrelor naturale la întindere: (a) sisal; (b) bambus; (c) nucă de cocos.

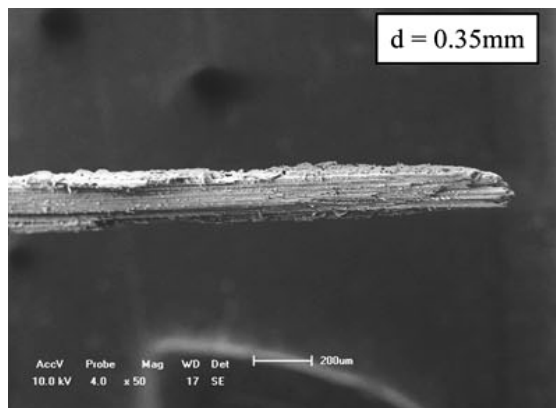
(a) 200 x



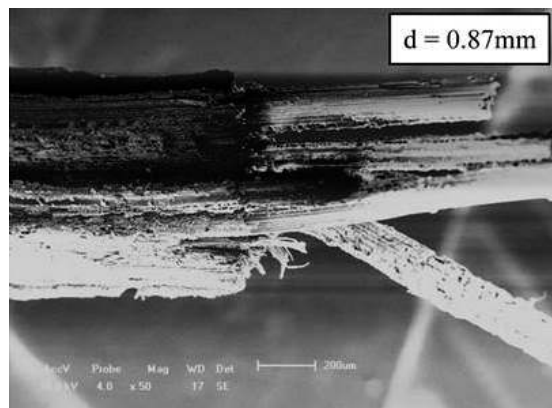
200 x



(b) 50 x



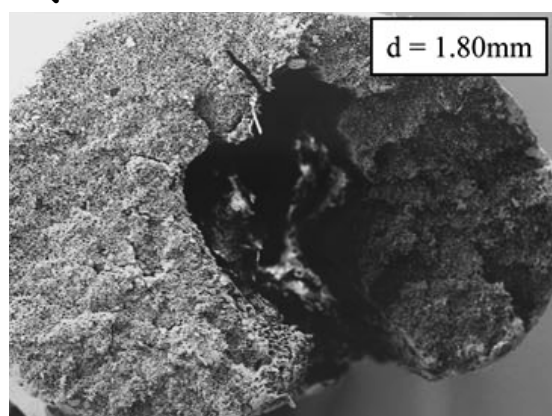
50 x



(c) 50 x



50 x



Fibra minerală de azbest este disponibilă în mod natural și a fost folosită mult timp (din anul 1900) cu succes în combinație cu pasta de ciment Portland pentru a forma un produs versatil și utilizat pe scară largă, numit azbociment. Având rezistență termică, mecanică și chimică bună, au fost utilizate pentru conducte, dale, elemente de izolație, elemente de acoperiș și fațadă etc. Plăcile de azbociment sunt de aproximativ două sau trei ori mai rezistente decât varianta nearmată. Deși sunt compatibile și îmbunătățesc inclusiv proprietățile betoanelor și mortarelor, aceste fibre prezintă pericol la sănătate și din acest motiv utilizarea lor este foarte limitată. La elemente pe bază de ciment cu secțiune redusă, o alternativă mai nouă în vederea înlocuirii fibrelor de azbest sunt fibrelor de PAV (fibrelor de poliacetat de vinil). Fibrelor de PAV formează o legătură puternică cu matricea cimentoasă datorită naturii hidrofilă și caracteristicilor lor geometrice, iar rezistențele mecanice ale compozitului astfel rezultat sunt superioare celui armat cu fibre de polipropilenă arătat în lucrarea [12].

Proprietățile mecanice ale fibrelor de azbest în comparație cu cele utilizate în vederea înlocuirii acestuia în anumite aplicații (PAV și polipropilenă) sunt prezentate în Tabelul 2.21.

Tabelul 2.21 – Proprietățile fizico-mecanice ale fibrei de azbest și comparația cu fibrele de PAV și polipropilenă.

Tipul de fibră	Densitate [g/cm ³]	Rezistența la întindere [MPa]	Modulul de elasticitate [MPa]
Azbest	3.20	500 – 3 000	80 000 – 150 000
PAV	1.30	1 400 – 1 600	40 000 – 100 000
Polipropilenă	0.90	400 – 800	3 500 – 5 000

2.3.3. Conceptul de transfer al eforturilor și interfața matrice-armătură

Performanța și rezistența materialelor compozite se datorează transmiterii sarcinilor de la matrice și suportarea acestora de către armături. Această transmitere a încărcării se realizează prin contactul de interfață matrice-armătură, care se formează în procesele de fabricație și poate fi o zonă de separare clară între componente. Datorită faptului că are o influență semnificativă asupra proprietăților compozitului, interfața matrice-armătură joacă un rol important în analiza acestor materiale și de cele mai multe ori este considerată ca și o fază constituantă distinctă (a treia fază).

Condiția primordială menționată anterior care se referă la compatibilitatea chimică a fazelor constituente este importantă, deoarece crearea unei legături chimice bune determină ca ansamblul format să devină solidar (interfață optimă), iar deformarea matricei (component cu modul de elasticitate mai scăzut) să fie astfel micșorată de către armătură. Incompatibilitatea chimică determină astfel cedarea prematură a compozitelor. Un astfel de exemplu este matricea epoxidică armată cu fibre de polietilenă de înaltă densitate unde se formează o interfață slabă între fibre și matricea [45].

Ca și fază constituantă, se definește ca o zonă de tranziție în care proprietățile evoluează treptat. Zona se consideră din acel punct al armăturii în care încep să se schimbe proprietățile locale ale acestuia și evoluează treptat până la punctul în care proprietățile sunt egale cu cel al matricei (proprietăți globale). În practică, apar multe

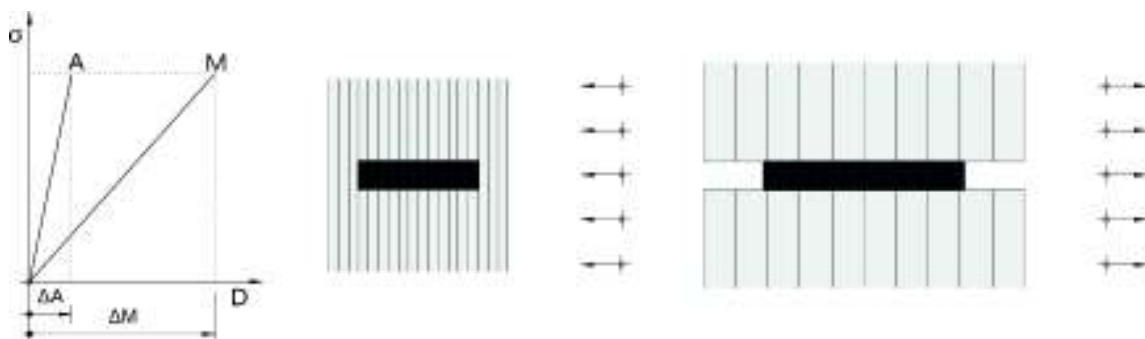
fenomene complexe la interfața componentelor, în funcție de structura materialelor și de eforturile generate în acestea, procese care tind să promoveze deformarea plastică a matricei și pot, de asemenea, să influențeze natura și modul de cedare a materialului.

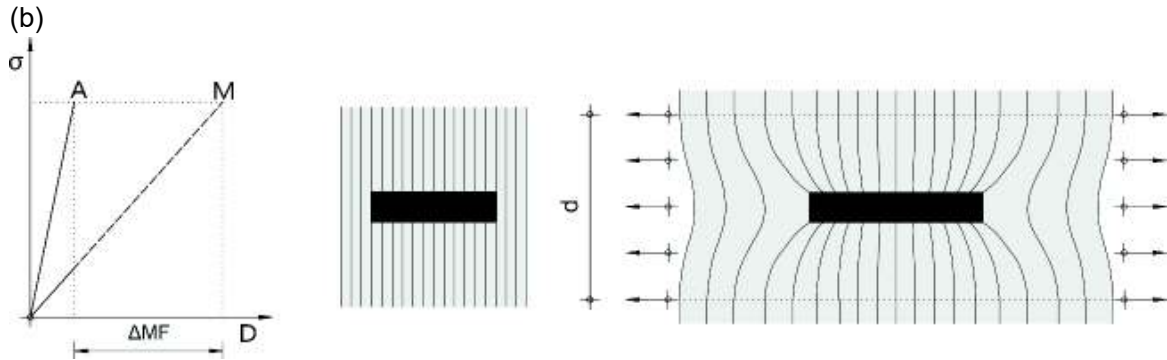
Pentru ilustrarea și înțelegerea conceptului descris anterior, se consideră un compozit alcătuit dintr-o singură armătură (fibră), încorporată într-o matrice oarecare, neglijând legătura la interfața acestora. În acest caz, fiecare fază constituantă se deformează independent când ansamblul este supus unei solicitări exterioare conform modulul de elasticitate individual, specific fiecărui material, Figura 2.21 (a). Dacă există o legătură chimică bună la interfața constituenților, fazele componente formează un compozit solidar și deformarea matricei este influențată de prezența armăturii, Figura 2.21 (b). Deformarea este astfel micșorată dacă modulul de elasticitate a ranforsantului este mai mare (armătură rigidă) în comparație cu matricea.

Totodată, deformarea în matrice variază în funcție de distanța până la armătură: influența armăturii asupra matricei scade cu creșterea distanței, ajungând la raza (notată cu d pe figură), la care armătura nu mai exercită nicio influență și matricea se deformează liber. Aceasta definește limitele fazei care descrie comportarea materialului la interfața matrice-armătură. Diferența de alungire între armătura și matricea compozitului, notată cu ΔMF pe figura alăturată, reprezintă de fapt transferul de sarcină între constituenți.[20]

Figura 2.21 – Conceptul de transfer al eforturilor între matrice și armătură; (a) interfață neglijată: fazele constituente se deformează liber; (b) interfață și legătură chimică bună între constituenți: influența armăturii asupra deformării matricei.

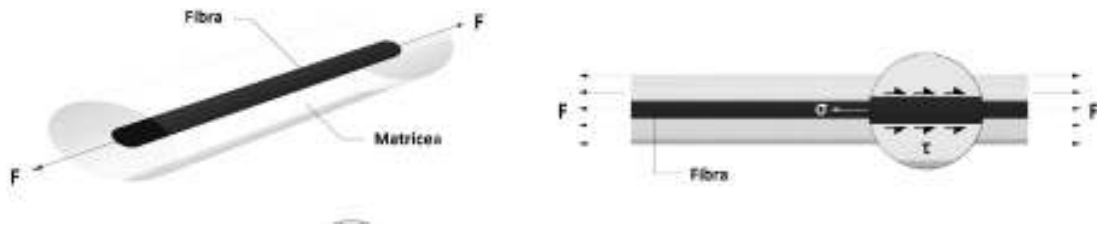
(a)



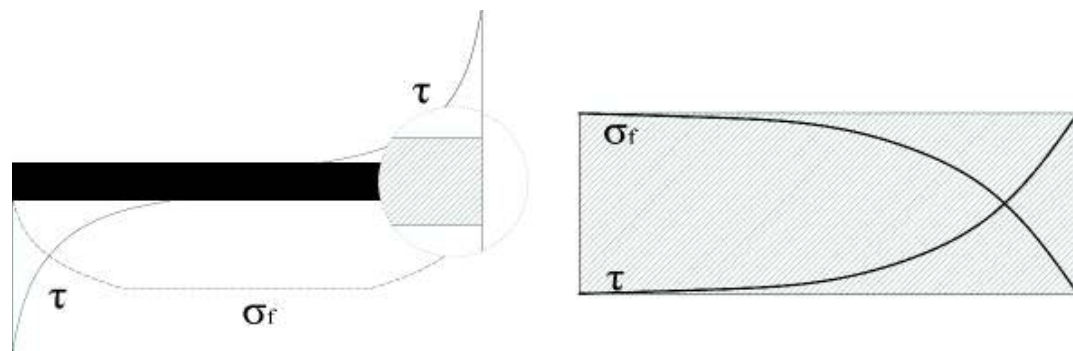


Într-un materialul compozit, dacă este supus unei solicitări exterioare, legătura bună la interfața matrice-armătură determină apariția unor tensiuni în ambele componente: matricea având rigiditate mai mică, are tendința pentru o deformare mai accentuată și induce tensiuni de întindere în armătură. Prin reacțiune, armăturile determină apariția unor eforturi de forfecare, conform Figura 2.22.

Figura 2.22 – Fibra supusă la solicitări de întindere înglobată într-o matrice oarecare.



Distribuția tensiunii elastice de forfecare (τ) la interfață și a tensiunii de întindere în fibră (σ).



În cazul unei deformări elastice, în interiorul corpului ia naștere o forță elastică care se opune solicitării exterioare. Dacă considerăm întregul material compozit, tensiunea care apare în interiorul materialului poate varia semnificativ de la un punct la altul (în special în cazul armării cu fibre scurte sau particule mici). Se poate estima

că tensiunea în compozit este egală cu suma valorii tensiunii medii pe volum al fiecărui element constituent (de exemplu matrice și fibre).

Din condiția de echilibru mecanic al sistemului solicitat rezultă că sarcina exterioară, respectiv tensiunea în compozit, trebuie să fie egală cu suma tensiunilor medii pe volum al constituenților:

$$f\bar{\sigma}_m + (1 - f)\bar{\sigma}_f = \sigma_A \quad (2.1)$$

unde $\bar{\sigma}$ reprezintă matricea tensiunilor medii, $\bar{\sigma}_m$ – matricea compozitului, respectiv $\bar{\sigma}_f$ – fibre, având fracția volumică f , iar σ_A reprezintă matricea tensiunii rezultată.

Prin urmare (2.1), în cazul unui compozit simplu cu doi constituenți, supus unei forțe exterioare, o parte din sarcină este preluată de către fibre, iar restul de matrice. Ca răspunsul materialului compozit să rămână elastic, această proporție trebuie să fie independentă de forța aplicată și reprezintă o caracteristică importantă a materialului. În acest caz, sarcina preluată de către armătură depinde de fracția de volum (sau masă), forma și orientarea fibrelor, respectiv de proprietățile elastice ale ambelor componente.

În absența unei forțe exterioare, în fiecare component individual pot apărea în continuare tensiuni (tensiuni reziduale), care conform ecuației (2.1) trebuie să se echilibreze unul pe altul (tensiunea apărută în matrice și fibre).

Armătura poate fi considerată că lucrează eficient și îndeplinește rolul, dacă preia o proporție relativ mare din sarcina exterioară. Acest lucru automat conduce la o rezistență mai mare, precum și la o rigiditate mai mare ($E_f \gg E_m$) a compozitului. Rezultă, deci, importanța condiției ca armătura să fie aleasă în așa fel încât rezistența la întindere și modulul de elasticitate al acestuia să fie mai mare decât al matricei, atunci când scopul este obținerea unui material cu comportament mecanic îmbunătățit.

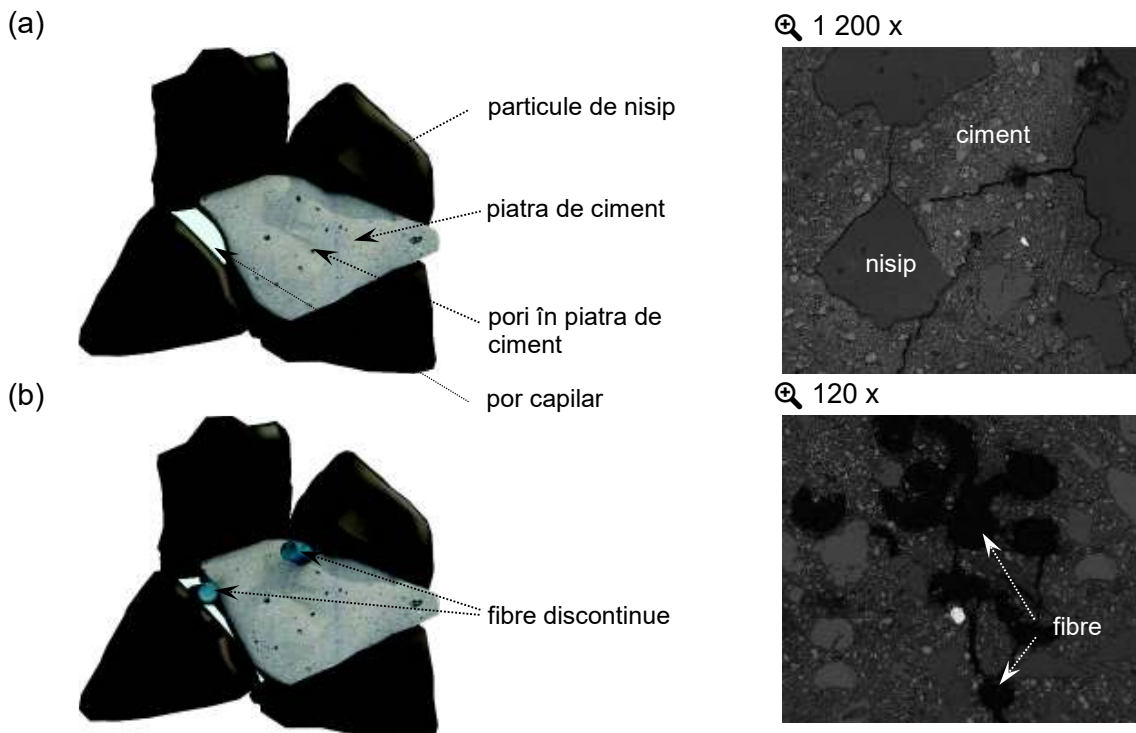
Cele prezentate în această secțiune privind comportamentul elastic al materialelor compozite armate cu fibre sunt importante și reprezintă baza analizei multi-scalare al acestora, ceea ce constituie obiectivul cercetării de față și este detaliat și dezvoltat în Capitolul 3 - Aspecte privind testarea virtuală a mortarelor.

2.4. Mortar armat dispers cu fibre

2.4.1. Definirea și evoluția mortarelor armate cu fibre

Mortarul armat dispers se definește ca un material cu aspect de gresie obținut prin întărirea unui amestec de nisip, lianți, apă și fibre discontinue: oțel, sticlă, polimer etc. Privit ca și compozit, matricea acestuia reprezintă mortarul obișnuit care înglobează fibrele discontinue (Figura 2.23). Indiferent de tipul de armătură folosit, de regulă în acest caz, masa semnificativă în compoziție rămâne mortarul. Având în vedere acest aspect, analiza și evoluția compoziției matricei este esențială în vederea înțelegerii și îmbunătățirii proprietăților compozitului.

Figura 2.23 – Reprezentarea compoziției și a microstructurii mortarului simplu și a mortarului armat cu fibre. Microstructură tipică la 1 200x mărire (mortar simplu) și (b) 120x mărire pentru compozit, conform [79] analiză SEM.



În anii 1900 apare prima dată conceptul de beton armat cu fibre în sensul modern, utilizând în compoziția acestuia fibre de azbest. Cu 50 de ani în urmă, odată cu apariția și definirea conceptului de materiale compozit, betonul armat dispers devine unul dintre subiectele de mare interes. Totuși, dezvoltarea masivă a materialelor armate cu fibre a început în anii '60, care marchează începutul disciplinei și a cunoscut în continuare o creștere exponențială datorită apariției unor materiale și tehnologii noi,

respectiv datorită extinderii domeniilor de utilizare ale acestora. În cazul betoanelor, materialul ranforsant a fost inițial oțelul (1960) și fibrele de sticlă iar aplicarea și utilizarea pe scară largă ale acestora a început în anii '90. Odată cu dezvoltarea tehnologiilor de producție a maselor plastice, tot în această perioadă, apar și în tehnologia betoanelor fibrele polimerice. Datorită rezistenței în principal la săruri și coroziune, ele au devenit esențiale în multe aplicații și se folosesc și în prezent.

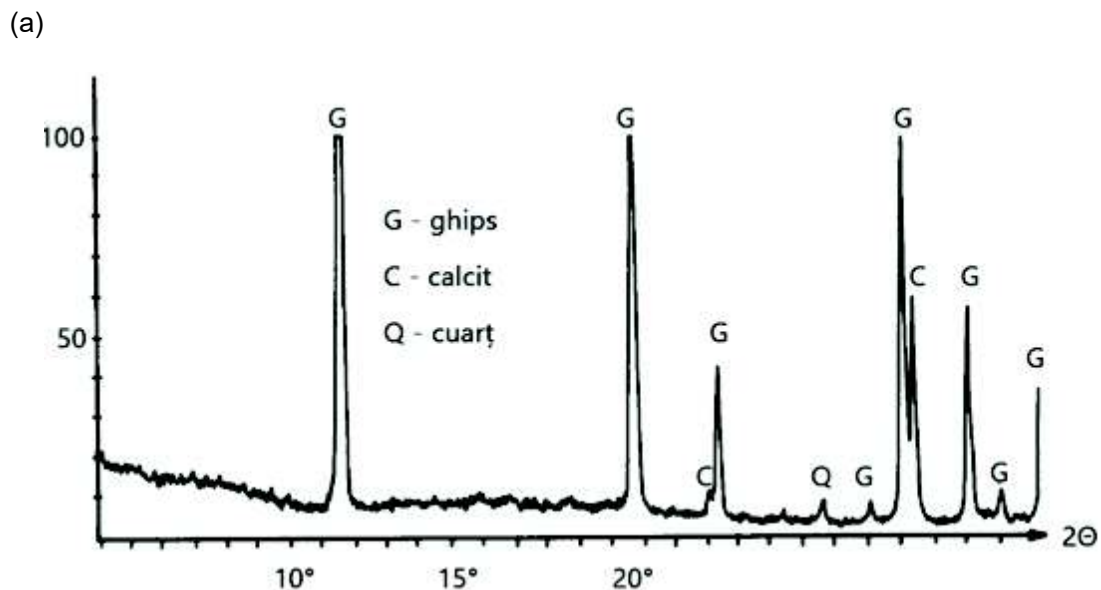
Cu toate acestea, tehnologia și tehnica de îmbunătățire a proprietăților materialelor fragile și ductile, utilizând fibre discontinue, a apărut deja în antichitate. Cu aproximativ 3 500 de ani în urmă, cărămizile din argilă au fost armate cu paie sau resturi lemnoase la realizarea caselor și adăposturilor, respectiv au fost îmbunătățite cu polimeri naturali (albuș de ou, sânge de bou etc.). Apariția lor a fost prima dată în Babilonia, când s-a construit în centrul orașului un edificiu specific Mesopotamiei, numit zigurat, în formă de piramidă în trepte, având pe ultima platformă un templu. Singurul material folosit în acest caz a fost argila amestecată cu paie tăiate. Tot în acest timp, cărămizile întărite cu paie și cu deșeuri vegetale au fost utilizate și în Egipt, confecționate din aluviunile Nilului. Vechii mesopotamieni pe lângă argila armată cu paie, au realizat și compozite stratificate (în jurul anului 3400 î.H.), când au lipit benzi de lemn în diferite unghiuri pentru a crea placaje. Astfel de compozite stratificate au apărut și în Japonia, unde samurarii au folosit săbii create și alcătuite din mai multe straturi metalice. Printre cele mai vechi aplicații ale compozitelor se află și industria olăritului. Pentru realizarea exemplarelor ceramice, înainte de ardere, fibrele de sticlă și părul de animal a fost folosit cu scopul de a reduce contracția și a îmbunătăți rezistența materialului de bază. [118][90][23]

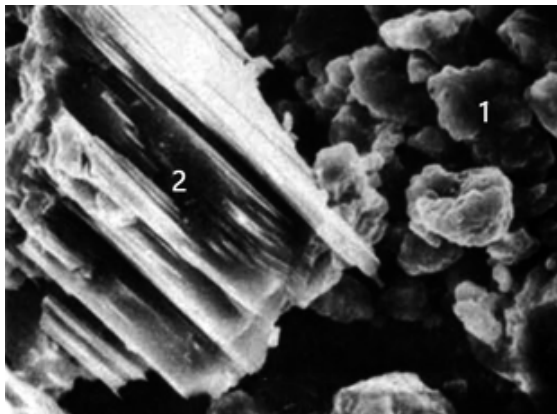
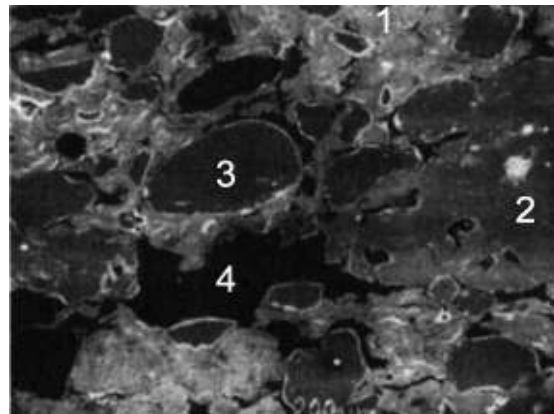
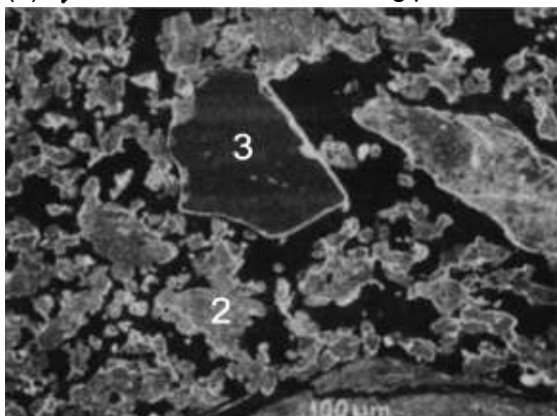
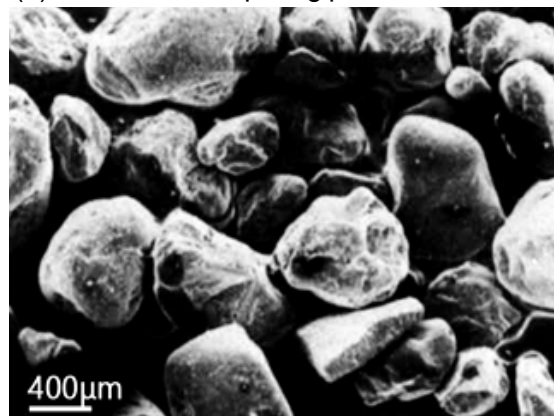
În cazul construcțiilor de zidărie a egiptenilor, pe lângă primele forme de materiale compozite, ne întâlnim și cu sistemul bine cunoscut și folosit până în prezent, adică cu legarea blocurilor și plăcilor de piatră cu mortar. Bineînțeles, acest material de construcție a evoluat pe parcursul timpului, prima dată în funcție de liantul folosit, mai apoi în funcție de adaosurile și aditivii utilizați în compoziție. În timp ce mortarul tipic egiptean a fost descris în general de scriitori ca un material cu conținut de var ars, examinarea chimică a demonstrat că egiptenii nu au folosit niciodată var, până în perioada romană și că materialul de „cimentare” (liantul) a fost întotdeauna obținută prin arderea ghipsului. După cum ghipsul a fost exploatat într-o stare foarte impură, conținea de obicei carbonat de calciu, care s-a descompus în procesul de ardere, sau

se regăsea într-o stare nedescompusă, dădea impresia că ar fi fost folosit var în compoziția mortarului. Ghipsul a fost foarte bine ars, astfel încât s-a obținut un amestec de minerali nemodificați cu ipsos ars. În prezent este considerat că prin încălzirea/arderea ghipsului peste 300 °C, anhidritul solubil se transformă într-un anhidrit insolubil, denumit ipsos ars.

În conformitate cu lucrarea publicată de A. Lucas [84], motivul utilizării ghipsului în loc de var, deși calcarul a fost mai răspândit și mai accesibil decât ghipsul, a fost lipsa combustibilului. Varul necesită o temperatură mult mai mare, prin urmare, mai mult combustibil pentru calcinare (calcarul prin calcinare, la temperaturi ridicate, se formează piatra de var folosită în construcții). Deja în anul 1986 H.Y. Ghorab a analizat probe de mortar de la Sfinx și piramidele de la Gizeh prin difracția cu raze X, rezultatele fiind publicate în lucrarea [49]. Mineralele identificate au fost ghipsul, anhidritul, calcitul și silice (ghipsul a fost predominant în Sfinx). În Figura 2.24 este prezentată analiza mortarelor istorice folosind difracția cu raze X și analiza prin microscopie electronică. Probele au fost prelevate de la trei piramide diferite, prezentate în lucrarea [116].

Figura 2.24 – Analiza mortarelor istorice prin difracție cu raze X (a) și microscopia electronică; 1 – matrice argiloasă; 2 – ghips; 3 – cuarț; 4 – pori; (a) Analiza compoziției mortarului de la piramida Meidum; (b) Imagine SEM, proba E₁ – Meidum, Egipt; (c) Imagine SEM, proba E₂ – Meidum, Egipt; (d) mortar de la piramida Unas, Saqqara, lângă Cairo, Egipt; (e) granule de nisip cu formă eoliană în mortarul de la Piramida Cheops.



(b) \otimes 1 000 x; proba E₁ - Meidum(c) \otimes 50 x; proba E₂ - Meidum(d) \otimes 100 x; Piramida Unas, Egipt;(e) \otimes 20 x; Cheops, Egipt.

Cu toate că egiptenii nu au fost familiarizați cu utilizarea varului, a fost folosit într-o perioadă foarte timpurie de greci și preluată de romani. Mortarul a fost preparat prin amestecarea varului stins cu nisip, iar eficiența este dovedită de cărămizile romane care încă există și dovedește perfecțiunea pe care arta a atins-o în cele mai vechi timpuri. Duritatea remarcabilă a mortarului folosit în pereții construiți de către romani a nedumerit mulți ingineri și a condus uneori la presupunerea că a existat un secret în ceea ce privește compoziția acestuia. Analizele mortarelor antice nu confirmă această presupunere. În cele din urmă, Rondelet¹, după o examinare atentă a clădirilor romane și după realizarea de mai multe experimente privind stingerea varului, a ajuns la concluzia că excelența mortarelor romane depindea, nu de compoziția, ci de amestecarea și îndesarea serioasă și riguroasă a materialului.

Compoziția și calitatea mortarului folosit în construcțiile romanilor s-a stabilit și a continuat în toate privințele până în Evul Mediu. După secolul XIV a fost descoperit

¹ Jean-Baptiste Rondelet (1743 - 1829) arhitect (arhitect-șef la construirea Panthéon, Paris)

un mortar excelent și o precauție evidentă a fost oferită spălării nisipului fără a rămâne murdărie, noroi sau argilă. Descoperirea prin care cimentul hidraulic poate fi obținut prin arderea pietrelor de var argilos (calcinare) a fost în anul 1796. Produsul astfel obținut a căpătat un nume nepotrivit, chiar greșit, și anume ciment roman, din cauza proprietăților sale hidraulice, neexistând nici o asemănare cu mortarul roman. Cimentul roman s-a răspândit repede și s-a dovedit eficient în cazul lucrărilor de construcții, chiar și în contact cu apă. Gloria sa în domeniul construcțiilor a dăinuit până în 1850, după care treptat a fost înlăturat de cimentul Portland care a devenit cel mai utilizat ciment în toate ramurile construcțiilor: civile, industriale, agricole, hidrotehnice și rutiere.

Pe parcursul evoluției sale, realizarea betonului sau mortarului armat dispers a presupus în principal utilizarea cimentului Portland. Cu toate acestea, cimentul aluminos, ghipsul și o varietate mare de ciment special a fost, de asemenea, utilizat pentru producerea compozitelor armate cu fibre. Cercetările recente includ matricele speciale de mortar sau beton cu distribuția controlată ale fibrelor (fibre aliniate).

În momentul de față îmbunătățirea mortarelor obișnuite se face folosind polimeri (mortare de ciment cu polimeri, mortare fără ciment cu polimeri, mortare impregnate și polimerizate) cu sau fără armătură sub formă de fibre, cu sau fără aditivi. Multe tipuri de fibre sintetice, cum ar fi de poliacetat de vinil (PAV), polipropilena (PP), polietilena, oțelul etc. au fost, de asemenea, utilizate pentru armare. Cercetarea și dezvoltarea betoanelor și mortarelor noi, armate cu fibre se desfășoară și astăzi. Cercetări noi din Europa se orientează spre obținerea unor noi materiale biodegradabile și biocompatibile care constituie o cerință pentru următorii ani pe piața materialelor în toate ramurile industriei.

2.4.2. Particularitățile mortarelor pe bază de ciment armat dispers cu fibre

Compozitele cu matrice cimentoase armate dispers sunt materiale de construcții care conțin fibre discrete scurte, care sunt distribuite mai mult sau mai puțin uniform și orientate aleatoriu într-o matrice pe bază de ciment. Proprietățile și caracteristicile compozitului astfel rezultat este influențată de compoziția matricei (tipul de ciment, cantitatea de apă, agregat etc.) și de natura și tipul fibrelor, geometria, distribuția și dispersia acestora.

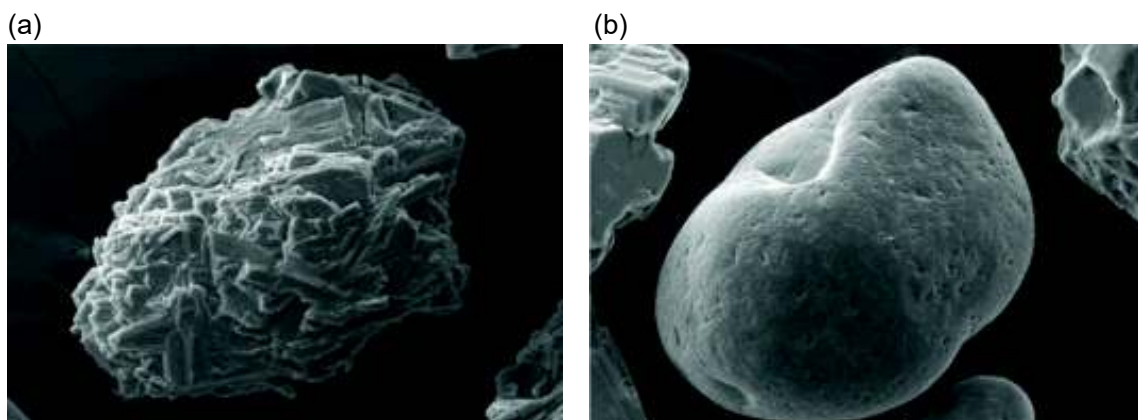
2.4.2.1. Influența componentelor matricei asupra proprietăților compozitului

➤ **Agregatul** – constituie scheletul rigid al compozitului, care reduce deformațiile și contracția din uscare a pietrei de ciment. Prin natura, structura (compactitatea), granulozitate, forma și suprafața (aderența și ancorarea fizică și chimică), respectiv rezistențele mecanice, agregatele influențează proprietățile compozitului atât în stare proaspătă, cât și întărită.

Dimensiunea maximă a agregatului pentru toate tipurile de materiale cimentoase armate dispers cu fibre, inclusiv și beton, este limitată la maxim 10 mm, pentru a evita reducerea semnificativă a rezistenței compozitului. Peste această valoare a diametrului apar probleme în ceea ce privește aderența fibră-matrice. În cazul mortarelor, această cerință este satisfăcută și nu apar alte restricții privind dimensiunea particulelor de nisip. Se știe însă, că natura și forma particulelor de nisip influențează în mod semnificativ proprietățile mortarelor tradiționale fiind componentul cantitativ preponderent în compoziția acestora. Împreună cu fibre ajută la reducerea contracției, oferind și control asupra fisurilor.

Proveniența și natura nisipurilor utilizate la prepararea mortarelor poate fi naturală (de carieră, de râu, de lacuri, de mare, de dune) sau artificială (obținute prin spargere, concasare). Influența naturii și provenienței, astfel și a formei granulelor de nisip, în special al agregatelor artificiale, a fost prezentat în [76], conform lucrării, forma granulelor de nisip artificial și natural este prezentată în Figura 2.25.

Figura 2.25 – Forma particulelor de nisip; (a) artificial; (b) natural.



Suprafața neregulată (specifice agregatelor artificiale), conduce la aderența sporită între pasta de ciment-agregat, dar este necesară studierea formei granulelor

(forme aciculare) și corectarea cu nisip de carieră dacă nu este corespunzătoare. Forma acestora influențează volumul golurilor formate în amestec. Astfel, formele neregulate și alungite de exemplu, formează volum mai mare de goluri, care are ca și consecință scăderea durabilității materialului. Formele rotunjite ale agregatele naturale permit o lucrabilitate adecvată la o cantitate de apă mai redusă în comparație cu agregatele artificiale, care necesită apă suplimentară din cauza formelor mai ascuțite. În cazul armării cu fibre scurte trebuie avut în vedere că o creștere a dimensiunii și a cantității de agregat intensifică dificultățile de dispersie și tendința de aglomerare a fibrelor.

Agregatele utilizate pentru prepararea materialelor de construcții trebuie să respecte condițiile de calitate, caracteristicile petrografice și să fie conform standardul european SR EN 13139 Agregate pentru mortar [180], completat de seria standardelor SR EN 932 și 933 [186][187][189][190][191][192].

Condițiile de calitate se referă la prezența impurităților care influențează negativ procesele fizico-chimice care au loc în stare proaspătă și întărită, la impurități precum argila (reduce rezistențele mecanice - limita admisibilă max. 0.5%), humus (influențează procesul de priză și aderența pasta de ciment-agregat), conținutul de părți levigabile (părțile fine, praf – 1-3%), conținutul de săruri solubile (sub 2% nu au efecte negative). Nu sunt admisibile însă impuritățile precum uleiurile sau alte materiale care reduc aderențe între agregat-liant, sulfați, sulfuri, etc.

S-a constatat în numeroase experimente și studii efectuate că o creștere a cantității de părți fine determină necesitatea măririi cantității de apă la aceeași consistență. Astfel, rezultă un mortar cu dozaj de ciment redus (raportul apă/liant crește) și materialul astfel rezultat se caracterizează printr-o porozitate mai ridicată și rezistențe mecanice scăzute. În cazul unor lucrări speciale, când dimensiunea granulelor de agregat trebuie să fie foarte mică, se folosește ca agregat nisip fin cu granule ce nu depășesc 0.60 mm, cuarț măcinat, silice ultrafină sau combinația acestora. În cazul silicelor ultrafine această dimensiune se poate reduce sub 0.60 mm, dar este necesară folosirea aditivilor pentru evitarea problemelor menționate anterior.

În consecință, părțile levigabile pot avea influențe negative asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale mortarelor și trebuie respectate valorile maxime admisibile în normativ. Spălarea agregatelor cu conținut ridicat de părți levigabile este

o operație obligatorie. În caz contrar, pentru obținerea aceleiași clase, dozajului de ciment trebuie mărit (importanța stabilită și în § 2.4.1).

➤ **Cimentul** – proprietățile matricei și inclusiv a compozitului, depind în mare măsură de calitatea cimentului, care este influențat de clasa (rezistența la compresiune), compoziția sa mineralogică, măcinarea, respectiv de adaosurile folosite în compoziție. Liantul are rolul de a asigura aderența între fazele constituente și astfel influențează comportarea și proprietățile compozitului, proporțional cu cantitatea adăugată. Aderența bună între fibre-matrice asigură comportarea optimă a materialului la eforturi exterioare, în cazul apariției fisurilor, deformații și nu numai. Privind compozitul pe o scară mai largă, pasta de ciment poate fi, de asemenea, considerată ca matrice, care leagă și asigură aderența atât între fibre, cât și particulele de nisip, agregat. Totodată, în cazul stabilirii rețetelor și conceperea materialelor compozite pe bază de ciment trebuie avut în vedere că rezistențele mecanice cresc până la o anumită valoare, dar un dozaj prea mare poate avea efect negativ asupra rezistenței la întindere datorită contracțiilor și micro-fisurilor (reacții de hidratare-hidroliză) care apar la interfața matrice – ranforsant. La prepararea mortarelor armate dispers se utilizează cu precădere cimentul Portland.

Cimentul Portland este un liant hidraulic clincherizat, obținut prin măcinarea fină a clincherului de ciment, în adaos cu ghips pentru reglarea timpului de priză. Pentru fabricarea acestuia se folosește un amestec de 75-77% calcar, restul fiind format din argilă (23-25%) și eventuale adaosuri de corecție, când se urmărește obținerea unui ciment cu o anumită compoziție mineralogică. Ca adaosuri se utilizează adaosuri silicioase (diatomit), aluminoase (bauxită) și feruginoase (cenușă de pirită). Cimentul Portland este cel mai utilizat ciment în toate ramurile construcțiilor: civile, industriale, agricole, hidrotehnice și rutiere. Rolul adaosurilor este ca, pe de o parte, să reducă prețul de cost al cimentului, iar pe de altă parte, să modifice unele proprietăți ale acestuia. Astfel, cu cât cantitatea este mai mare, scade viteza de întărire și căldura de hidratare, dar se îmbunătățește impermeabilitatea pietrei de ciment și implicit rezistența la atacul chimic.

În cazul mortarelor armate dispers se folosesc toate tipurile de ciment Portland uzuale, prevăzute în SR EN 197-1:2011 [184] sau cimenturi speciale prevăzute în SR EN 14216:2015 [181] și SR 7055:1996 [168]. Definiția și compoziția cimenturilor pentru

zidărie uzuale în vederea producerii mortarelor pentru zidărie și pentru tencuire (condiții fizice, mecanice, chimice, clasele de rezistență) sunt enumerate în SR EN 413-1:2011 [185].

Schimbarea tipului de ciment în compoziția mortarelor determină mici modificări în ceea ce privește lucrabilitatea, culoarea sau modul de dezvoltare a rezistenței. Utilizarea cimentului cu agenți antrenori de aer sau utilizarea de var în compoziția mortarului, de obicei determină necesitatea folosirii unei cantități reduse de apă, presupune creșterea lucrabilității și creșterea rezistenței la îngheț-dezghet, dar presupune în același timp scăderea aderenței.

➤ **Apa** – asigură atât hidratarea-hidroliza liantului, cât și lucrabilitatea mortarului proaspăt, iar prin calitate, respectiv cantitate are o influență semnificativă asupra microstructurii matricei compozitului.

Matricele avansate pe bază de ciment sunt caracterizate printr-o microstructură extrem de rafinată și o porozitate foarte scăzută, având un raport apă/liant foarte mic. Valoarea acestuia se situează chiar sub 0.3, ținând cont de faptul că în mod obișnuit hidratarea completă a cimentului are loc la valoarea minimă de 0.2. O valoare sub limita necesară hidratării, pe lângă lucrabilitatea inadecvată, determină scăderea rezistenței materialului. În cazul mortarelor convenționale armate cu fibre, acest raport este de regulă 0.40 – 0.50. Aderența armătură-matrice nu mai este la fel de bună o dată cu creșterea cantității de apă adăugată, iar mărirea aderenței în acest caz se realizează prin ancorarea fibrelor folosind metode mecanice, adică utilizând forme și geometrii complexe pentru fibre care măresc interacțiunea matrice-armătură. Prin urmare, se recomandă utilizarea cantității minime de apă prin care se poate obține consistența necesară utilizării mortarului în funcție de metoda și domeniul de aplicare.

Având în vedere că prin adăugarea fibrelor mortarul devine mai consistent, pentru atingerea fluidității necesare aplicării, se folosesc adaosuri pentru reducerea vâscozității și nu se mărește cantitatea de apă.

Reglementările privind calitatea apei sunt prezentate în standardul SR EN 1008:2003 (Apa de preparare pentru beton. Specificații pentru prelevare, încercare și evaluare a aptitudinii de utilizare a apei, inclusiv a apelor recuperate din procese ale industriei de beton, ca apă de preparare pentru beton). Standardul stabilește condițiile

pentru o apă corespunzătoare producerii betonului sau mortarului și descrie metode pentru evaluarea aptitudinii de utilizare a acesteia. Se poate utiliza apă potabilă sau nepotabilă (lac, râu, apă de mare etc.) dacă conținutul satisface cerințele prescrise în normativ, având în vedere că apa prin calitate și conținutul de impurități influențează durabilitatea materialului. Astfel, conform [169], aceasta trebuie să fie curată, nepoluată, lipsită de impurități sau corpuri străine, limpede și fără miros (de exemplu: sulfat $> 2\ 000\ \text{mg/l}$, săruri $> 2\ 000\ \text{mg/l}$). Conținutul de săruri provoacă ruginirea metalelor sau armăturilor în contact cu mortarul într-un mediu care favorizează acest lucru, iar impuritățile în apă pot împiedica de exemplu priza sau întărirea liantului (ciment).

➤ **Aditivi și adaosuri**, alte decât fibrele. Sunt utilizate pentru a modifica în sens favorabil proprietățile și caracteristicile mortarelor. Adaosurile pentru prepararea mortarelor sau în general pentru prepararea materialelor de construcții cimentoase includ diverse grupe de subproduse industriale, produse create special pentru a servi ca și catalizatori, acceleratori de întărire, diverse umpluturi de materiale inerte, inhibitori, antioxidanți, substanțe protectoare contra radiațiilor UV, ignifuganți, pigmenți anorganici, agenți de decofrare.

Seria standardului SR EN 934: Aditivi pentru beton, mortar și pastă (pastă de ciment) tratează cerințele tuturor tipurilor de aditivi. Conform standardului [193] aditivii pentru mortar sunt clasificați în 11 tipuri, dintre care 8 au eficacitate simplă iar 3 au eficacitate dublă: reductor de apă (plastifiant sau superplastifiant), stabilizator, aditiv antrenor de aer, accelerator de priză, accelerator de întărire, întârziator, aditivi impermeabilizanți, întârziator – reductor de apă (plastifiant), întârziator – puternic reductor de apă (superplastifiant), accelerator de priză – reductor de apă (plastifiant).

Aditivii moderni cunoscuți în literatura tehnică de specialitate sub denumirea generică de superplastifianți, reprezintă noi tipuri de aditivi produși de industria chimică, care se utilizează în proporție de 0.1-1.0% substanță activă din cantitatea de ciment.

Pe lângă respectarea cerințelor Standardelor în vigoare, în cazul aditivilor sau adaosurilor trebuie avut în vedere să nu conțină substanțe care conduc la coroziunea armăturilor, de exemplu cloruri, atunci când mortarul urmează să fie armat cu fibre de

oțel sau urmează să fie folosit ca mortar de reparații la structuri de rezistență cu bare și etrieri de oțel.

2.4.2.2. Rigiditatea relativă fibră-matrice

Așa cum a fost prezentat în subcapitolele anterioare, de regulă modulul de elasticitate al matricei trebuie să fie mai mic decât cel al fibrei pentru mărirea rigidității compozitului și un transfer eficient de tensiuni de la matrice la fibre. Modulul de elasticitate relativ scăzut al fibrelor, precum nailon sau polipropilenă, determină, prin urmare, o modificare ușoară a rezistențelor mecanice, dar ajută la absorbția de energie și fisurare.

Fibrele cu modul de elasticitate mai mare, precum oțelul, sticla și carbonul, conferă rezistență sporită și rigiditate compozitului. Așadar, la fel ca și la celelalte compozite, rigiditatea componentelor și rigiditatea relativă matrice-fibră influențează în mod semnificativ caracteristicile mortarului armat dispers, respectiv determină domeniul de utilizare a materialului compozit astfel rezultat.

2.4.2.3. Geometria și influența caracteristicilor fizice ale fibrelor

➤ **Raportul geometric sau de aspect**, reprezintă raportul între lungimea fibrei l_d și diametrul d_f a acestuia. În cazul fibrelor cu o secțiune transversală non-circulară se utilizează un diametru echivalent pentru calculul raportului geometric. Gradul de lucrabilitate la fel ca și compactitatea materialului scade cu creșterea acestui raport, așa cum arată și Figura 2.29 (b) conform [35]. În practică este foarte dificilă realizarea amestecării uniforme dacă raportul geometric este mai mare de ~100. Se poate considera că o lungime prea mare provoacă formarea unor gheme (aglomerări sau concentrări de fibre) și astfel este redusă performanța materialului.

Totodată, în cazul fibrele lungi cu un diametru mic (aspect geometric mare) aderența între matrice și armătură este mai mare și, astfel, teoretic proprietățile mecanice a compozitului pot fi îmbunătățite. Datorită dificultății în ceea ce privește lucrabilitatea și datorită consecințelor produse de aceasta, în realitate fibrele prea lungi influențează în mod negativ performanțele mecanice ale materialelor compozite.

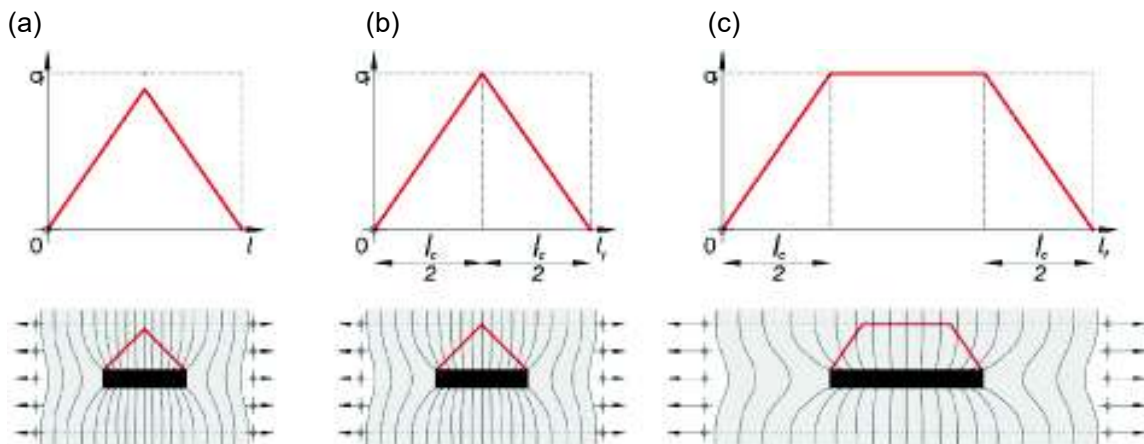
➤ **Lungimea minimă a fibrelor.** S-a specificat că o lungimea prea mare influențează în mod negativ performanța mortarului armat. Totodată, o lungime prea mică are o influență la fel de negativă asupra comportamentului materialului. Prima condiție cu privire la lungimea minimă a fibrelor în cazul armării materialelor, precum mortar sau beton, este ca lungimea fibrelor să fie mai mare decât dimensiunea maximă a agregatelor din matrice.

În mod general, ca fibrele să îndeplinească rolul în compozit, trebuie să aibă o lungime suficient de mare, în așa fel încât să preia eforturile transmise de matrice. Așadar, se definește o lungime critică, care este lungimea minimă necesară ca fibra să fie capabilă să preia eforturile transmise. Lungimea critică depinde de diametrul fibrei d_f și de rezistența la întindere σ_f^* a acestuia (tensiunea maximă care poate fi aplicată fibrei), precum și de aderența/efortul de forfecare la interfață matrice-fibră (rezistența la smulgere matrice-fibră τ_c) în conformitate cu ecuația (2.2).

$$l_c = \frac{\sigma_f^* \cdot d}{2\tau_c} \quad (2.2)$$

Pe baza figurii (Figura 2.26), se poate constata că fibra lucrează eficient dacă lungimea acestuia depășește l_c .

Figura 2.26 – Distribuția efortului de întindere în fibră când lungimea este (a) mai mică decât l_c ; (b) egală cu l_c ; (c) mai mare decât l_c .



➤ **Forma fibrelor.** Fibrele trebuie să se ancoreze în masa mortarului, astfel încât la întinderea compozitului să intre în lucru concomitent cu matricea. În cazul fibrelor mono-filament, având suprafață netedă, aderența și ancorarea este mult inferioară

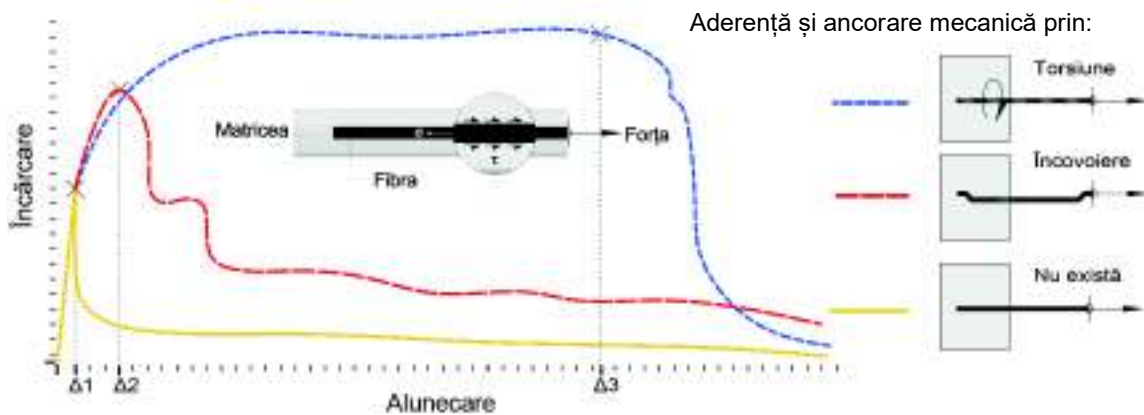
celui fibrilat datorită distribuției eforturilor de-a lungul fibrei (Figura 2.27). Obținerea aderenței adecvate a fibrelor mono-filament și suprafață netedă se realizează prin ancorare mecanică indusă de deformări pe suprafața fibrei sau prin geometrie complexă.

Figura 2.27 – Fibre de armare mono-filament și fibrilate. Distribuția eforturilor de-a lungul fibrelor.



O varietate diversificată de forme și geometrii se poate vedea în cazul fibrelor de oțel (Figura 2.28) [125], aceasta având în mod obișnuit o aderență slabă la matrice precum mortarul [137] (prezentată în secțiunea § 2.4.2.8.).

Figura 2.28 – Influența geometriei fibrelor de oțel asupra aderenței la matrice evidențiat prin testul „pull-out”. Ancorare mecanică și aderență sporită datorită formei răsucită (curbă albastră) și capetelor îndoite (curbă roșie).



Transferul de tensiuni între fascicule (filamente interioare) în cazul armăturilor fibrilate pot să apară prin frecare în punctele de contact (Figura 2.27), care în cazul matricelor cimentoase iau naștere prin formarea produselor de hidratare. În cazul fibrelor multi-filamente, dimensiunile spațiilor dintre fascicule nu depășesc câteva μm și, prin urmare, este dificil ca granulele de ciment mai mari ($20 \mu\text{m}$) să pătrundă în aceste spații. Acest lucru este valabil, în special, în cazul fibrelor de sticlă, care au o afinitate mult mai scăzută la pasta de ciment decât azbestul. Microstructura rezultată după câteva săptămâni de hidratare este caracterizată de spații libere între filamentele sau formarea limitată a produselor de hidratare în unele zone dintre acestea. Ca

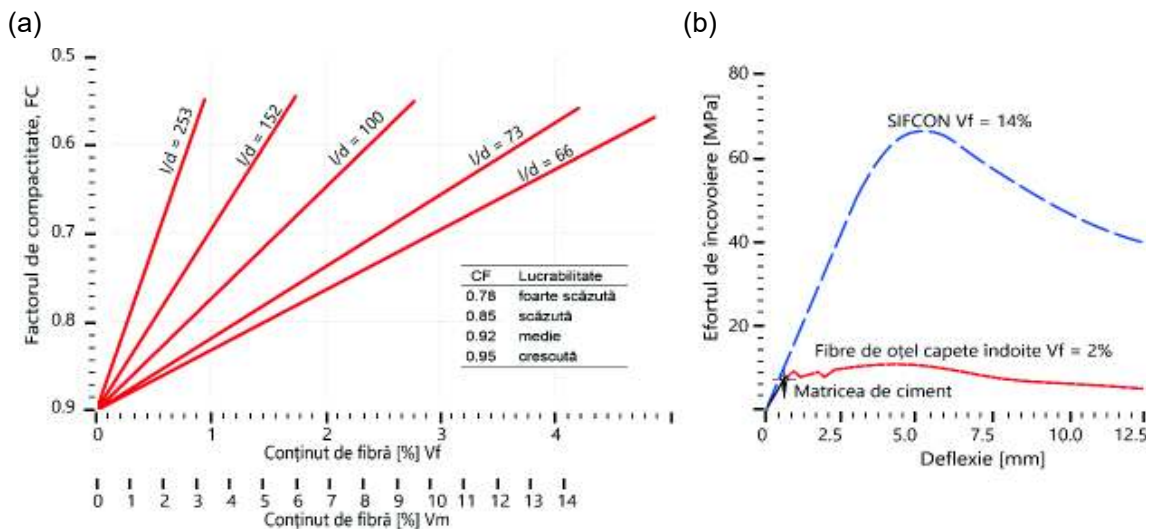
urmare, fascicolul de armare rămâne ca o unitate flexibilă chiar după 28 de zile de întărire, fiecare filament având o libertate considerabilă de mișcare unu față de celălalt. Spațiile dintre filamente pot fi umplute treptat cu produse de hidratare dacă compozitul este păstrat într-un mediu umed.

2.4.2.4. Morfologia și structura mortarelor armate cu fibre

➤ **Adaosul de fibre.** Lucrabilitatea și îmbunătățirea proprietăților materialelor armate cu fibre, în general, sau a mortarelor armate dispers cu fibre în particular, depinde în mare măsură de cantitatea de fibră utilizată. Adaosul de fibre este exprimată printr-un procent, numit fracția volumică V_f când ne raportăm la volumul total al compozitului (mortar și fibre) sau fracție masică V_m , raportat la masa totală.

În vederea îmbunătățirii proprietăților mortarelor tradiționale, de regulă, este necesară o cantitate minimă de 1 kg/m^3 . Asta înseamnă aproximativ 0.04% din greutatea sau 0.11% din volumul total. Astfel, fracția volumică în mod obișnuit variază între 0.1 și 3%, deși în cazul materialelor cimentoase speciale, această valoare poate depăși chiar 12% („beton” SIFCON, Slurry Infiltrated Fiber Concrete, armat cu fibre de oțel [30]). Efectul adaosului de fibră de oțel și fracției volumice mare este prezentată în Figura 2.29 (b) conform [30].

Figura 2.29 – Efectul conținutului de fibră asupra comportării și caracteristicile matricei cimentoasă; (a) Influența conținutului de fibră și a raportului l_f/d_f asupra lucrabilității compozitului; (b) Influența fibrelor de oțel asupra rezistenței la încovoiere.



Deși în cazul SIFCON eficiența și rezistența mecanică crește odată cu conținutul de fibre, acest lucru nu este valabil în cazul oricărui fibră și poate reduce semnificativ lucrabilitatea și astfel aplicabilitatea compozitului. De asemenea, un conținut prea mare (critic) conduce la scăderea în ceea ce privește compactitatea materialului și are influență negativă asupra proprietăților mortarului, Figura 2.29 (a).

➤ **Distribuția și orientarea fibrelor.** Aranjamentul sau orientarea fibrelor unele față de celelalte, concentrația și distribuția acestora are o influență semnificativă asupra rezistenței și a altor proprietăți ale mortarelor armate cu fibre. Având în vedere rolul fibrelor discontinue în acestea, orientarea fibrelor este importantă în cazul apariției fisurilor, mai exact orientarea fibrelor față de planul fisurilor. Astfel, influența și efectul transmiterii eforturilor prin fisuri sunt maxime dacă fibrele sunt perpendiculare pe fisuri, iar efectul este nul dacă sunt paralele cu acestea.

Eficiența armării disperse și a orientării aleatorii a fibrelor este inferioară armării cu fibre aliniat, dar caracteristicile mecanice astfel rezultate la scară microscopică sunt cvasi-izotrope, caracteristică care în anumite cazuri poate fi și un avantaj. Astfel, contribuția fibrelor scurte dispersate aleatoriu la proprietățile mecanice ale compozitului este mai mică decât cea a fibrelor lungi orientate paralel cu sarcina la care sunt supuse. Deși avantajul armării nu constă doar în creșterea rezistențelor mecanice, eficiența este adesea evaluată pe baza acestuia. În multe aplicații ingineresti, eficiența armării cu fibre este exprimată printr-un factor de eficiență, care este o valoare cuprinsă între 0 și 1. În cazul compozitelor armate dispers exprimă raportul dintre efectul fibrelor orientate aleatoriu și efectul așteptat de la armarea cu fibre continue aliniat paralel cu sarcina. Astfel, factorul de eficiență este 1 în cazul în care armăturile sunt aliniat după direcția solicitării (utilizare rațională), și este 1/5 [64] în cazul orientării aleatoriu 3D. Dacă vrem să exprimăm în procente, reprezintă eficiență 100 % în cazul orientării în direcția solicitării și 20 % în cazul orientării haotică în spațiu.

Trebuie menționat că, deși eficiența este considerată mai scăzută, costurile de fabricație, în general, pentru orice material compozit armat cu fibre discontinue și orientate aleatoriu sunt considerabil mai mici față de cele continue și aliniat.

➤ **Intervalul dintre fibre.** Rezistența mortarului armat cu fibre, în stadiul de apariție a primei fisuri poate fi apreciată cu ajutorul conceptului de interval dintre fibre, definit ca distanța dintre centrele de greutate ale fibrelor [91].

Conceptul a fost introdus în anii 1960 și se bazează pe rezultatele teoretice și experimentale obținute de profesorul J. P. Romualdi și colegii pe betoane armate cu fibre de oțel. Cercetarea efectuată a fost de mare amploare și au capturat interesul atât al industriei construcțiilor, cât și al cadrelor universitare în multe părți ale lumii. Cercetările efectuate în această perioadă, folosind fibre de oțel în compoziția betoanelor marchează începutul disciplinei [34][35].

Pe lângă alte caracteristici deja bine cunoscute, precum absorbția de energie în cazul solicitărilor repetate sau diminuarea exfolierii betonului la temperaturi ridicate, au demonstrat că rezistența la întindere în momentul apariției primei fisuri, pentru un anumit volum de fibre este invers proporțională cu intervalul geometric dintre fibre. Mai exact, au demonstrat că dacă în interiorul betonului distanța medie a fibrelor este mai mică de 8 mm, atunci compozitul rezultat va avea o rezistență la întindere de cel puțin 6.90 MPa, iar aceasta va crește în continuare invers proporțional cu distanța.

În cazul fibrelor orientate în direcția efortului de întindere în lucrările publicate de Romualdi s-a stabilit că intervalul dintre fibre (s) este egal cu $13.8 \cdot d_f / p$, unde d_f reprezintă diametrul fibrei, iar p este procentul volumic de armare. În cazul fibrelor orientate aliniat, intervalul poate fi ușor de definit, dar pentru orientarea aleatorie (haotică) problema este mai complexă și mai complicată.

2.4.2.5. Aderența și interfața mortar-fibră

Eficacitatea fibrelor în îmbunătățirea performanței mortarelor, ca și în orice compozit, depinde în mare măsură de interacțiunile dintre matrice-fibră. Trei tipuri de interacțiuni sunt deosebit de importante: aderența fizică și chimică între faze, forța de frecare care ia naștere între acestea și ancorarea mecanică indusă de deformări pe suprafața fibrei sau prin geometrie complexă.

Aderența și forța de frecare dintre mortarul pe bază de ciment și fibre este relativ slabă. Acest lucru se datorează faptului că materialele compozite de acest tip sunt caracterizate de o zonă de interfață, numit și zona de tranziție (ITZ) în vecinătatea

elementelor înglobate (agregat sau armătură), în care microstructura matricei este considerabil diferit de cea globală.

Multe aspecte privind comportarea acestor materiale pot fi explicate prin studierea interfeței matrice-elemente înglobate (ranforsant), motiv pentru care aceasta este tratată de cele mai multe ori ca și o fază distinctă. În majoritatea cazurilor, structura ITZ nu este stabilă, proprietățile acestuia chiar se pot schimba considerabil în timp, în funcție de condițiile de mediu, temperatura sau umiditatea. Microstructura zonei de tranziție în compozitele cimentoase este strâns legată de particulele de ciment care nu sunt capabile să înglobeze particulele relativ mari de agregat sau fibră – conduce la formarea unui film de apă în jurul particulelor de nisip [108]. În consecință, în vecinătatea elementelor înglobate, matricea este mult mai poroasă decât în afară zonei de tranziție (filmul de apă determină ca produsele de hidratare să se cristalizeze sub forme mai mari care conduc la creșterea porozității). Această zonă de tranziție, așa cum a fost arătat în secțiunea § 2.3.3, prezintă o evoluție gradată în ceea ce privește proprietățile și are o grosime de $\sim 10^{-8}$ m în cazul pastă de ciment – particule de agregat, care crește odată cu raportul apă/ciment și scade în timp datorită proceselor de hidratare și hidroliză.

Pe lângă dimensiune, avansarea hidratării influențează rezistența și modifică caracteristicile zonei de tranziție. Prin reacțiile chimice lente care au loc între pasta de ciment – elemente înglobate (particule de agregat și/sau fibre) se produce formarea unor cristale noi în golurile prezente în structura ITZ. Astfel, aceste elemente prin reacțiile chimice determină caracteristicile produselor noi, respectiv capacitatea de adeziune între matrice – ranforsant.

În vedere obținerii unor proprietăți adecvate și aderență crescută în cazul mortarelor armate cu fibre se utilizează următoarele tehnici:

- modificarea geometriei fibrelor, pentru creșterea aderenței evitând lungimile mari (de exemplu fibre cu cârlig la capete, fibre deformate sau fibrilate);
- tratarea chimică a suprafeței fibrelor pentru a-și îmbunătăți aderența și dispersia în matrice;
- modificarea proprietăților reologice ale matricei, prin utilizarea aditivilor (în principal reductori de apă), precum și optimizarea distribuției și mărimii particulelor de agregat;

- folosirea unor tehnici speciale pentru asigurarea unui volum mai mare de fibre dispersat adecvat în amestec.

Forța de aderență este, în mod general, determinată utilizând testul „pull-out” în care se măsoară forța necesară pentru desprinderea și scoaterea unei fibre din matrice. Deși valoarea efortului de aderență depinde de mulți factori, așa cum a fost prezentat, câteva valori caracteristice în ceea ce privește rezistența la smulgere a fibrelor înglobate în matrice cimentoasă sunt date în Tabelul 2.22, pe baza lucrării [11][26][65]. Efectuare testului și analiza prin microscopie electronică după smulgerea fibrei din matricea de ciment este prezentat în Figura 2.30 conform lucrării [26].

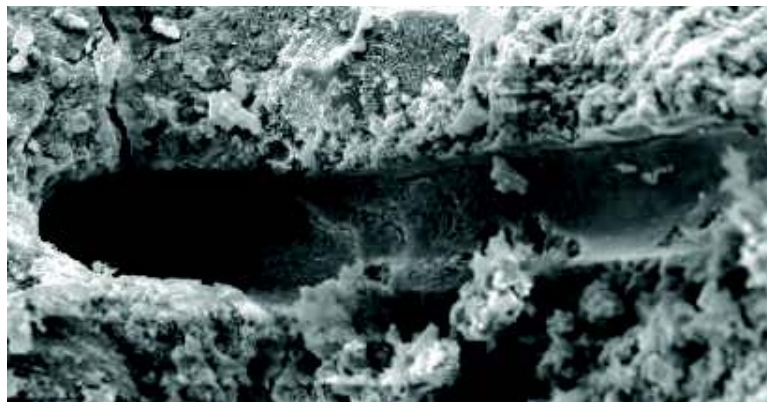
Tabelul 2.22 – Rezistența la smulgere matrice cimentoasă – fibră.

Fibră	Rezistență la smulgere τ [MPa]		
	Pasta de ciment	Mortar	Beton
Oțel	6.40	5.40	3.90
Carbon	0.80-2.50	0.80-2.50	-
Polipropilenă	0.70-1.20	0.70-1.00	0.40-1.00
Sticlă A*	> 10	6.40-10	-

* valoarea depinde de regimul de conservare (apă).

Figura 2.30 – Testul „pull-out”; (a) Matricea cimentoasă și suprafața interfeței după smulgerea fibrei; (b) Efectuarea testului și mașina de încercare.

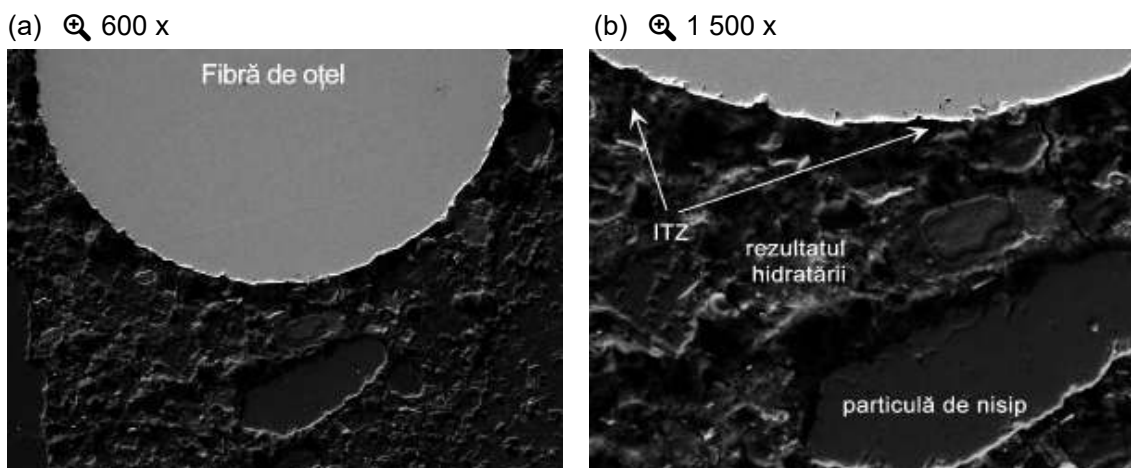
(a)  500 x



(b)



În cazul fibrelor mono-filamente, precum fibrele de oțel drepte (lise), desprinderea și formarea fisurilor are tendința de a avea loc în stratul poros al zonei de tranziție, Figura 2.31 [33].

Figura 2.31 – Fibră de oțel în matricea de mortar și zona de tranziție. Imagine SEM.

Modificarea matricei pe bază de ciment cu polimeri determină o structură de interfață fină, cu o rezistență și aderență mult mai mare. Particulele de polimeri sunt mai mici decât granulele de ciment și se coagulează pentru a forma un strat fin și continuu între constituenți. Utilizarea acrilicilor dispersați în apă și a polimerilor PAV, de exemplu, îmbunătățesc aderența matrice-fibre. Trebuie avut în vedere însă, că anumite combinații, de exemplu polimer latex cu fibre de polipropilenă, nu sunt compatibile din punct de vedere chimic și determină scădere aderenței. Aceasta a fost studiată și determinată experimental în proiectul de cercetare „Studii privind modalitățile de valorificare superioară a șlamului în industria materialelor de construcții”, făcând parte ca membru al „Grupului de Cercetare în Domeniul Materialelor de Construcții” din cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, 2016.

2.4.2.6. Lucrabilitatea mortarelor armate dispers. Proprietățile în stare proaspătă

Ca și în cazul oricărui alt tip de mortar sau beton, cantitatea și proporțiile în care componenții contribuie la alcătuirea mortarului armat dispers sunt stabilite și în funcție de lucrabilitatea pe care trebuie să o aibă materialul. În cazul acestor materiale lucrabilitatea amestecului rezultat este esențială și influențează în mod semnificativ domeniul de utilizare. Bineînțeles, aceasta poate fi controlată, dar este influențată în mare măsură de adaosul de fibră, precum și de tipul sau geometria acestuia. Modul și măsura în care proprietățile fibrelor influențează lucrabilitatea mortarului a fost prezentat detaliat la fiecare secțiune în § 2.4.2.3.

Pe lângă caracteristicile fibrelor, lucrabilitatea este influențată și de componenții matricei de mortar. Creșterea dimensiunii particulelor de nisip și a cantității intensifică dificultățile de lucrabilitate, iar consecința lucrabilității slabe este distribuția neuniformă a fibrelor, adică aglomerarea acestora în matrice. În general, lucrabilitatea și compactarea amestecului sunt îmbunătățite prin utilizarea aditivii reducători de apă (influențează viteza hidratării cimentului și se obține o creștere a tasării) sau, mai rar, prin creșterea raportului apă/ciment (descriș detaliat § 2.4.2.1).

Consistența exprimă capacitatea de deformare a materialului sub acțiunea greutatei proprii sau acțiunea forței exterioare și determină lucrabilitatea [175]. Se evaluează folosind conul etalon, prin măsurarea adâncimii la care aceasta pătrunde în material sau prin metoda răspândirii. Consistența mortarului determină domeniul de utilizare a acestuia (zidărie, tencuială etc.).

Un mortar cu lucrabilitate bună se recunoaște prin faptul că păstrează structura omogenă de la preparare până la întărire. În cazul unui mortar fluid fără aditivi reducători de apă, lucrabilitatea de obicei nu este bună deoarece prezintă o tendința de segregare. Tendința de segregare este proprietatea materialelor compozite de a se separa în materiale componente datorită masei diferite a constituenților. Consecința este împărțirea stratului de mortar în substraturi cu consistențe diferite și implicit cu rezistențe mecanice diferite. [91]

Un mortar este corespunzător domeniului în care va fi folosit numai în măsura în care el va reține în masa lui apa de amestecare exact atâta timp, cât muncitorul va efectua operațiile aferente lucrării.

2.4.2.7. Capacitatea portantă și procesul de fisurare a mortarelor cu fibre

Prezența fibrelor în amestecul cimentos are rolul principal de a reduce apariția fisurilor, atât în perioada inițială (datorită degajării de căldură în procesele de hidratare a cimentului), cât și în timpul exploatării, evitând formarea crăpăturilor pe suprafața și în interiorul elementului. Fibrele adesea reduc și permeabilitatea matricei, și astfel pătrunderea apei scade și se mărește rezistența la cicluri de îngheț-dezghet. De asemenea, unele tipuri de fibre cresc rezistența la impact, abraziune și șoc a matricei.

Răspunsul mecanic al acestui tip de compozit depinde de mai mulți factori, precum proporționalitatea între tensiuni și deformații ale fazelor constituente, procentul de armare (fracția volumică), geometria fibrelor, direcția și orientarea, aderența între constituenți ș.m.d., adică de toți parametrii și factorii prezentați până acum. În consecință, performanța acestora poate diferi semnificativ una față de alta, în funcție de variația acestor parametri. Rezistențele mecanice pot fi deci influențate în mod semnificativ sau nu, dar în mod obișnuit fibrele scurte nu înlocuiesc armarea cu plase sau bare de oțel în cazul elementelor structurale. Pot fi utilizate însă împreună cu acest sistem pentru a reduce cantitatea fierului beton și/sau a secțiunii elementului. De asemenea, contribuie la îmbunătățirea comportamentului la solicitări dinamice, la protejarea structurii de rezistență la foc, acțiunea intemperiilor sau agenților chimici care produc degradarea prematură a materialelor sau elementelor de construcții.

Totodată, sunt anumite caracteristici generale care descriu comportamentul mecanic al acestor tipuri de compozite față de materialul la care ne raportăm (mortar tradițional) și/sau alte materiale compozite, sisteme și materiale tradiționale.

Având în vedere că în caz general, procentul de armare la mortare este scăzut, caracteristicile și comportamentul matricei are influență semnificativă asupra compozitului. Totodată, într-un astfel de compozit bine conceput, odată cu apariția fisurii în matrice, fibrele pot servi două funcții în principal în cazul solicitării de întindere și/sau la încovoiere:

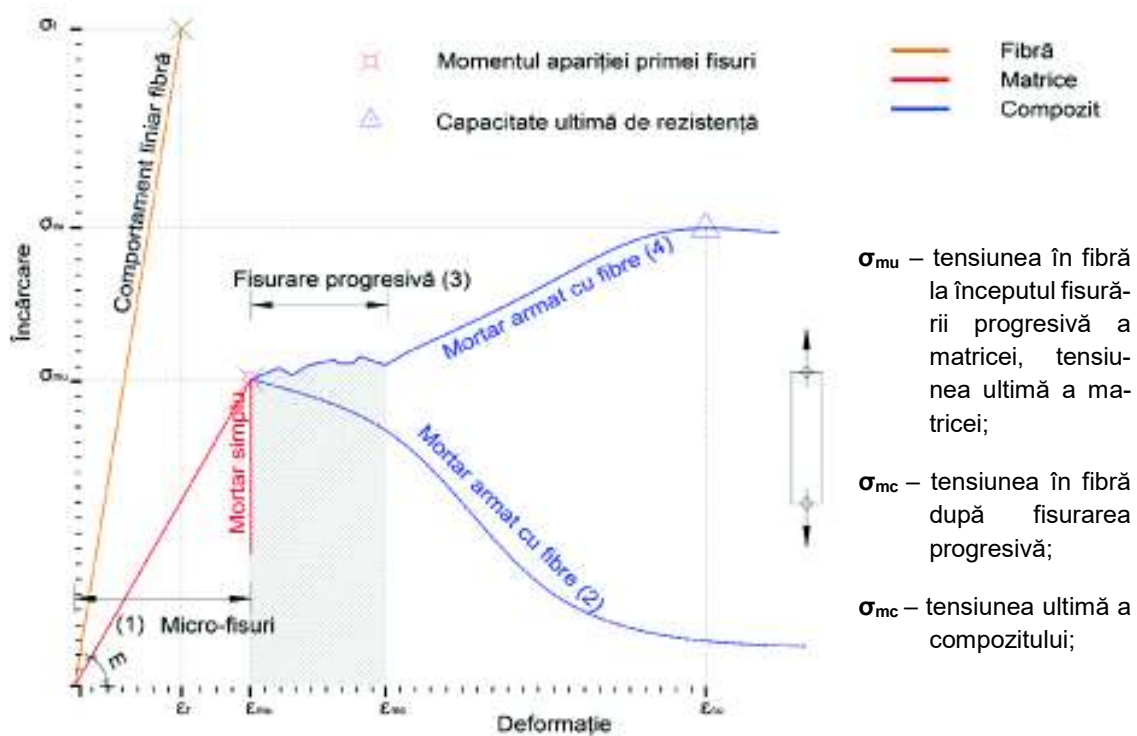
- acestea pot contribui la creșterea rezistenței compozitului față de cea a matricei, asigurând un mijloc de transfer al solicitării și eforturilor prin fisură;
- contribuie și determină creșterea durității compozitului prin asigurarea unor mecanisme de absorbție a energiei, legate de procesele de desprindere și smulgere a fibrelor care închid fisurile.

În mod firesc, pentru descrierea comportamentului mecanic și capacității portante ale mortarelor armate cu fibre discontinue analiza trebuie făcută în funcție de tipul solicitării.

➤ **Rezistența la întindere.** Fibrele, în afară de fracție volumică și caracteristicile geometrice, influențează comportamentul la întindere a mortarului obișnuit prin modulul de elasticitate și coeficientul lui Poisson, prin rezistența la întindere și

alungirea la rupere, respectiv prin aderența și forța de legătură care ia naștere între fibră-matrice. În general, încărcarea materialului implică inițierea și propagarea fisurilor în matricea fragilă și avansarea lor ulterioară în fibre. Fibrele au un rol dublu: suprimă inițierea și propagarea fisurilor, respectiv închid fisurile odată ce au fost avansate și transmit eforturile prin fisură (previn cedarea bruscă a compozitului). Comportarea la solicitări uni-axiale de întindere și modurile de cedare sunt prezentate pe curba idealizată în Figura 2.32.

Figura 2.32 – Schematizarea răspunsului mecanic la solicitări uni-axiale de întindere al compozitelor cimentoase armate cu fibre discontinue.



În prima fază, notată cu (1) pe figură, atât fibrele, cât și matricea se deformează elastic. Odată cu apariția fisurilor și propagarea acestora (notat cu (3) pe diagramă), întreaga sarcină poate fi preluată de către fibre dacă aderența între matrice-fibră este bună și fibrele au proprietăți adecvate (atât rezistențe cât și proprietăți geometrice). Astfel, după atingerea limitei de curgere a matricei, aceasta se deformează plastic în timp ce fibrele continuă să se întindă elastic, iar eforturilor în fibre cresc, în măsura în care rezistența la întindere a fibrelor este mai mare decât rezistența de curgere a matricei. În realitate, curba caracteristică nu prezintă un astfel de palier (3) evident. Conform figurii, pe măsură ce rezistența la întindere a fibrelor și aderența la matrice este mai mare, capacitatea portantă a mortarelor armate dispers cresc în comparație

cu mortarul standard, până la atingerea valorii maxime a efortului unitar σ_{mc} , care definește rezistența la întindere a compozitului. Pentru condiții favorabile în ceea ce privește conlucrarea matrice-fibră, abscisa punctului σ_{mc} poate să fie chiar de 10 ori mai mare decât deformația specifică a matricei cimentoasă.

Totodată, desprinderea sau ruperea fibrelor poate să apară într-un stadiu incipient, înainte ca fibra să fie utilizată eficient. Dacă nu au proprietăți adecvate în ceea ce privește geometria (prezentat în § 2.4.2.3) sau rezistența la întindere și/sau smulgere, odată cu începerea apariției fisurilor, fibrele nu sunt capabile să preia sarcinile transmise de matrice. În acest caz, comportarea materialului prezintă o descreștere progresivă notată cu (2) în figură, datorită cedării fibrelor prin rupere (este depășită valoarea rezistenței la întindere a fibrelor) sau smulgere (aderență scăzută între fibre-matrice).

Așadar, cedarea compozitului la solicitări de întindere prezintă trei moduri (a) după fisurarea matricei fragile, fibrele nu preiau tensiuni și în consecință, cedarea compozitului este instantaneu (se întâmplă rar în practică); (b) după fisurarea matricei fibrele preiau o proporție din încărcarea transmisă. Datorită rezistenței la întindere a fibrelor și/sau rezistenței la smulgere matrice-fibră scăzută compozitul cedează și curba caracteristică a compozitului prezintă o descreștere progresivă după fisurare. Acest tip de cedare este tipic pentru matricele cimentoase armate cu fibre scurte, la un procent relativ mic de armare; (c) după fisurarea matricei fragile, fibrele continuă să suporte o tensiune crescătoare de întindere. Acest comportament este caracteristic matricelor cimentoase armate cu fracție volumică relativ mare de fibre continue.[93]

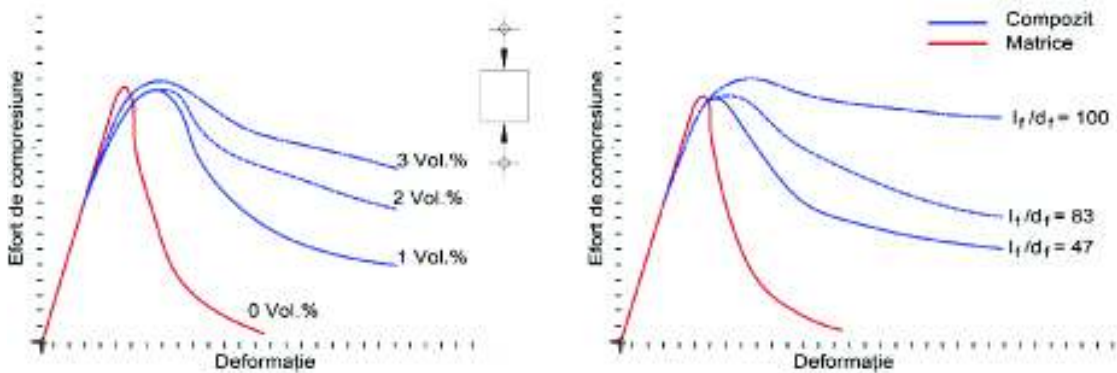
Conform celor prezentate, procesul de fisurare prezintă patru zone distincte, după cum se arată și în figura: (a) o zonă de micro-fisurare; (b) o zonă de creștere a micro-fisurilor; (c) zona de fisurare progresivă în care eforturile sunt transferate în această zonă prin mecanismul de extragere a fibrelor; și (d) zonă cu crăpături (deschiderea fisurilor este relativ mare), nu mai are loc întinderea. În cazul matricelor cimentoase armate dispers cu fibre scurte cedarea materialului se produce prin fisuri dense și fine, iar comportamentul este ductil.

➤ **Rezistența la compresiune.** În general, adăugarea fibrelor discontinue în mortar determină o creștere ușoară a rezistenței la compresiune față de mortarul simplu (standard). Comportarea și rezistența la compresiune depinde de natura și

proprietățile matricei, iar în comparație cu rezistența la întindere, valoarea acestuia este foarte puțin influențată de tipul fibrei utilizată. Proprietățile, precum cantitatea de fibră adăugată și/sau geometria, poate influența comportamentul compozitului la eforturi de compresiune, prezentată în Figura 2.33 [129]. Trebuie avut în vedere că datorită rezistenței mai mare la compresiune a matricei, adăugarea fibrelor într-o cantitate mare poate influența în mod negativ rezistența la compresiune a compozitului.

Ruperea și cedarea la compresiune a mortarelor armate cu fibre se produce astfel prin matrice în zonele unde apar defecte structurale sau la interfața constituenților.

Figura 2.33 – Influența armării cu fibre discontinue asupra comportamentului matricei cimentoase; (a) influența fracției volumice; (b) influența raportului geometric ale fibrelor.



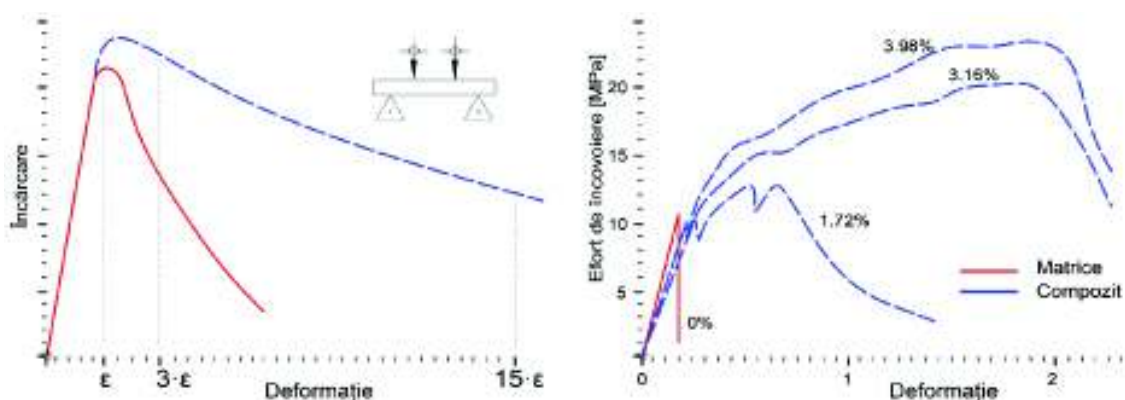
➤ **Rezistența la încovoiere.** Deși rezistența la încovoiere se determină la apariția primei fisuri (ACI - Committee 544), comportarea dincolo de aceasta (post-fisurare) a compozitelor cimentoase armate cu fibre este la fel de importantă. După atingerea limitei de elasticitate materialul nu cedează, poate continua să suporte sarcini suplimentare datorită prezenței fibrelor. Dacă se ia în considerare doar comportamentul ideal elastic, rezistența la încovoiere ar trebuie să fie egală cu rezistența maximă la întindere (în realitate, rezistența la încovoiere este mai mare, inclusiv și în cazul matricei).

Rezistența la încovoiere nu depinde doar de rezistența ultimă la întindere, dar și de ductilitatea după fisurare, ultima menționată având, de obicei, o importanță mai mare. Astfel, fibrele care nu duc la o creștere a rezistenței la întindere, dar care sporesc

ductilitatea după fisurare, pot duce la o creștere a capacității portante a compozitului la încovoiere.

Conform [9], rezistența la încovoiere în cazul materialelor armate cu fibre poate crește cu un factor de 2.44 în comparație cu rezistența la întindere. În cazul mortarelor cu fibre discontinue (armarea dispersă având eficiență mai scăzută), acest factor este mult mai mic. Pentru cazuri normale, rezistența la întindere a betonului simplu reprezintă 0.5–0.6 din rezistența la încovoiere și se numește coeficient de elasticitate. Astfel, factorul de creștere a rezistenței la încovoiere față de cea la întindere este 1.6–2.0. Comportarea mortarelor armate cu fibre discontinue la solicitări de încovoiere și efectul procentului de armare asupra acestuia sunt prezentate în Figura 2.34, conform lucrării [9].

Figura 2.34 – Comportarea mortarelor armate cu fibre discontinue la solicitări de încovoiere; (a) Efectul armării cu fibre – caz general; (b) Mortar armat cu fibre de carbon.



2.4.2.8. Tipurile de fibre și reglementările privind utilizarea acestora în mortare

În cazul matricelor cimentoase se utilizează o gamă largă de materiale ca elemente de ranforsare. Cele mai des utilizate sunt fibrele de sticlă, oțel, carbon, fibrele de polimer precum: polipropilenă sau PAV și diferite tipuri de fibre naturale cu aplicabilitate mai restrânsă datorită sensibilității lor la umezeală. Avantajele și dezavantajele acestor fibre, prezentate în § 2.3.2 (Ranforsant), sunt valabile și în cazul mortarelor, cu câteva specificații și particularități. Proprietățile fizico-mecanice cele mai importante ale acestor fibre sunt prezentate în Tabelul 2.23 la sfârșitul subcapitolului § 2.4 (2.4.2.9).

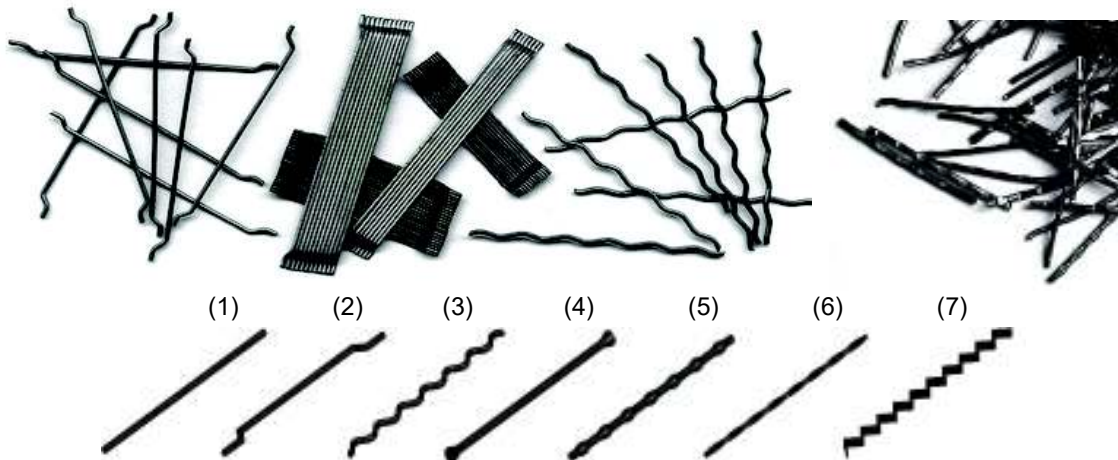
Pe lângă standardele în vigoare privind mortarele de zidărie (SR EN 998-1/2016: Specificație a mortarelor pentru zidărie. Partea 1: Mortare pentru tencuire și gletuire [194] și Partea 2: Mortare pentru zidărie [195]), standardele care se referă la caracteristicile mortarelor armate cu fibre sunt:

- SR EN 14845-1:2007 specifică compoziția și caracteristicile betoanelor și mortarelor de referință utilizate la evaluarea performanței fibrelor din acestea.
- SR EN 14845-2:2007 specifică metoda ce permite determinarea efectului fibrelor de oțel sau polimer, asupra rezistenței reziduale la încovoiere a unui beton sau mortar de referință.

➤ **Fibrele de oțel.** Cerințele fibrelor de oțel pentru utilizare structurală sau nestructurală în beton, mortar sau pasta de ciment sunt stabilite în standardul european SR EN 14889-1/2007 - Partea 1 [182] conform HG 622/2004 privind produselor pentru construcții.

Datorită rezistenței scăzută la smulgere și slabei aderențe la matricele precum mortarul sau betonul, au fost confecționate și introduse fibrele de oțel cu diferite suprafețe și forme deformate ca fibrele ondulate sau îndoite la capete, prezentate în Figura 2.35. Pot avea secțiune circulară, pătrată sau rectangulară.

Figura 2.35 – Tipurile de fibre de oțel; (1) lise/drepte; (2) cu ciocuri; (3) ondulate; (4) capete lărgite; (5) secțiune lărgită; (6) răsucită; (7) frezată.



Mortarele cu fibre de oțel sunt folosite atât la construcții noi, cât și la lucrări de reabilitare în aplicații pentru pardoseli industriale, pardoseli fără rosturi, drumuri, pavaje, autostrăzi, piste de aeroport, tuneluri, parcuri, clădiri anti-seismice etc. Rezistența la șoc poate fi majorată între 3 – 10 ori, iar ductilitatea între 10 – 30 ori în

funcție de caracteristicile fibrelor și procentul de armare, iar în cazul acțiunilor statice efortul unitar de apariție a primei fisuri este de ~2 ori mai mare. [90]

Aceste mortare se caracterizează printr-o densitate aparentă de $\sim 2.0 - 2.10 \text{ g/cm}^3$, modul de elasticitate de 10-15 GPa și rezistența la încovoiere de 5-7 MPa.

➤ **Fibre din polimeri.** Standardul european SR EN 14889-2/2008 – Partea 2 prevede reglementările privind fibrele de polimer pe bază de poliolefine (de exemplu, polipropilenă sau polietilenă), poliester, nailon, acrilice, acetat de polivinil, aramide și combinații ale acestora utilizate în vederea armării betoanelor și mortarelor.

Conform [183], fibrele de polimer pentru armarea betoanelor și mortarelor se împart în trei clase în funcție de dimensiunea și forma:

- Clasa I (a): micro-fibre diametru $< 0.30 \text{ mm}$, mono-filament;
- Clasa I (b): micro-fibre cu diametru $< 0.30 \text{ mm}$ fibrilate;
- Clasa II: macro-fibre cu diametru $> 0.30 \text{ mm}$, utilizat în general pentru creșterea rezistenței la încovoiere.

În cazul fibrelor din polimeri, temperatura de aprindere și punctul de topire este o caracteristică importantă dacă sunt folosite în vederea modificării comportamentului mortarului la foc și trebuie determinat în conformitate cu ISO 11357-3 și ISO 11357-3. În ceea ce privește rezistența la întindere și modulul de elasticitate, fibrele trebuie testate conform standardul europene EN 10002-1. Toate aceste proprietăți pe lângă celelalte care se referă la aspectul geometric, precum tratamentele chimic sau fizic la care au fost supuse fibrele trebuie declarate de către producător conform [183].

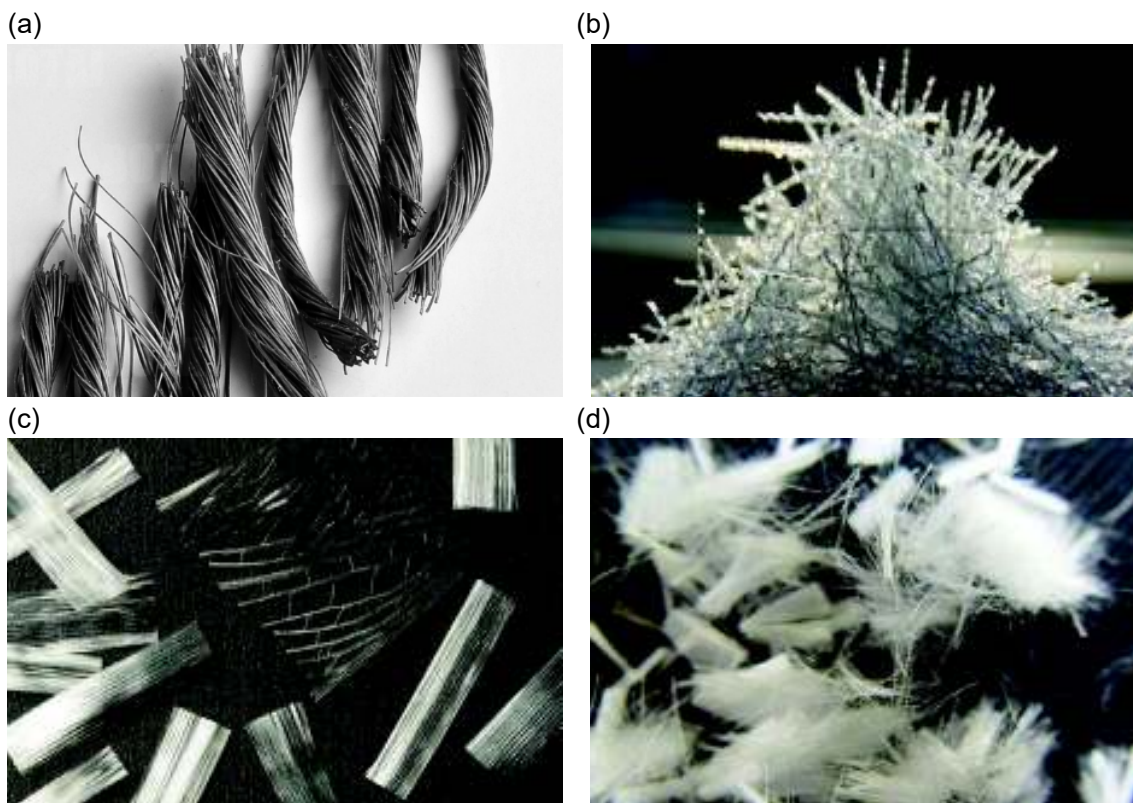
Fibra de nailon a fost primul material sintetic recomandat pentru armarea betonului în special pentru armarea elementelor supuse acțiunii încărcărilor dinamice. Cu toate acestea, fibrele de nailon sunt mai puțin adecvate din punct de vedere tehnologic și mai scumpe decât fibrele de polipropilenă.

Fibrele de polipropilenă se găsesc sub diferite forme, precum: fibre continue, plasă continuă sau fibre scurte (mono-filament, multi-filament etc.). Prin procesul de fibrilare se obțin fibre scurte cu aderență sporită, dar necesită tratamente speciale pentru folosirea în matrice de ciment. Structura chimică a polipropilenei face ca aceasta să fie hidrofobă în raport cu matricea de ciment, care conduce la formarea

unei legături slabe cu aceasta și afectează negativ dispersia sa în matrice fără tratament. Astfel, majoritatea fibrelor de polipropilenă dezvoltate pentru mortare sunt supuse diferitelor tratamente de suprafață brevetate pentru a îmbunătăți umectarea fibrelor. Pentru mortare, fibrelor de polipropilenă pot fi, de asemenea, produse sub formă de fibre continue (țesături) pentru fabricarea elementelor subțiri (se realizează impregnarea țesăturii cu mortar). În condiții normale, durabilitatea fibrelor de polipropilenă în matrice precum beton sau mortar este bună. Testele de laborator au evidențiat faptul că în mediu alcalin, la temperaturi relativ ridicate ($\sim 90^{\circ}\text{C}$ sau mai mari), fibrele prezintă 90% din rezistența lor inițială. Acest lucru este valabil și pe termen lung (50 de ani). [3]

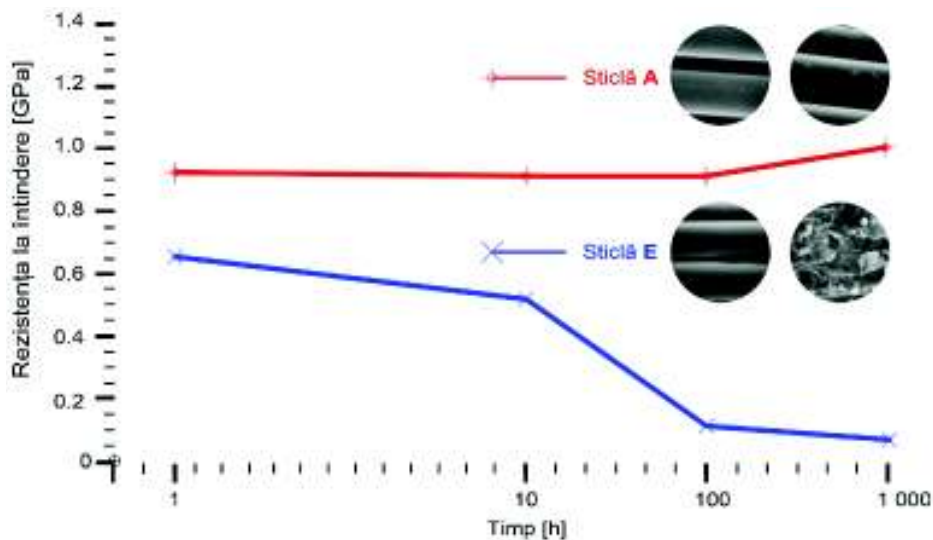
Fibrele din polimeri, în general, îmbunătățesc rezistența la acțiuni dinamice și determină o ușoară creștere a rezistențelor mecanice prin închiderea fisurilor care se datorează acțiunilor multiple care au loc atât în stare proaspătă cât și întărită. Cantitatea uzuală este $1\text{-}3\text{ kg/m}^3$ și se folosesc diferite forme prezentate în Figura 2.36.

Figura 2.36 – Fibre de polipropilenă utilizate pentru armarea matricelor cimentoase; (a)(b)(c) Macro-fibre; (d) Micro-fibre; (a) Pachet de fibre mono-filament, răsucite nefibrilate; (b) Fibre mono-filament ondulate nefibrilate; (c) Rețea de fibre fibrilate [19]; (d) Fibre scurte (micro) mono-filament.



➤ **Fibre de sticlă.** Matricea pe bază de ciment Portland reprezintă un mediu neadecvat pentru fibrele de sticlă uzuale, întrucât au o instabilitate accentuată în medii bazice (alcalini, $7 < \text{pH} \leq 14$). Cimentul Portland prin hidratare creează un mediu bazic în care fibrele de sticlă sunt atacate chimic, ceea ce duce la pierderea rezistenței acestora (Figura 2.37 [148][9]). Pot fi utilizate în contact cu lianții ne-alcalini precum ipsosul, cimentul magnezian, cimentul aluminos sau se poate diminua acest efect prin folosirea fibrei de sticlă tip A (rezistență crescută în mediu alcalin) în combinație cu ciment Portland. Folosind tehnicile convenționale de amestecare pentru matricele de beton, mortar sau pastă de ciment fracția de volum se limitează la aproximativ 2% folosind fibre cu lungime de 25 mm. Peste această valoare se reduce lucrabilitatea și posibilitatea de amestecare și omogenizare [44].

Figura 2.37 – Efectul compoziției sticlei asupra rezistenței la întindere a fibrelor după expunere acestora în soluție de ciment Portland. Analiza SEM a fibrelor după 200 ore în mediu alcalin (ciment, $\text{pH} = 12.9$) la 80°C .



Procesul de înglobare a fibrelor de sticlă și fabricarea mortarelor armate poate implica pulverizarea manuală sau mecanizată și preamestecare în cazul armării dispersă, sau în cazul fibrelor continue impregnare cu mortar sau pasta de ciment. În procesul de pulverizare, fibrele se taie în lungimi cuprinse între 10 și 50 mm și se suflă prin pulverizare simultan cu mortarul, urmată de aspirație pentru a îndepărta excesul de apă. În tehnica de preamestecare, fibrele scurte sunt amestecate în mortar înainte de aplicare sau turnare, pompare etc. Mortar suplimentar și fibre pot fi adăugate prin

pulverizare și compactarea poate fi realizată prin aplicarea presiunii cu role combinată cu aspirația.

Fibrele de sticlă se utilizează în aplicații, precum mortare pentru tencuieli, elemente de protecție anti-foc, elemente arhitecturale și design, panouri de fațadă, elemente edilitare sau elemente pentru străzi și drumuri, aplicații marine sau alte elemente prefabricate. Printre avantajele folosirii acestora în compoziția mortarelor se numără posibilitatea de proiectare în diferite forme cu suprafețe și texturi variabile, rezistențele mecanice bune, în special la întindere și șoc combinată cu greutate redusă, rezistențele apreciabile la coroziune, foc și atacul microorganismelor etc. [90]

➤ **Fibre de carbon.** Efectul adăugării unor fibre de carbon scurte dispersate aleatoriu în compoziția mortarelor a fost intensiv studiat, deși prețul acestuia, comparativ cu celelalte tipuri de fibre, este ridicat. Fibrele de carbon în timpul amestecării în matrice cimentoasă se dispersează în filamente individuale, și astfel raportul de aspect al acestora este ridicat. Lungimea este de obicei cuprinsă între 6 și 10 mm, iar diametrul individual al filamentelor este de 10 μm . Se poate afirma că o cantitate relativ mică de fibră contribuie la creșterea rezistenței la întindere a compozitului și aduce o îmbunătățire ușoară în ceea ce privește rezistența la compresiune. Avantajul cel mai mare reprezintă îmbunătățirea rezistențelor mecanice combinat cu o greutate redusă. Procentul de armare se limitează la aproximativ 8-10% și sunt folosite la elemente subțiri, unde este necesară o greutate redusă sau rezistență mare la foc.

2.4.2.9. Prepararea și punerea în operă a mortarelor armate dispers

În cazul preparării mortarelor armate dispers sunt valabile toate principiile și prevederile stabilite pentru mortare tradiționale, dar amestecarea și omogenizarea cu fibre în acest caz necesită o atenție deosebită. Totuși, nu presupune o manoperă costisitoare sau calificare specială. Adăugarea firelor în compoziția mortarelor este o operațiune simplă și amestecare poate fi efectuată pe platformele de producție, autobetoniere sau pe șantier în malaxoare sau betoniere mici. Se poate realiza amestecarea uscată la începutul fabricației, și adăugarea ulterioară a apei sau amestecarea mortarului tradițional și adăugarea ulterioară a fibrelor. Amestecarea durează până când se uniformizează distribuția fibrelor și variază între 3-10 minute.

Fibrele adesea sunt comercializate în saci din material hidrosolubil, astfel pot fi adăugate în compoziția matricei cu ambalaj, iar după amestecare materialul este gata de utilizare. La prepararea acestora, trebuie acordată atenție la evitarea degradării fibrelor (în funcție de fibra utilizată și sensibilitatea la amestecare – ca de exemplu fibrele de carbon) și la realizarea dispersiei uniforme a fibrelor și omogenizarea materialelor (evitarea formării ghemelor).

În ceea ce privește punerea în operă, mortarele armate dispers pot fi aplicate manual sau mecanizat, inclusiv prin pulverizare sau torcretare dacă tipul și cantitatea de fibră, respectiv lucrarea permite acest lucru. Aplicarea manuală se realizează conform lucrărilor specifice de zidărie, utilizând mistria, dreptarul și drișca. În cazul lucrărilor de tencuire sau nivelare, după aplicarea materialului pe suport și tragerea în grosimea dorită (într-un strat sau straturi succesive) suportul se prelucrează și se pregătește în funcție de următorul strat de material. În cazul lucrării de reabilitare, în vederea realizării aderenței bune între materiale, suportul se pregătește adecvat, îndepărtându-se părțile deteriorate. În acest sens, suportul trebuie curățat foarte bine, iar suprafețele decopertate, pe care se va aplica mortarul trebuie să fie sănătoase și să aibă rugozitate mare. Un procedeu eficient în cazul structurilor de beton este hidrosablarea care îndepărtează eficient părțile slabe neaderente, uleiurile și grăsimile sau rugina în cazul armăturilor fără, să fie induse vibrații puternice care conduc la apariția fisurilor noi sau degradarea structurii de rezistență. [44]

Datorită tendinței de separare a părților componente (proprietatea de segregare §2.4.2.6) la preparare – transport – punere în operă trebuie acordată deosebită atenție timpului. La distanțe mai mari, transportul trebuie realizat cu autoagitator care amestecă mortarul și în timpul transportului și împiedică segregarea, dar operațiunea de reamestecare și omogenizare la locul de punere în operă este obligatorie.

Tabelul 2.23 – Tabel centralizator. Proprietățile principalelor tipuri de fibre utilizate pentru armarea dispersă a materialelor de construcții cimentoase și proprietățile generale ale matricei cimentoasă.

Tipul de fibră	Diametru [μm]	Densitate [g/cm³]	Modul de elasticitate [MPa]	Rezistența la întindere [MPa]	Alungire la rupere [%]
Oțel	5 - 900	7.8	200 000	600 – 2 200	0.5 – 3.5
Sticlă	9 - 19	2.6	70 000 – 80 000	3 000 – 4 000	2 – 3.5
Azbest	0.02 – 10	3.0	160 000 – 190 000	3 000 – 3 500	2.0 – 3.0
Polipropilenă	20 – 400	0.9	3 500 – 10 000	500 – 800	15 – 25
Aramid (Kevlar)	10 – 12	1.4	63 000 – 120 000	2 300 – 4 000	2 – 4.5
Carbon (HS)	8 – 9	1.6	230 000 – 380 000	2 500 – 5 000	0.5 – 1.5
Nailon	23 – 400	1.2	4 100 – 5 200	7 50 – 1000	16.0 – 20.0
Lemn	-	1.5	71 000	900	-
Celuloză	-	1.2	10 000	300 – 500	-
Cocos	10 - 20	1.15	4 000 – 6 000	130 - 180	1.5 - 4
Polietilenă	25 – 1 000	0.95	5 000	800 – 600	3 – 100
PAV	40	1.3	40 000 – 100 000	1 400 – 1 600	1.5 - 7
Acrilice	18	1.2	14 000 – 20 000	400 – 1 000	3
Matrice cimentoasă		1.5 – 2.5	10 000 – 45 000	2 - 7	0.02

2.5. Avantajele utilizării fibrelor scurte în compoziția mortarelor

Printre avantajele privind creșterea performanței și rezistenței mortarelor pe bază de ciment prin adăugarea fibrelor discontinue se numără:

- **rezistențele la acțiuni statice** (în special la întindere și încovoiere) ultimă și inițială mai mare și îmbunătățită datorită închiderii fisurilor și transmiterii eforturilor și după fisurare; armarea dispersă reduce fisurile de contracție și tasare; efortul unitar de apariție a primei fisuri este de ~2 ori mai mare în cazul utilizării fibrelor de oțel și de ~2.6 în cazul fibrelor de sticlă; rezistențele la întindere după 28 zile pot fi majorate cu 2 ori în cazul fibrelor de oțel sau de 3 ori în cazul folosirii fibrelor de sticlă; la fibrele de azbest această creștere poate ajunge chiar la 16%;
- **rezistența la oboseală** (în principal în cazul solicitării de întindere și/sau încovoiere) mai mare datorită prezenței fibrelor care împiedică dezvoltarea fisurilor în material și pe suprafață, supus unor sarcini ciclice; astfel sunt eficiente în lucrări de acoperire și finisaje atât pe suprafețe orizontale, cât și verticale;
- **rezistența la solicitări dinamice** este superioară mortarului sau oricărui material de construcție pe bază de ciment simplu; are avantaj în realizarea (subturnarea) sau consolidarea fundațiilor, în special a fundațiilor de utilaje supuse unor solicitări dinamice; prezența fibrelor în compoziția mortarului permite ca acest amestec să fie folosit în zonele seismice și are ca efect îmbunătățirea răspunsului seismic și creșterea ductilității. Reglementările din domeniul construcțiilor din SUA (Decret Ministerial 01/14/2008 - Standarde Tehnice pentru Construcții) prevăd în zonele cu grad ridicat de risc la cutremure utilizarea armării cu fibre (mortar de zidărie armat cu fibre, beton armat cu fibre la fundațiile construcțiilor înalte și ale podurilor etc.);
- **rezistența la abraziune** dispersia tridimensională și uniformă a fibrelor determină armarea eficientă a suprafețelor și prin urmare creșterea rezistenței la abraziune;
- **rezistența la impact și șoc** crescută datorită absorbției de energie de către fibre; rezistența la șoc este majorată chiar până de 10 ori;

- **durabilitate** crescută datorită rezistenței excelente a fibrelor față de condițiile de mediu (acțiunea intemperiilor) și alte materiale agresive chimice, precum săruri și gaze corozive (în special în cazul folosirii fibrelor sintetice); prin reducerea permeabilității la apă și substanțe chimice scade sensibilitatea la îngheț-dezghet (reduce migrația apei); se elimină posibilitatea de degradare cauzată de ruginire și permite folosirea materialului în aplicații în care fierul beton se degradează ușor; astfel sunt eficiente la construcții hidrotehnice și elementele care sunt supuse eroziunii sau unui mediu unde agresivitatea chimică cauzează degradarea materialelor tradiționale;
- **rezistența la foc** poate fi îmbunătățită rezistența la foc a structurii de rezistență și a armăturii prin protejarea acestora cu mortare armate dispers; se folosesc mai ales fibrele de sticlă și de carbon în acest sens;
- **compactitate** – dispersia tridimensională împiedică apariția micro-fisurilor (contractie plastică, hidratare etc.), astfel se obține un material mai compact și mai rezistent, iar fibrele utilizate nu ies pe suprafață și permit finisaje adecvate chiar și în cazul lucrărilor de artă;

Avantajele economice și reducerea costurilor prin utilizarea fibrelor discontinue în compoziția mortarelor pe bază de ciment:

- **reducerea cantității** materialelor, precum fier (plasă sau fier beton) și în anumite aplicații, înlocuiește acest sistem (șape, pardoseli industriale, parcări, cămășuiri, lucrări de reabilitare etc.); astfel sunt reduse și costurile de transport și manoperă;
- **punerea în operă** este ușor de realizat și utilizat care nu presupune manoperă sau calificare specială; înlocuiește, de exemplu, plasa din fibre de sticlă care presupune manoperă și timp de execuție mai mare;
- **sistem de protejare** prin adaos de fibre pot fi protejate elementele structurale, astfel se economisesc cheltuielile de recondiționare;
- **înlocuirea adaosurilor chimice** prin utilizarea fibrelor se economisește o parte din adaosurile chimice;
- **reducere de secțiuni** economisire datorită reducerii dimensiunilor elementelor portante datorită prefabricatelor având greutate mică;

- **reducerea costurilor de realizare a pardoselilor industriale** și reparația acestora sau altor elemente speciale (piste de aeroport, elemente pentru autostrăzi, drumuri) având rezistență la uzură prin frecare crescută;
- **elemente prefabricate cu secțiuni reduse** costurile de armare sunt ridicate cu bare, iar datorită armării dispersă și a rezistențelor inițiale mai mari decofrarea se poate realiza mai repede, fără efecte secundare;
- **aderența îmbunătățită** și posibilitatea aplicării mecanizată accelerează procesul de construcție care are ca și consecință reducerea costurilor;
- în funcție de fibra utilizată, mortarele armate dispers fără adaosuri chimice sunt **materiale de construcții reciclabile**, care se pot refolosi în mod ecologic;

Astfel, eficiența utilizării mortarului armat cu fibre poate fi exprimată prin creșterea durabilității structurii și reducerea costurilor de întreținere.

2.6. Domenii de utilizare ale mortarelor armate cu fibre

Mortarele armate cu fibre sunt utilizate pe scară largă în industria construcțiilor în diferite aplicații de zidărie sau beton armat, la construcții noi sau proiecte de reabilitare în funcție de tipul de fibră, liantul și/sau aditivul utilizat. Joacă un rol important în lucrări de artă și reabilitarea monumentelor istorice unde sunt folosite pentru tencuire, lipirea diferitelor elemente, realizarea de șape și consolidarea substratului, reconstruirea elementelor decorative sau în vederea îmbunătățirii comportamentului structurii la seism [36][62]. Datorită vulnerabilității seismice, structurile de zidărie antice adesea sunt reparate și consolidate cu mortare armate cu fibre, Figura 2.38 [77].

Figura 2.38 – Pagoda Longhu, China – starea degradată în cutremurul din Wenchuan în 2008 și reparată.

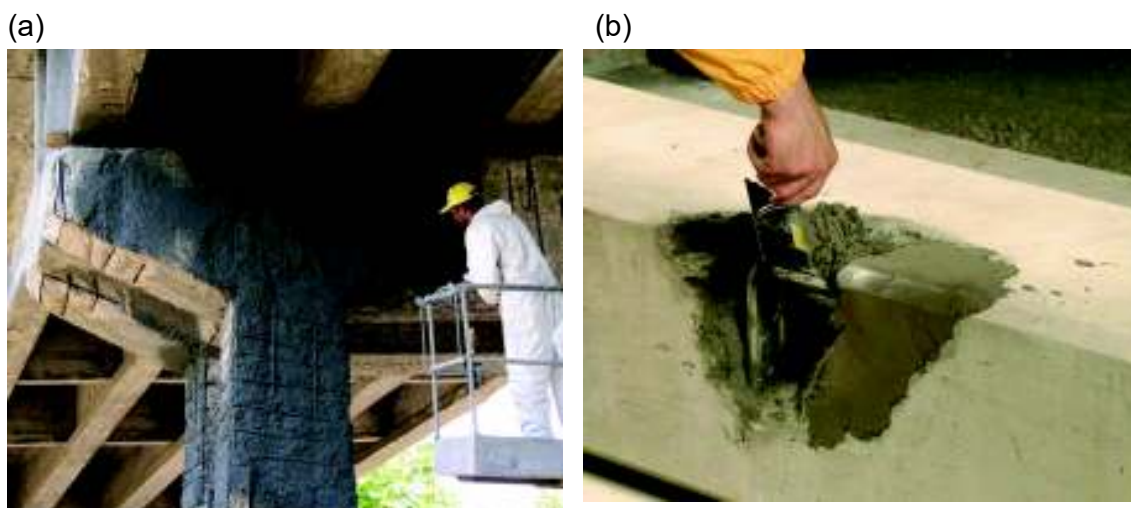


2.6.1. Reparații locale ale structurilor degradate din beton

Utilizarea unui mortar tradițional pe bază de ciment nu s-a dovedit eficient în cazul lucrărilor de reparație datorită contracțiilor care apar în stare proaspătă și/sau întărită, și care determină aderența slabă și prin urmare desprinderea materialului de pe stratul suport, sau apariția și dezvoltarea fisurilor pe suprafață nouă. În cazul mortarelor armate dispers, fibrele reduc apariția acestor fisuri la întărire și produc în contact cu suportul rugos o aderență satisfăcătoare.

Se utilizează atât pe suprafețe verticale, cât și orizontale, pentru repararea marginilor, muchiilor și suprafețelor deteriorate ale elementelor din beton de orice tip (planșee, grinzi, stâlpi, pardoseli industriale etc.) inclusiv la degradări și exfolieri de beton datorită ruginirii de armatură (Figura 2.39). De asemenea, se folosesc pentru umplerea dislocărilor, defectelor și zonelor degradate ale elementelor de beton cum sunt viaductele pentru autostrăzi, drumuri și căi ferate, repararea scurgerilor și sistemelor de canalizare etc. [157][156][151][52]

Figura 2.39 – Repararea elementelor din beton utilizând mortar armat cu fibre; (a) Repararea suprafeței stâlpului și protejarea armăturii cu mortar; (b) Umplerea dislocării și protejarea armăturii cu mortar la grinda de beton.



La orice intervenție de reparare este necesară investigația amănunțită și determinarea cauzelor care au produs degradarea, care de obicei sunt complexe și multiple. Succesul aplicării și protejării elementelor din beton cu mortar armat dispers este legat direct de alegerea potrivită a fibrelor. Astfel, se folosesc diferite tipuri de fibre în acest caz, în funcție de grosimea stratului în care mortarul trebuie aplicat și

agresiunii care au produs degradarea și la care elementul și astfel material va fi supus în continuare. De regulă, se folosesc fibrele polimerice, de sticlă sau de carbon atunci când mortarul are rol de protecție și se aplică într-un strat subțire (în grosime de până la 10 mm pe strat) sau elementul trebuie protejat de diferite agresiuni chimice. Astfel de mortare pot fi aplicate manual cu mistria, mecanizat prin pulverizare sau torcretat.

Se utilizează inclusiv fibrele de oțel atunci când este nevoie de ductilitate sporită sau rezistență crescută și mortarul poate fi aplicat într-un strat mai generos, iar greutatea relativ mare din cauza fibrelor nu reprezintă neajuns.

Standardele privind produse și sisteme pentru protecția și repararea structurilor de beton SR EN 1504-1/2006: Produse și sisteme pentru protecția și repararea structurilor de beton. Definiții, condiții, control de calitate și evaluarea conformității. Partea 1: Definiții; Partea 2: Sisteme de protecție de suprafață pentru beton; Partea 3: Reparație structurală și nestructurală; Partea 7: Protecția armăturii împotriva coroziunii; Partea 8: Controlul de calitate și evaluarea conformității.

2.6.2. Reabilitarea rosturilor la structuri de zidărie

În cazul structurilor vechi de zidărie, degradarea apare de cele mai multe ori în rosturile și straturile de mortar slab pe bază de argilă. Aceste mortare se caracterizează prin rezistențe mecanice slabe și adesea sunt supuse unor solicitări și eforturi ridicate, precum diverse acțiuni ale mediului, agresivitatea agenților climaterici sau chimici, absorbția de apă prin capilaritate etc. Astfel, rezistența și capacitatea portantă a sistemului structural este pus în pericol odată cu degradarea mortarului slab utilizat ca liant în cazul blocurilor ceramice de zidărie.

Metodele de reabilitare clasice în acest caz, precum cămășuirea sau inserții folosind beton armat, schimbă integritatea structurală și/sau distruge valoarea construcției în cazul patrimoniului istoric. O metodă de reabilitare relativ nouă a sistemului este consolidarea rosturilor folosind mortare armate dispers cu fibre înlocuind parțial pe cel vechi (se înlocuiește mortarul slab cu cel nou pe o adâncime stabilită). În comparație cu metodele convenționale de reabilitare amintite, această soluție nu este la fel de costisitoare, este compatibilă cu alcătuirea structurală și este reversibilă. [31]

În acest sens, fibre naturale sau artificiale sunt adesea folosite în funcție de mediul de exploatare. Cele mai des utilizate sunt fibrele de sticlă, carbon sau polipropilenă. Consolidarea rosturilor folosind mortare armate dispers determină în principiu creșterea modulului de elasticitate (creștere a rigidității) și rezistențele mecanice ale sistemului, respectiv în unele cazuri (în funcție de armătură și/sau aditivilor) rezistența la acțiunea mediului și a agresivităților chimice protejând astfel mortarul sensibil la astfel de acțiuni.

Față de un mortar tradițional pe bază de ciment, deși rezistența acestuia este mai mare comparativ cu mortarele istorice pe bază de var și argilă, cele armate cu fibre determină creșterea rezistenței și deformației ultimă a sistemului. Aceasta a fost demonstrată în diferite lucrări realizate pe plan național [31] și internațional [62][36][63], care sunt doar câteva lucrări și cercetări realizate pe această temă. Această tehnologie a fost studiată inclusiv în vederea reconstruirii unui templu roman, în cadrul [37] unde a fost analizată compoziția mortarului istoric și au fost realizate rețete de mortare conținând fibre de PAV în vederea utilizării acestuia pentru diferite reparații și consolidări (platforme și pereți de fundații).

În cazul clădirilor istorice mortarul armat poate fi aplicat cu succes în vederea consolidării și realizării îmbinărilor având avantajul de conservare a caracterului acestora, și pe lângă alte sisteme și metode de consolidare, răspunsul seismic al structurii este îmbunătățit în funcție de fibra utilizată [131].

2.6.3. Lucrări de sub-turnare

Mortarul de sub-turnare se utilizează pentru șine și fundații în cazul unor sarcini mari, părți constructive intens solícitate, la sub-turnarea unor fundații de utilaje sau în anumite aplicații industriale unde temperatura de lucru este înaltă, cu rolul de a mări rezistența și capacitatea portantă a sistemului rezultat. Astfel, mortarele de sub-turnare de regulă sunt pe bază de ciment armat cu fibre de oțel. Se caracterizează prin rezistențe inițiale și finale mari, îmbunătățite în mare măsură în ceea ce privește rezistența la tracțiune din încovoiere, rezistența la forfecare și rezistența la șoc. Este indicat în special la sarcini combinate, ca tensiuni oscilante care apar în practică la suprasolicități de scurtă durată și ca material de turnare în locurile în care, din motive constructive, nu se poate folosi armătură tradițională. Tensiunile rezultate din variații

de temperatură sunt mai reduse și sunt preluate în condiții mai bune datorită utilizării fibrelor în compoziție. Astfel de lucrări sunt prezentate în Figura 2.40 [164].

Figura 2.40 – Utilizarea mortarelor de sub-turnare armate cu fibre de oțel și aspectul compoziției acestuia.



2.6.4. Tencuieli și lucrări de finisare rezistente la deformări

Mortarul armat dispers cu fibre este soluția excelentă pentru construcții vechi în vederea reabilitării fațadelor sau la construcții noi, care sunt supuse unor condiții și solicitări speciale care produc deformații mari, și pot fi folosite pentru prevenirea apariției fisurilor în timp. În general, aceasta înlocuiește utilizarea plasei din fibră de sticlă care presupune manoperă mai mare și un preț mai ridicat. În cazul structurilor, precum tuneluri, în vederea protejării structurii de rezistență, mortarul armat cu fibre poate fi utilizat chiar și prin torcretare, înlocuind armarea tradițională cu plasă, simplificând și reducând timpul de execuție.

În funcție de fibrele utilizate și/sau aditivilor, sunt potrivite în aplicații unde este necesară de o rezistență sporită la agresiunea sulfatilor. Datorită proprietății de închidere a fisurilor, în funcție de fibra utilizată, mortarul poate fi aplicat chiar și în straturi subțiri și este potrivită pentru retencuirea fațadelor monumentelor istorice fără inducerea unor încărcări suplimentare datorită armării. Sunt potrivite și pentru repararea segregărilor, închiderea fisurilor existente înainte de vopsire, atunci când sunt utilizate fibre mici și flexibile.

Astfel, mortarele de tencuieli armate cu fibre pot fi utilizate la lucrări de artă, pentru tencuieli prelucrate ornamental (Figura 2.41), sau apărarea suprafețelor diafragmelor și pereților de tuneluri sau orice suprafață care este supusă la solicitări crescute, abraziune și impact puternic (canale, podele industriale, rampe, etc.).

Figura 2.41 – Fațade reabilitate folosind mortare de tencuiei speciale armate cu fibre folosind mortar Lasselsberger-Knauf pe bază de var-ciment cu adaos de fibre, adecvat pentru renovarea tencuieiilor vechi [154]. Primăria orașului Sf. Gheorghe, România (primul caz) și fațade reabilitate în Ungaria (cazul doi și trei).



2.6.1. Lucrări de zidărie și îmbinări dintre tipuri diferite de materiale

În cazul îmbinărilor de beton-cărămidă, beton-BCA, cărămidă-BCA adesea apar probleme de segregare și fisurare. Pentru prevenirea sau remedierea acestuia, mortarul armat dispers cu fibre precum polipropilena sau alte fibre polimerice pot fi utilizate cu succes.

În cazul lucrărilor de zidărie, mortare cu fibre de oțel sunt adesea folosite, în special în zone seismice, sau când se dorește sporirea ductilității și rezistenței materialului de liere ale blocurilor de zidărie. Pot fi folosite atât în rosturi orizontale cât și la armarea golurilor verticale.

Cercetări noi au fost realizate în vederea înlocuirii sistemului clasic de confinare cu stâlpi și centuri a structurilor de zidărie din BCA în zone cu seismicitate redusă, folosind umplutură de material cimentos armat cu fibre metalice, în special în goluri verticale. [60][61]

2.6.5. Elemente și panouri prefabricate

Folosind ca matrice mortarul pe bază de ciment, se utilizează elementele prefabricate armat cu fibre pentru producerea panourilor și elementelor neportante de închidere. La început matricea de mortar a fost armată folosind fibrele de sticlă, dar în ultimii ani, mai multe firme japoneze au dezvoltat materiale pe bază de ciment armat cu fibre speciale și avansate, cum sunt fibrele de carbon și aramid. Exemple de astfel de lucrări reprezintă clădirile de birouri din Tokyo unde au fost utilizate pereți neporanți din compozit pe bază de ciment și fibre de carbon. Deși panourile astfel realizate datorită fibrelor de carbon costă cu 40% mai mult în comparație cu soluțiile obișnuite, greutatea lor ușoară permite utilizarea unui cadru structural din oțel mai ușor și cu secțiuni mai reduse, ceea ce are drept rezultat economii de costuri dacă privim lucrarea în ansamblu.[130]

2.7. Mortare armate cu fibre predozate

O gamă relativ mare de mortare armate cu fibre gata preparate, predozate, se găsesc și la noi pe piață. Amestecarea prealabilă a componentelor uscați are avantajul evitării unor erori care se produc în timpul fazei de preparare pe șantier (dozarea

incorectă agregat-liant-fibră), singurul component care se adaugă la fața locului este apa. Câțiva producători prezenți pe piață națională și internațională, respectiv produsele sunt prezentate în Tabelul 2.24 – Mortare armate cu fibre predozate. Exemple de produse în funcție de producător.

Conform Tabelul 2.24 se poate afirma că mulți producători sunt interesați în producerea unor mortare speciale și îmbunătățite cu fibre pentru a răspunde unor cerințe speciale, mai ales în cazul structurilor degradate. Compoziția acestora nu este dezvăluită de nici un producător și rețetele sunt confidențiale. În unele cazuri nici tipul fibrei utilizată nu este specificată. Cele menționate explică importanța cercetării în ceea ce privește mortarele armate cu diferite tipuri de fibre. Adesea, aceste compoziții, pe lângă fibre, sunt îmbunătățite cu diferite adaosuri și aditivi pentru a avea o capacitatea crescută în cazul cerințelor speciale și combinate, pentru îmbunătățirea proprietăților la care fibrele în sine nu contribuie sau pentru creșterea aderenței și interacțiunii fibră-matrice. Astfel, iau naștere mortare speciale, cu durabilitate excepțională și rezistențe crescute. Câteva exemple și lucrări realizate pe plan național și internațional sunt prezentate în Figura 2.42; Figura 2.43; Figura 2.44; Figura 2.45; Figura 2.46; Figura 2.47 și Figura 2.48.

Tabelul 2.24 – Mortare armate cu fibre predozate. Exemple de produse în funcție de producător.

Producător	Denumire produs	Tipul de fibră	Utilizare și specificații
Sika [®]	Sika Repair 13	fibre sintetice	<i>mortar de reparație pentru beton modificat polimeric și armat cu fibre sintetice, rezistent la sulfați (utilizare la structurile hidraulice, stații de tratare a apei etc.); [166]</i>
	Sika MonoTop 614	fibre sintetice	<i>mortar de reprofilare armat cu fibre recomandat pentru straturile groase și reprofilări prin procedeu de torcretare; [165]</i>
Mapei [®]	Mapegrout Colabile GF	fibre anorganice	<i>mortar fluid pentru repararea structurilor din beton unde sunt necesare grosimi mari și folosirea unui mortar fluid; [155]</i>
	Planitop Rasa & Ripara	poliacrilonitril	<i>mortar pentru repararea și nivelarea betonului în grosimi <40 mm cu aderență excelentă datorită fibrelor; [158]</i>
	Mapegrout SV Fiber	oțel	<i>mortar fluid cu fibre rigide din oțel placate cu alama pentru reparații în grosimi mari; [157]</i>
	Mapegrout FMR	aliaj metalic	<i>mortar armat cu fibre flexibile din aliaj metalic (fier-crom, amorf, rezistent la coroziune), pentru repararea structurilor de beton cu lucrabilitate ridicată; [156]</i>
EuroCret [®]	20 HD	*	<i>mortar de reparații cu fibre pentru refacerea suprafețelor de beton în grosime 6-50 mm; [151]</i>
	20 HSF	*	<i>mortar de reparații cu fibre și adaos de polimeri pentru rezistența la atac sulfatic; [152]</i>
Ceresit [®]	CD 26	*	<i>mortar de umplere armat cu fibre pentru nivelarea suporturilor de beton armat, umplerea fisurilor și repararea suporturilor deteriorate în grosimi < 100 mm; [149]</i>
	CT 190	*	<i>mortar adeziv flexibil armat cu fibre pentru lipirea plăcilor din vată minerală; [150]</i>
Isomat [®]	Megacret-10	*	<i>mortar armat cu fibre pentru reparații în straturi subțiri, de mare rezistență; [162]</i>
	Megacret-40	*	<i>mortar pentru reparații cu fibre disperse în grosimi de max. 4 cm; [163]</i>
Pagei [®]	V1A/80	oțel	<i>mortar de sub-turnare pe bază de ciment, nu prezintă contracții la uscare, îmbunătățește rezistența la tracțiune, forfecare și rezistența la șoc; [164]</i>
	V15/80	oțel	<i>mortar bazaltic de sub-turnare și de umplere, stabil la temperaturi mari și impermeabil; [164]</i>
Gemite [®]	Fibre-Patch GP	*	<i>mortar de reparații de uz general armat dispers și modificat polimeric potrivit în mediu umed;</i>

** nu este declarată de către producător în fișa tehnică a produsului.*

Figura 2.42 – Reabilitarea viaductului Pescara, Italia. În cadrul proiectului s-a utilizat mortarul armat cu fibre flexibile Mapegrout FMR pentru reabilitarea structurilor degradate de beton armat.



Figura 2.43 – Reabilitarea viaductului Valea lui Stan, 2014. Refacerea secțiunii din beton prin turnarea unui mortar de reparații structurale, Mapegrout Colabile GF armat cu fibre de oțel. Beton degradat de la baza stâlpului.



Figura 2.44 – Aplicarea mortarului armat cu fibre Mapei pe structuri subterane din beton, metroul M4, Budapesta [200].



Figura 2.45 – Reabilitarea pistei de aeroport Rimini, Italia (a) și consolidarea substratului pardoselii la galeria Vittorio Emanuele II, Milano, Italia (b) folosind mortar armat cu fibre rigide de oțel, Mapei, 2012. (b) O legendă spune că rotirea cu călcăie pe simbolul de taur aduce noroc. Astfel, pardoseala din mozaic necesita un substrat puternic.

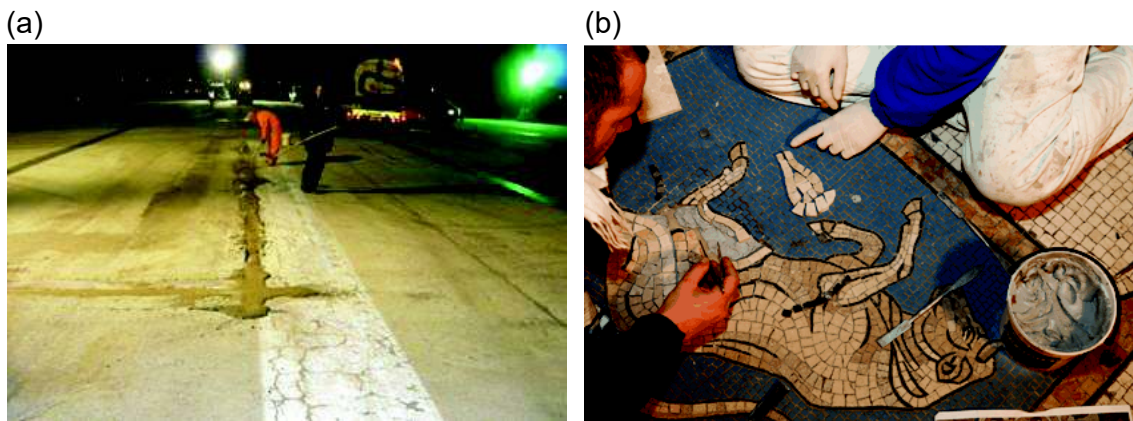


Figura 2.46 – Reabilitarea coșului de fum CET Palas, Constanța cu mortar armat EuroCret (a) și reabilitarea betonului degradat la pereții piscinei la Zoopark Chomutov, Cehia folosind mortar cu fibre Ceresit (b).

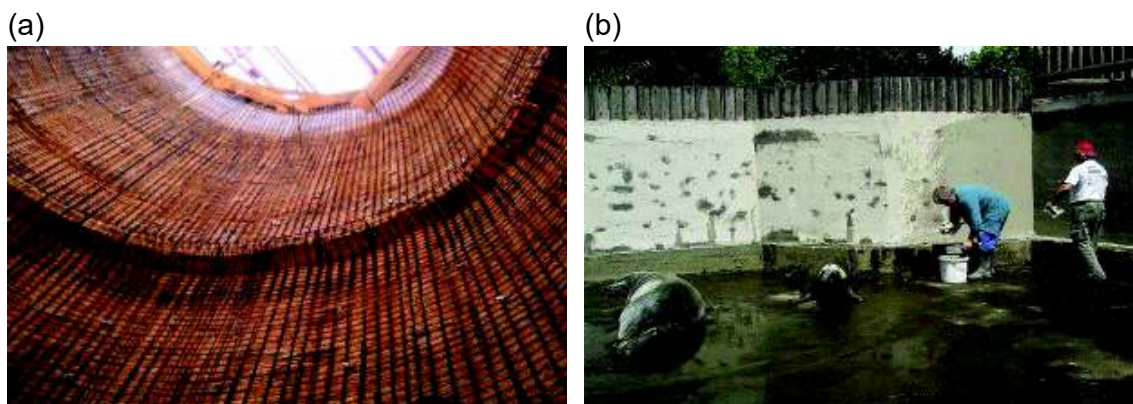


Figura 2.47 – Mortar armat cu fibre de oțel Pagel utilizat la lucrări de subturnare și ancorare la hale industriale.



Figura 2.48 – Pregătirea suprafeței și aplicarea mortarului de reparații EuroCret® cu fibre rezistente la atac sulfatic, Daewoo Mangalia Heavy Industries.



3 CAPITOL 3

ASPECTE PRIVIND TESTAREA VIRTUALĂ A MORTARELOR

3.1 Introducere în conceptul de analiză virtuală multi-scalară

O tendință nouă în toate domeniile de cercetare privind realizarea și conceperea materialele performante și a elementelor sau sub-elementelor unei structuri este fabricația virtuală. Asta presupune simularea proceselor de deformare și de multe ori presupune și o analiză multi-scalară, oferind posibilitatea de îmbunătățire a fabricației propriu-zisă, optimizarea și reducerea costurilor produselor.

Având în vedere gama diversificată de materiale care pot intra în compoziția și armarea mortarelor, un aspect foarte important este estimarea proprietăților compozitului înainte de investigația propriu zisă și efectuarea testelor de laborator. Fabricația virtuală reprezintă o astfel de modalitate de estimare, care se definește ca mediul care permite simularea și dezvoltarea unui produs, și reprezintă totalitatea produselor software și instrumentelor de modelare, respectiv metodologiile folosite în scopul rezolvării problemei. Face posibilă detalierea sistemelor concepute și proiectate, testarea diferitelor configurații, identificarea caracteristicilor sistemului și fenomenelor care influențează performanța și eficiența acestora.

Stabilirea compoziției și a structurii unui material compozit în funcție de aplicație și rolul pe care trebuie noul material să-l îndeplinească nu este o problemă simplă. Introducerea armăturii într-o matrice modifică semnificativ proprietățile materialului și trebuie avut în vedere eventualele modificări ale microstructurii matricei rezultate datorită prezenței armăturii. În anumite cazuri, generarea tensiunilor reziduale din contracția termică de exemplu, în timpul producerii și fabricării poate fi, de asemenea, un element important. Totuși, înainte de a lua în considerare astfel de fenomene și efecte secundare, eficacitatea unei analize mai simple trebuie verificată în vederea determinării proprietăților mecanice ale sistemelor compozite.

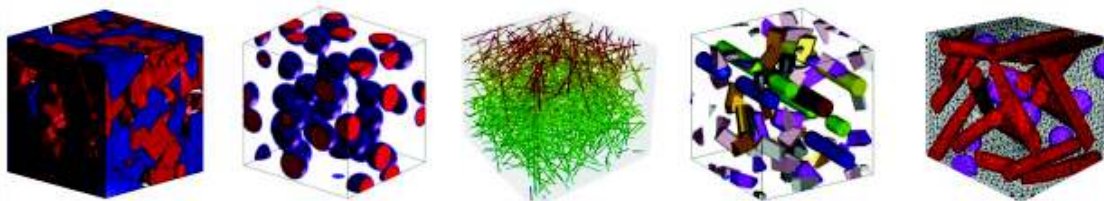
Aceste materiale, în special compozitele armate cu fibre discontinue și distribuție aleatorie, prezintă o provocare în domeniul ingineriei materialelor. Ele au proprietăți superioare în comparație cu materialele tradiționale (mortarul simplu în

cazul de față), dar în același timp, datorită structurii sale (materiale neomogene cu proprietăți cvazi-izotrope), comportarea acestora este mai greu de definit și simulat.

Proprietățile fizico-chimice, mecanice și elastice ale materialelor compozite armate cu fibre depind în cel mai înalt și direct grad de proprietățile fibrelor de armare (conținutul – fracția volumică sau masică, forma și orientarea acestora), respectiv de proprietățile matricei.

Metoda de calcul cea mai eficientă și utilizată în acest caz este metoda elementului finit (notat în continuare MEF). În acest sens a fost studiat programul Digimat și Abaqus, respectiv metodele în sine care stau la baza acestora. Totodată introducerea unor fibre discontinue pentru armarea matricei, precum mortarul, în programe de calcul nu este o sarcină ușoară datorită formelor și dimensiunilor pe care le au, prezentat și în Figura 3.1.

Figura 3.1 – Exemple de modele 3D – compozite armate cu particule și fibre orientate aleatoriu, realizate prin intermediul Digimat-FE.



De asemenea, predicția comportării și idealizarea structurii acestora poate fi greu de formulat. Această orientare haotică a fibrelor, prezentată și în Figura 3.1, în cazul betoanelor sau mortarelor determină deci folosirea și mai dificilă a programelor de calcul. În condiții reale, această orientare nu poate fi dirijată, iar în consecință testarea fizică poate aduce diferențe semnificative față de testarea virtuală, în principiu datorită dispersiei neuniformă a fibrelor și a aglomerărilor acestora (formarea ghemelor). De asemenea o problemă majoră în cazul mortarelor armate dispers reprezintă faptul că aceste materiale în multe cazuri intră în categoria compozitelor cu micro-particule sau micro-fibre, adică compozite la care materialul dispersat în matrice reprezintă 1-15%, iar diametrul sau chiar dimensiunea acestora de regulă nu depășește 0.10 mm.

În vederea încercării simulării comportamentului compozitelor armate dispers, așa cum a fost menționat, se poate folosi un program de calcul MEF, acceptând și

anumite ipoteze simplificatoare, de exemplu, omogenizarea proprietăților constituenților prin metode analitice și considerarea unui material izotrop astfel obținut în programul MEF pentru simulare. Deși această abordare reprezintă o aproximație care este departe de realitate, în faza preliminară de proiectare poate avea avantaje.

O analiza virtuală foarte complexă, presupune folosirea și combinarea unor programe speciale, precum simularea probabilității distribuției fibrelor rezultate în urma unei injectări în matriță, care prezice și ia în considerare apariția unor tensiuni în fazele constituente rezultate în urma acestui proces. Un astfel de program este Autodesk Moldflow sau Moldex3D, dar sunt și alte programe concepute în acest sens, dar fiecare necesită software suplimentar pentru transferarea datelor în programul MEF.

Abordări și considerente simplificatoare privind simularea compozitelor cu fibre discontinue, sunt acceptate și folosite chiar și în cazul unei simulări precise datorită caracterului complex al problemei. Astfel de considerente se referă la legătura și aderența între constituenții materialului (matrice și fibre), precum și la modelul care descrie comportarea fiecăruia în parte.

Sunt numeroase situații, în care, pentru obținerea unor soluții aproximative (satisfăcătoare), se acceptă ipoteze care duc la o formulare lineară a problemei reale, sau, altfel spus, la un model linear-elastic. În astfel de cazuri erorile soluției problemei linear elastice sunt relativ mici față de soluția exactă a problemei nelineare.

Definirea și considerarea interfeței și imperfecțiunea legăturii dintre constituenții compozitului este mai greu de abordat, deși în realitate prezintă o importanță deosebită și influențează în mare măsură capacitatea portantă a materialului compozit, așa cum a fost prezentat în secțiunile §2.3.3 și §2.4.2.5.

Programul Digimat conceput de MSC Software, divizia e-Xstream Engineering permite modelarea la meso- sau micro-scară a materialelor avansate și fabricația virtuală, cu sau fără considerarea ipotezelor simplificatoare. Prin intermediul acestui software este posibil analiza complexă a oricărui tip de material compozit, prin aplicarea modelelor lineare sau nelineare pentru descrierea comportării materialelor constituente și/sau prin considerarea unei zone de tranziție sau legătură slabă între constituenți. Înlătură deficiența programelor și metodelor menționate anterior privind necesitatea unor software adiționale în vederea generării modelului 3D și analiza

ulterioară a modelelor create sau chiar și necesitatea folosirii unui program pentru transferarea datelor într-un alt program de calcul MEF, ca de exemplu Abaqus sau Ansys.

Astfel, un obiectiv al lucrării constituie elaborarea modelelor de material la nivel de mezo-scară și implementarea în programe de simulare. Acest capitol abordează prin urmare modelele și soluțiile matematice, principiile și schemele analitice și numerice care stau la baza simulării și aproximării proprietăților materialelor compozite, cu scopul determinării caracteristicilor unor mortare armate dispers, respectiv studierea eficienței acestora.

Bineînțeles, conceperea materialelor compozite în fiecare caz, indiferent de tipul acestuia sau de programul folosit, presupune cunoașterea precisă a proprietăților materialelor componente. În acest sens au fost efectuate încercări de laborator, iar rezultatele vor fi prezentate în capitolul următor.

Afirmațiile menționate în această secțiune se bazează pe bibliografia acestui subcapitol și cercetările autorului.

3.2 Analiza multi-scalară a materialelor compozite

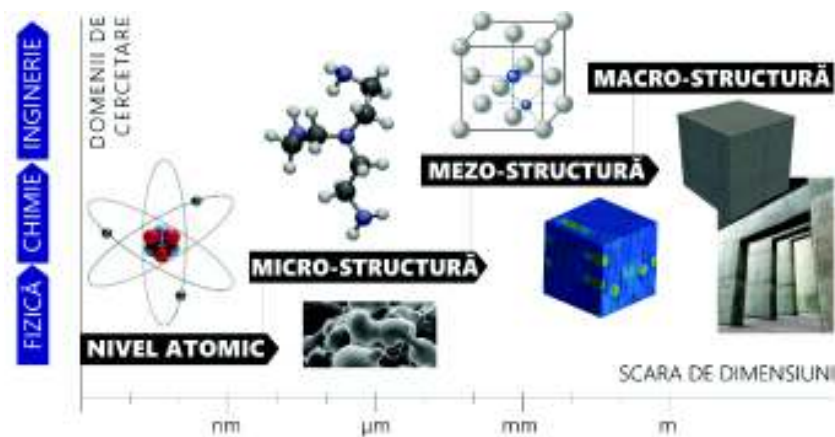
Datorită creșterii popularității materialelor compozite în multe aplicații, au fost dezvoltate diferite metode de calcul pentru analiza și predicția comportării acestora. Proiectarea asistată de calculator și analiza multi-scalară în acest caz poate conduce nu numai la înțelegerea mai bună a comportării materialului polifazic sau la creșterea performanțelor, ci și la reducerea consumului de energie și de materii prime.

Orice corp solid, dacă privim la scara microscopică sau inferioară acestuia, se compune din molecule, atomi, electroni etc. Putem considera prin urmare că orice material omogen și izotrop la o anumită scară poate fi reprezentat sub forma unui compozit alcătuit dintr-un număr finit sau infinit de constituenți (elemente). Constituenții pot fi considerate elemente sau sub-elemente structurale ale materialului, care la rândul lor cuprind alte micro-puncte materiale. Datorită interacțiunii dintre elemente sau sub-elemente care alcătuiesc această structură, la nivelul de material (macro-scară) iau naștere proprietăți mecanice și termice, care nu există la nivel de sub-element. [124]

Obiectivul modelării multi-scalară este de a estima interacțiunea dintre microstructură sau nivelul ales și proprietățile macroscopice (globale). Efectuarea unui studiu asupra corpurilor la astfel de nivele sau scări (micro sau nano), în vederea obținerii comportării generale (de ansamblu, privit la macro-scară), este greu de abordat, sau chiar imposibil. Există însă posibilitatea aplicării în acest sens a unor teorii fundamentale, adoptând o serie de ipoteze simplificatoare care se bazează pe legi matematice și fizice a mediului considerat continuu, verificate experimental, pentru analiza materialelor polifazice (la nivel de constituenți sau la o scară inferioară), în vederea obținerii proprietăților la scară macroscopică.

Așadar, conceptul modelării multi-scalară presupune o analiză care are loc la două sau mai multe scări (nivele) și anume: scara macroscopică (structura propriu zisă) și scara inferioară acestuia, de exemplu scara mezo- (constituenți) și/sau microscopică (chiar nivel nano). Se poate afirma că în majoritatea cazurilor, reprezentarea și analiza în sistemul de două scale este suficientă (Figura 3.2 [15]).

Figura 3.2 – Niveluri de modelare a materialelor.

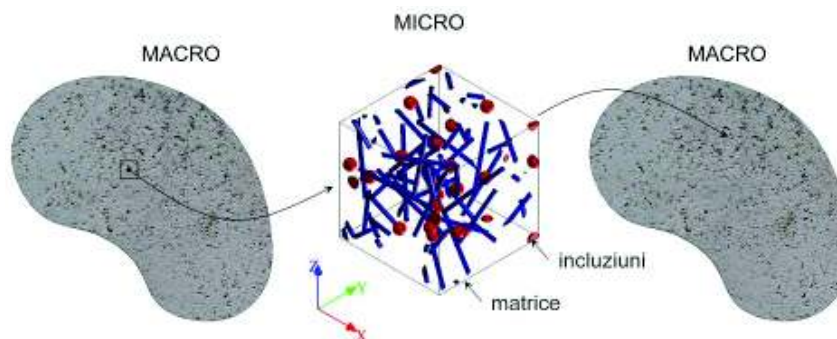


Pentru efectuarea analizei multi-scalară este necesară adoptarea unor modele matematice de tranziție, care descriu comportamentul componentelor sistemului și interacțiunea acestora și dau posibilitatea de a trece de la starea microscopică la cea macroscopică, prin construirea ecuațiilor constitutive la nivel de compozit în baza legilor fizice locale. [124][123]

Legătura dintre scale se face prin intermediul unui concept de element reprezentativ de volum (Representative Volume Element), denumit în continuare RVE (Figura 3.3), respectiv prin aplicarea metodelor analitice și schemelor de omogenizare

a proprietăților constituenților la nivelul RVE. Conceptul de RVE a fost introdus și utilizat prima dată de R. Hill ² și este un concept și element tipic al micro-mecanicii materialelor. [133]

Figura 3.3 – Ilustrarea conceptului de element reprezentativ de volum.



Conform teoriei mecanicii materialelor, RVE (denumit și celulă elementară), este cel mai mic volum (în general privit ca și microstructura materialului) pe care se poate realiza o măsurătoare astfel încât să se obțină o valoare reprezentativă pentru întreg materialul. La scară macro, fiecare punct material este interpretat ca centrul elementului RVE. Se poate considera că acest concept joacă un rol esențial în mecanica și fizica materialelor polifazice, utilizat în scopul de a estima proprietățile efective (globale) ale acestora. [67][113][39]

Bineînțeles, conceptul RVE nu reprezintă soluția problemei. Aplicarea metodei de omogenizare a proprietăților constituenților RVE-ului este esențială pentru a găsi răspunsul constitutiv la scară macro. Acest concept va fi tratat și prezentat detaliat împreună cu metodele de omogenizare în subcapitolele următoare.

În lucrarea de față programul Digimat a fost studiat și utilizat pentru analizarea multi-scalară a materialelor compozite și estimarea comportării acestora. Programul aduce problema estimării comportării materialelor de la nivelul macroscopic (prin considerarea proprietăților macroscopice ale constituenților) la nivel inferior acestuia și vice-versa. Ținând cont de reologia materialului analizat, definit de către utilizator (proiectant), utilizează modele teoretice de predicție și omogenizare a proprietăților componentelor în vederea determinării caracteristicilor materialului la scară

² **Rodney Hill** (1921 – 2011) - matematician englez și profesor de mecanica solidelor la Colegiul Gonville și Caius, Cambridge. [120] Are o contribuție deosebită la dezvoltarea teoriei plasticității.

macroscopică. Astfel, se ține cont de proprietățile fiecărui constituent, atât de proprietățile ranforantului (fibrelor) cât și de proprietățile matricei.

În cele ce urmează, capitolul prezintă aspectele privind metodele de predicție cele mai utilizate, respectiv teoria care stă la baza analizelor multi-scalare și omogenizarea proprietăților, schemele de tranziție ș.m.d.

3.3 Teoria câmpului-mediului (Mean-Field Homogenization)

Interesul în ceea ce privește cuantificare și predicția proprietăților sistemelor materiale alcătuite din două sau mai multe faze distincte există de mult timp. Discontinuitățile de proprietăți în sistem, distribuția aleatorie și interacțiunea materialelor constituente determină complexitatea problemei. Proprietățile acestor materiale pot fi approximate matematic, acceptând anumite ipoteze simplificatoare. Bineînțeles, adoptând aceste ipoteze, rezultatele nu mai sunt în directă corelație cu realitatea și pot apărea diferențe majore în unele cazuri între aproximările analitice și comportarea reală a materialului polifazic.

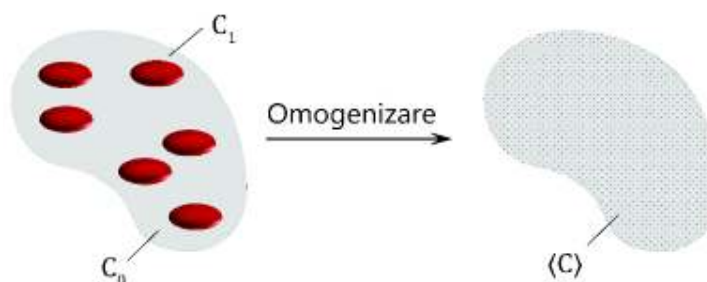
Omogenizarea materialelor polifazice la micro sau mezo-scară se poate realiza prin adoptarea teoriei câmpului-mediului (teoria medierii), Mean-Field Homogenization. Metoda omogenizării în general, adică echivalarea proprietăților fiecărui constituent care intră în alcătuirea RVE cu proprietățile globale (proprietățile efective a materialului polifazic), se bazează pe această teorie, notat în continuare MFH.[86][15]

Ce reprezintă de fapt omogenizarea? În cazul de față, omogenizarea reprezintă un termen general, care se referă la procedura de omogenizare a proprietăților unui material neomogen (alcătuit din mai multe faze) în vederea aproximării proprietăților și răspunsului efectiv sau global, bazat pe proprietățile distincte (lineare sau nelineare) ale fazelor constituente. Omogenizarea MFH este prezentată schematic în Figura 3.4, unde C_x reprezintă rigiditatea materialelor constituente, iar $\langle C \rangle$ este valoarea echivalentă (efectivă), obținută prin omogenizarea (medierea) valorilor $C_1 \dots C_x$.

MFH pe baza unor ipoteze ale legilor de interacțiune între faze constituente (acestea definesc schemele de omogenizare), oferă deci un răspuns macroscopic a materialului, precum și informații generale privind starea de deformare în interiorul

acestor faze. Aceste scheme sunt esențiale în cazul metodei, iar cele mai importante vor fi prezentate în subcapitolele următoare.

Figura 3.4 – Ideea principală a omogenizării luând în considerare rigiditatea fazelor constituente. Se dă un material eterogen (stânga) și condițiile la limită (BCs) și se determină prin omogenizare, utilizând MFH rigiditatea materialului echivalent omogen (dreapta) respectând condițiile la limită (BCs).



Metoda medierii (MFH) pe elementul de volum reprezentativ (RVE) în general este utilizată pentru a obține ecuațiile mișcării macroscopice prin integrarea formală a ecuațiilor mișcării microscopice. Printre primele rezultate în această direcție au fost cele ale lui Slattery (1967) și Whitaker (1969). Sinteze ale cercetărilor având la bază metoda medierii sunt prezentate în cărțile lui Kaviany (1995) și Nakayama (1995). Așadar, această metodă de aproximație este una multi-scalară, care dă posibilitatea calculului proprietăților mecanice macroscopice, bazată pe modele constitutive ale fazelor care alcătuiesc compozitul.

Principalul avantaj al metodei MFH este eficiența de calcul. În general, reprezentarea în sistemul de două scale, procedura de omogenizare se poate schematiza astfel:

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
$\bar{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon$	$\varepsilon \rightarrow \sigma$	$\sigma \rightarrow \bar{\sigma}$
<ul style="list-style-type: none"> la scară micro/mezo RVE conține un număr finit de constituenți. Având tensorul deformațiilor macroscopice $\bar{\varepsilon}$ se face localizarea deformațiilor în fiecare fază constituantă; se obține 	<ul style="list-style-type: none"> presupune aplicarea legilor constitutive și calculul tensorii tensiunii. 	<ul style="list-style-type: none"> se face medierea tensorii tensiunii prin intermediul căruia se obțin valorile macroscopice a tensorii $\bar{\sigma}$.

tensorul deformațiilor
microscopice ε .

Etapa principală în cazul folosirii metodei, reprezintă tranziția la scară, care presupune cantități macroscopice, care urmează să fie transferate la o scară inferioară (micro-scară, mezo-scară etc.), respectiv de la această scară aleasă la cea macroscopică. Procesul se realizează cu ajutorul operațiunii de mediere a valorilor. Prin urmare, ipoteza principală constă în faptul că valorile cantităților macroscopice (valorile generale) pot fi descrise și approximate prin medierea valorilor câmpurilor microscopice pe volum (volumul RVE).

Pentru deducerea ecuațiilor constitutive la macro-scară (nivel de compozit) pe baza ecuațiilor fizice locale, avem nevoie de principii suplimentare pe lângă ecuațiile mecanice și termodinamice clasice, cum sunt: principiul fluctuației tensiunilor și deformațiilor, precum și principiul de discordanță a măsurilor macroscopice cu analogiile lor microscopice potrivite. [124]

Pentru înțelegere teoriei medierii și definirea acestei operațiuni, considerăm un câmp oarecare $g(x)$ în interiorul elementului de volum reprezentativ (RVE) având volumul V , definit pe domeniul ω :

$$\langle g(x) \rangle_{\omega} = \frac{1}{V} \int_{\omega} g(x) dV = \bar{g} \quad (3.1)$$

unde $\langle g(x) \rangle_{\omega}$ reprezintă câmpul mediat (media pe volumul RVE), iar \bar{g} este valoarea macroscopică.

Dacă descompunem domeniul ω pe subdomenii, ecuația (3.1) devine:

$$\langle g(x) \rangle_{\omega} = \frac{1}{V} \sum_k \int_{\omega_k} g(x) dV_k, \quad \omega = \cup_k \omega_k. \quad (3.2)$$

După reformularea ecuației (3.2), folosind fracția de volum a domeniilor descompuse, avem:

$$\langle g(x) \rangle_{\omega} = \sum_k f_k \langle g(x) \rangle_{\omega_k}, \quad f_k = \frac{V_k}{V}. \quad (3.3)$$

Ecuației (3.1) se poate scrie în termeni de tensiuni și deformații sub forma:

$$\langle \sigma \rangle_{\omega} = \frac{1}{V} \int_{\omega} \sigma dV = \bar{\sigma} \quad (3.4)$$

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega} = \frac{1}{V} \int_{\omega} \varepsilon dV = \bar{\varepsilon} \quad (3.5)$$

unde mărimile notate cu σ , ε sunt tensiunile și deformațiile micropunctelor pe domeniul ω , iar $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ sunt tensiunile și deformațiile rezultate la scară macroscopică, considerate egale cu $\langle \dots \rangle_\omega$, care indică media mărimii respective rezultat în urma medierii pe întregul domeniu specificat (valorile medii ale mărimilor tensiunilor și deformațiilor în fiecare micropunct al domeniului ω).

Conform legii transformării și conservării energiei și pe baza expresiilor (3.4) și (3.5), obținem condițiile:

$$\bar{\sigma}\bar{\varepsilon} = \langle \sigma\varepsilon \rangle_\omega = \frac{1}{V} \int_\omega \sigma\varepsilon dV \quad (3.6)$$

$$\langle \sigma \rangle_\omega \langle \varepsilon \rangle_\omega = \langle \sigma\varepsilon \rangle_\omega \quad (3.7)$$

Ecuția (3.7) este cunoscută ca și teorema Hill-Mandel. Pentru efectuarea tranziției de la micro (mezo)- la macro-scară este necesară, dar nu și suficientă ca ecuația (3.7) să fie satisfăcută.

Conform ecuațiilor (3.3), (3.4), (3.5) relațiile de tranziție la scară (valorile globale) pentru efort, respectiv deformație se scrie astfel:

$$\bar{\sigma} = \sum_k f_k \langle \sigma \rangle_{\omega_k} \quad (3.8)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sum_k f_k \langle \varepsilon \rangle_{\omega_k} \quad (3.9)$$

Considerând un caz mai concret, și anume un material compozit cu două faze constitutive, alcătuit dintr-o matrice (notată cu indice 0) care se extinde pe domeniul ω_0 având un volum V_0 , respectiv element de ranforsare (notat cu indice 1) care se extinde pe domeniul ω_1 și are un volum V_1 . Frația volumică pentru matrice și ranforsant poate fi exprimată prin ecuațiile:

$$f_0 = \frac{V_0}{V} \quad (3.10)$$

$$f_1 = \frac{V_1}{V} = 1 - f_0 \quad (3.11)$$

unde V – reprezintă volumul elementului RVE considerat.

Pe baza ecuației (3.3), (3.10), (3.11), pentru materialul stabilit avem:

$$\langle g \rangle = f_0 \langle g \rangle_{\omega_0} + f_1 \langle g \rangle_{\omega_1} \quad (3.12)$$

Astfel, conform (3.12), valoarea medie a câmpului de deformații pe RVE, luând în considerare cele două faze se poate scrie sub forma:

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega} = \sum_k f_k \langle \varepsilon \rangle_{\omega_k} = f_0 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} + f_1 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} \quad (3.13)$$

Respectiv, pe baza MFH și (3.1), obținem valoarea macroscopică a câmpului de tensiuni, respectiv deformații:

$$\bar{\sigma} = \langle \sigma \rangle_{\omega} = f_0 \langle \sigma \rangle_{\omega_0} + f_1 \langle \sigma \rangle_{\omega_1} \quad (3.14)$$

$$\bar{\varepsilon} = \langle \varepsilon \rangle_{\omega} = f_0 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} + f_1 \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} \quad (3.15)$$

Metodele MFH și schemele de omogenizare rezolvă problema de tranziție la scară și echivalarea proprietăților constituenților, însă relația între media câmpului de tensiuni și media câmpului de deformații pe RVE este furnizată de mecanica mediilor continue. Analiza clasică a mecanicii mediilor continue se efectuează la nivel macro. În fiecare punct macro x , se cunoaște valoarea deplasării $\varepsilon(x)$ și este necesar calculul valorii efortului $\sigma(x)$ sau invers. Astfel, avem ecuația:

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_k} = D_k \cdot \langle \sigma \rangle_{\omega_k} \quad (3.16)$$

unde D_k este matricea de complianță a materialului k , care se mai numește și matricea coeficienților de elasticitate.

Pe baza relației (3.16) se poate scrie:

$$\langle \sigma \rangle_{\omega_k} = D_k^{-1} \cdot \langle \varepsilon \rangle_{\omega_k} = C_k \cdot \langle \varepsilon \rangle_{\omega_k} \quad (3.17)$$

unde $C_k = D_k^{-1}$ este matricea de rigiditate a materialului k , care se mai numește și matricea proprietăților materialului.

Ecuația (3.16) furnizează relația între efort-deformație pentru fiecare fază în parte, dar nu și relație între fazele constituate (de exemplu între matrice și ranforsant). Prin urmare, ecuațiile date până în prezent nu sunt suficiente pentru rezolvarea problemei de omogenizare, adică echivalarea volumului neomogen cu un omogen care ține cont de proprietățile constituenților, întrucât este necesară formularea relației care stabilește legătura fazelor constituate. În acest sens a fost introdus tensorul de concentrare sau tensorul de tranziție a tensiunilor/deformațiilor. Această se poate scrie în termeni matematici astfel:

$$\langle \sigma \rangle_{\omega_k} = \mathbb{B}_k \cdot \langle \sigma \rangle_{\omega}, \quad \langle \varepsilon \rangle_{\omega_k} = \mathbb{A}_k \cdot \langle \varepsilon \rangle_{\omega} \quad (3.18)$$

unde \mathbb{A} și \mathbb{B} sunt tensorii de tranziție de ordinul al patrulea. Media tensiunilor și deformațiilor fazelor constituente sunt conectate deci de acești tensori. Metodele MFH diferă una de alta prin selectarea acestor tensori (scheme de omogenizare). Capitolul următor prezintă câteva scheme utilizate în acest sens.

Între limitările metodei se numără faptul că nu ia în considerare forma (se aproximează prin elipsoid) și dimensiunea elementelor înglobate (se consideră raportul geometric), respectiv efectul de aglomerare ale acestora (gheme). De asemenea aproximația poate fi nesatisfăcătoare în cazul unor geometrii complexe, în cazul unui comportament nelinear sau deformații mari, fiind influențată în mare măsură acuratețea privind răspunsul macroscopic.

Luând în considerare cazul concret abordat anterior, adică materialul compozit alcătuit din două faze, una sub forma de ranforsant care se extinde pe domeniul ω_1 având volumul V_1 , înglobate într-o matrice care se extinde pe domeniul ω_0 și are un volum V_0 , conform relației (3.18), conexiunea între valoarea tensorii tensiunilor, respectiv deformațiilor a celor două faze, se stabilește prin intermediul tensorii de tranziție și se poate scrie sub forma:

$$\langle \sigma \rangle_{\omega_1} = \mathbb{B} \cdot \langle \sigma \rangle_{\omega_0}, \quad \langle \varepsilon \rangle_{\omega_1} = \mathbb{A} \cdot \langle \varepsilon \rangle_{\omega_0} \quad (3.19)$$

Ca și concluzie, putem afirma că MFH este o metodă generală, construită pe conceptul unui RVE imaginar, în cazul căruia neomogenitățile sunt tratate ca domenii omogene separate (subdomenii). Metoda presupune rezolvarea problemei interacțiunii între subdomenii, folosind diferite ipoteze pentru stabilirea interacțiunii între aceste faze (scheme de omogenizare) și găsirea valorilor medii noi care satisfac condițiile de limită impuse.

3.4 Metode analitice și semi-analitice. Scheme de omogenizare

3.4.1 Modelul lui Voigt și Reuss

Cele mai simple modele matematice pentru efectuarea omogenizării materialelor compozitelor, sau în general a materialelor polifazice alcătuite din două faze, sunt modelele Voigt și Reuss, care presupun omogenitatea distribuției

deformațiilor (Voigt) și tensiunilor (Reuss) în sub-elementele (faze constituente) care alcătuiesc compozitul. Sunt cunoscute ca modelele stării de deformație și tensiuni constante. Aceste ipoteze conduc la o supraestimare (Voigt), respectiv subestimare (Reuss) a rigidității generale (rigiditatea compozitului), respectiv nu iau în considerare influența formei elementelor înglobate în matrice sau orientarea acestora.

Astfel, schema lui Voigt presupune că tensorul de tranziție a deformațiilor este egal cu unitatea (distribuție uniformă a deformațiilor):

$$\mathbb{A}_k = \mathbb{I} \quad (3.20)$$

iar schema lui Reuss presupune că tensorul de tranziție a tensiunilor este egal cu unitatea:

$$\mathbb{B}_k = \mathbb{I} \quad (3.21)$$

În realitate prezența găurilor, fisurilor și a altor elemente geometrice în interiorul și microstructura materialului au ca efect modificarea distribuției uniforme a tensiunilor și generarea unor tensiuni locale mai ridicate, astfel ipotezele menționate și schemele de omogenizare poate duce la erori mari. În materiale compozite fragile, cum este și mortarul și/sau mortarul armat dispers, fisuri microscopice apar și din cauza incompatibilității chimice și termice ale fazelor constituente (detaliat în secțiunile §2.3.1 și §2.3.3). Această incompatibilitate conduce la tensiuni reziduale interne, de exemplu, în vecinătatea unor fibre sau particule cu modul de elasticitate și coeficient de dilatare termică semnificativ diferit față de cel al matricei, adică a mortarului simplu. Prin urmare, aceste modele nu au fost satisfăcătoare și au fost concepute teorii noi și modele mai exacte în vederea efectuării omogenizării proprietăților materialelor polifazice.

3.4.2 Modelul Kröner și Eshelby

Primul model matematic, care ia în considerare neuniformitatea deformațiilor reversibile și ireversibile a fost propus de Kröner (1958) și constituie o metodă de predicție a comportamentului micro-mecanic ale compozitelor alcătuite din două materiale legate într-un sistem semi-elastic. Conform modelului Kröner, proprietățile mediului (matricea), în care sunt înglobate elementele de ranforsare, sunt calculate ca și medie ale tuturor elementelor care intră în alcătuirea compozitului, iar tensiunile și

deformațiile în interiorul acestor elemente prezintă o stare omogenă pe întregul volum, respectiv neomogen dincolo de limitele acestora.

Deși această metoda ia în calcul interacțiunea elementelor (fazelor constituente), cea reală, care are loc între numeroasele elemente structurale (elemente înglobate), este înlocuită prin interacțiunea fiecărui element structural cu matricea (ranforsant-matrice). [124]

Modelul lui Kröner a fost îmbunătățit de către J. D. Eshelby (1957) care joacă un rol fundamental și în momentul de față în cele mai cunoscute modele MFH și scheme de omogenizare. Publicația lui J. D. Eshelby în anul 1957 și modelul stabilit despre incluziunea elipsoidală înglobată într-un material izotrop (matricea elastică infinită), este considerată un progres major în micro-mecanica materialelor. [99][15]

În cazul unui material omogen, câmpul de deformație ε se poate descompune într-o deformație e produsă de acțiunea sarcinilor exterioare, respectiv într-un câmp de deformații inițiale locale ε^* care se datorează de exemplu modificărilor de temperatură, modificărilor care apar în structura internă (micro-structura) materialului ș.a.m.d., adică o deformație produsă fără existența forțelor exterioare, care se găsește în literatura de specialitate sub denumirea „eigenstrain”. Astfel, câmpul de deformații se poate descompune și scris sub forma:

$$\varepsilon = e + \varepsilon^* \quad (3.22)$$

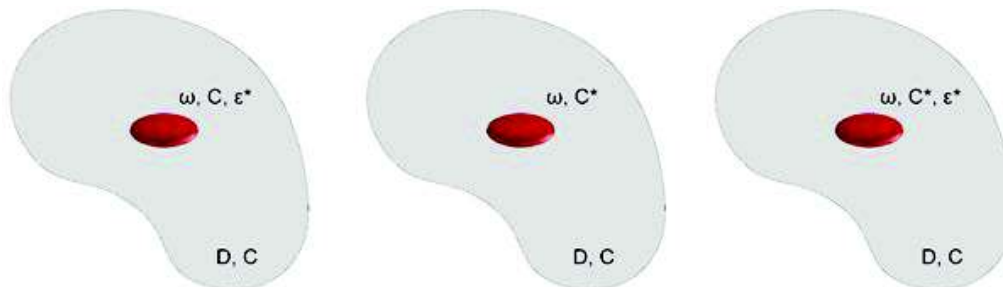
Fără prezența eterogenității în material, câmpurile de tensiune și deformație ar fi constante în interiorul materialului, dar existența lor produce o perturbare în aceste câmpuri. Cu ajutorul problemei lui Eshelby se poate modela acest efect de „perturbare”.

Este important de menționat că în literatura de specialitate se disting trei tipuri de elemente, eterogenități și anume: **incluziuni**, **neomogenități** și **incluziuni neomogene**. Vorbim despre incluziuni atunci când într-un material omogen D (matricea), având rigiditatea C , elementul înglobat în matrice, având aceeași rigiditate, este caracterizat de o deformație „eigenstrain” $\varepsilon^* \neq 0$, definit pe domeniul ω . Dacă acest element, în interiorul materialului, posedă proprietăți diferite față de matrice, caracterizat prin $C^* \neq C$, unde C^* este tensorul rigidității a elementului înglobat, iar C al matricei, iar $\varepsilon^* = 0$ vorbim despre neomogenitate. Dacă sunt satisfăcute ambele

condiții $\varepsilon^* \neq 0$, $C^* \neq C$ simultan, adică rigiditatea elementului înglobat diferă de cea a matricei și deformația „eigenstrain” $\varepsilon^* \neq 0$, vorbim despre incluziune neomogenă. Diferența între cele trei tipuri de elemente descrise anterior sunt prezentate schematic în Figura 3.5.

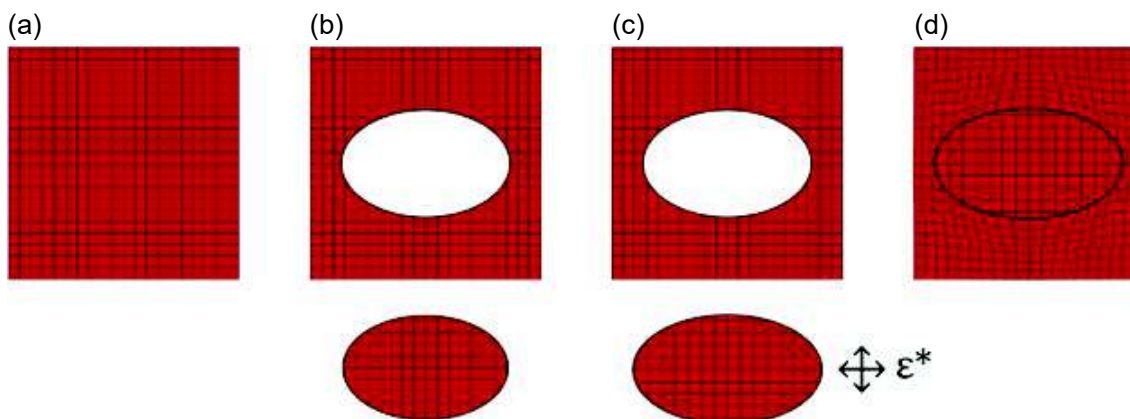
Figura 3.5 – Tipurile de elemente înglobate în matricea unui material polifazic.

(a) Incluziune; (b) Neomogenitate; (c) Incluziune neomogenă.



Eshelby a considerat o operațiune fictivă, și anume: din interiorul unui corp solid infinit și omogen, având o rigiditate uniformă C_0 (a), se înlătură un volum elipsoidal V_i (b), care suferă o deformație constantă „eigenstrain” ε^* (c) și apoi este introdus („sudat”) din nou în sistem (d), a se vedea în Figura 3.6.

Figura 3.6 – Operațiunea fictivă a lui Eshelby. Etapele principale.



Eshelby, cu ajutorul ecuațiilor Green³, a definit tensorul $P^{(V_i)}(x)$ de gradul al patrulea, denumit tensorul Eshelby, care face legătura între deformația totală a materialului eterogen $\varepsilon(x)$ și deformația proprie ε^* a incluziunii, astfel stabilește legătura directă între ε și ε^* astfel:

³ Funcțiile Green sunt elementele de bază a instrumentelor din matematica micromecanicii, care se definesc ca funcții speciale care fac legătura între integrala dublă și integrala curbilinie de speța a doua.

$$\varepsilon(x) = C_0 P^{(V_i)}(x) \cdot \varepsilon^* \quad (3.23)$$

$$S(x) = C_0 P^{(V_i)}(x) \quad (3.24)$$

$$\varepsilon(x) = S(x)\varepsilon^*, \forall x \in (V_i) \quad (3.25)$$

unde $S(x)$ este formă simplă a tensorul lui Eshelby, care variază în funcție de proprietățile elastice izotrope ale matricei și forma (nu dimensiunea) și orientarea incluziunii (în acest caz volumul elipsoidal V_i).

Folosind tensorul lui Eshelby se poate exprima câmpul de tensiuni a materialului eterogen astfel:

$$\sigma(x) = C_0(C_0 \cdot \varepsilon^* \cdot P(x) - \varepsilon^*) = C_0(S(x) - I)\varepsilon^* \quad (3.26)$$

unde I este tensorul de unitate de ordinul al patrulea.

Pe baza soluției lui Eshelby, tensorul $P^{(V_i)}(x)$ - conținând derivatele parțiale ale funcțiilor Green, pentru $\forall x \in (V_i)$, acest tensor este constant. Din această afirmație rezultă că și tensorul $S(x)$ este constant pentru punctele interioare ale incluziunii, adică $\forall x \in (V_i)$, deci pe baza ecuației (3.25) rezultă că deformațiile în interiorul incluziunii sunt uniforme $\varepsilon(x) = \varepsilon, \forall x \in (V_i)$, respectiv $\sigma(x) = \sigma, \forall x \in (V_i)$.

Pe baza soluției Eshelby, pot fi modelate nu numai incluziunile dar și neomogenitățile sau incluziunile neomogene înglobate în matricea materialului, prin utilizarea modelului de „incluziune echivalentă”. Această presupune echivalarea și modelarea elementului înglobat ca și incluziune (incluziune fictivă) în așa fel încât deformația proprie a incluziunii fictive să producă același câmp de tensiune $\sigma(x)$ ca și neomogenitatea reală având $\sigma^0(x) \neq 0$. [15]

Dacă C_0 (rigiditatea) este izotropă și V_i este un sferoid (corp format prin rotirea unei elipse în jurul unei axe, rezultând o formă apropiată de aceea a unei sfere), atunci rigiditate se definește doar prin coeficientul lui Poisson, iar forma elementului înglobat (incluziune) este dată prin raportul lățime/înălțime. Exprimarea tensorului Eshelby pentru diferite geometrii se regăsește în literatura de specialitate. Pentru o matrice izotropă infinită (nemărginită), în care sunt înglobate incluziunile sub formă de fibre (sferoid), tensorul 3D Eshelby dat de T. Mura conform [81] are forma:

$$S = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot S_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot S_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot S_{1212} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$S_{2211} = S_{3311} = \frac{\nu}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (3.33)$$

$$S_{2222} = S_{3333} = \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left(\frac{3}{4} + \frac{1 - 2 \cdot \nu}{2} \right) \quad (3.33)$$

$$S_{2233} = S_{3322} = \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{2} \right) \quad (3.33)$$

$$S_{2323} = \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{1 - 2 \cdot \nu}{2} \right) \quad (3.33)$$

$$S_{1212} = S_{1313} = \frac{1}{4}; S_{1111} = S_{1122} = S_{1133} = 0. \quad (3.33)$$

unde ν reprezintă coeficientul lui Poisson al matricei.

Această soluție analitică este valabilă, așa cum s-a menționat, în cazul unei singure incluziune sau în cazul unui compozit cu elemente înglobate foarte „dilate” (situate la distanțe semnificative unu față de celălalt), respectiv când matricea este infinit de mare. Prin urmare, nu se aplică direct în cazul unui RVE unde mărimea matricei este comparabilă cu mărimea incluziunii sau atunci când procentul de armare este mare, adică incluziunile exercită un efect semnificativ asupra celorlalte și asupra matricei (influență asupra câmpul de tensiuni și deformație). Utilizarea soluției Eshelby în vederea omogenizării materialelor polifazice presupune și alte ipoteze simplificatoare.

3.4.3 Modelul Mori-Tanaka

Teoria lui Eshelby este fundamentală în micro-mecanica compozitelor, permițând estimarea eficientă a modului de elasticitate a materialului, plecând de la morfologia și micro-structura acestuia. Totuși, această teorie neglijează efectul elementelor înglobate în matrice și este aplicabilă numai compozitelor cu incluziuni foarte „dilate”. [88] Acest lucru înseamnă practic că modelul nu ia în considerare interacțiunea incluziunilor, eforturile interfaciale, lucru care simplifică în mod deosebit problema analitică.

Extinderea teoriei la compozite ne-diluate este deci o problemă complexă. În realitate fiecare incluziune în matrice este afectată de câmpul de eforturi al matricei, care la rândul lui este influențat de prezența incluziunilor învecinate, adică prezența celorlalte incluziuni schimbă efortul atât în matrice cât și elemente înglobate. Mai mulți autori, precum Mori și Tanaka (1970), Brown și Clarke (1975), Mura (1982), Pedersen (1983) au contribuit la înțelegerea și cuantificarea acestui efect, îmbunătățind astfel aplicabilitatea și eficiența metodei Eshelby. [58][73]

Metoda Mori-Tanaka este deci un model tip Eshelby și reprezintă o extindere a acestuia, care rezolvă problema influenței incluziunilor învecinate, utilizată pentru efectuarea omogenizării și tranziției la scară a proprietăților materialelor polifazice nediluate.

A fost propusă în 1973 și reprezintă o abordare simplă pentru a corela deformațiile și tensiunile medii ale incluziunilor cu cele ale matricei. Cu câțiva ani în urmă, în 1987, Y. Benveniste a descoperit că modelul Mori-Tanaka poate fi reformulat prin utilizarea ideii de incluziune echivalentă exprimat printr-un tensor mult mai compact, numit tensorul Mori-Tanaka. Acest tensor, depinde doar de tensorul lui Eshelby și proprietățile elastice ale fazelor constituate, prin intermediul căruia pot fi determinate toate proprietățile elastice ale compozitului. [81]

Este o aproximație care descrie comportamentul fazelor într-un sistem bi-material: sistemul este alcătuit dintr-o matrice, care înglobează $n - 1$ elemente (incluziuni); fiecare element înglobat în RVE se comportă ca și cum ar fi fost izolat în matricea reală, ilustrat în Figura 3.7. Acest mediu (matricea fictivă) este considerat finit și legat de valoarea medie a câmpului de deformație a RVE-ului real, conform:

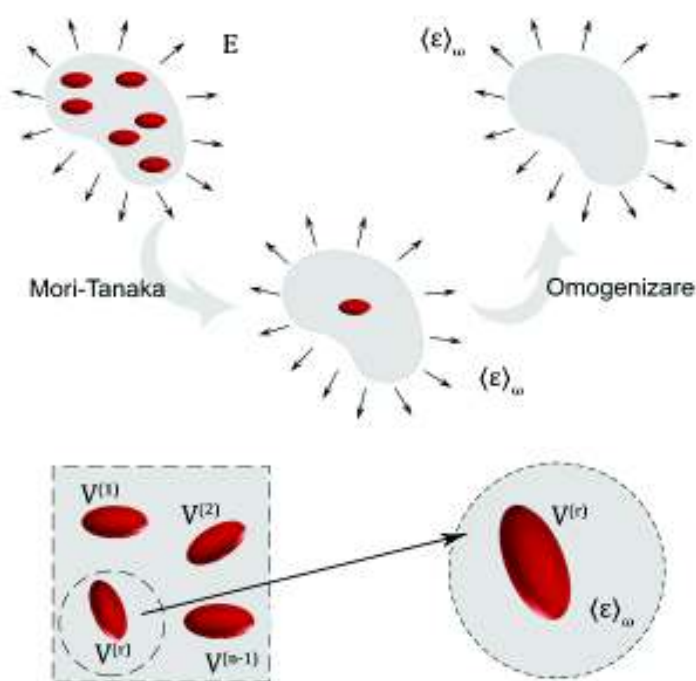
$$\hat{\varepsilon} = \langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon dV \quad (3.28)$$

adică deformația inițială introdusă în matricea fictivă $\hat{\varepsilon}$ este egală cu media valorii deformațiilor în matricea materialului eterogen (matricea reală) – §3.3 Teoria câmpului-mediului (Mean-Field Homogenization).

Astfel, problema se formulează după cum urmează: considerăm incluziunea neomogenă elipsoidală oarecare r , cu volum V_r , rigiditate C_r și $\varepsilon^* \neq 0$, înglobată în matricea materialului care are volumul V și rigiditatea C , în care mai sunt înglobate $n -$

1 astfel de elemente. Incluziunea neomogenă r se introduce (se izolează) într-o matrice fictivă care are o deformație inițială $\varepsilon \neq 0$, apărută înainte de această operațiune (introducerea r). Această deformație inițială este calculată ca și valoarea medie a câmpului de deformație apărut în matricea reală V . Astfel, aproximația Mori-Tanaka, prin medierea câmpului de deformație a matricei reală, ia în considerare prezența celorlalte neomogenități și influența acestora asupra neomogenității r izolat.

Figura 3.7 – Ilustrarea modelului M-T (Mori-Tanaka). Izolarea incluziunii într-o matrice fictivă, luând în considerare efectul celorlalte incluziuni prin considerarea unei deformații inițiale produse în matricea reală.



Corelarea eforturilor și deformațiilor medii ale incluziunilor cu cele ale matricei, conform M-T se realizează deci prin intermediul tensorului de ordinul al patrulea care se poate scrie sub forma:

$$\varepsilon_f = T \cdot \varepsilon_m \quad (3.29)$$

$$\sigma_f = A \cdot \sigma_m \quad (3.30)$$

unde este notat în vederea simplificării și înțelegerii mai bună a formulei cu indicele f incluziunea și cu m matricea compozitului, iar T și A sunt tensorii care leagă efortul și deformația medie a matricei cu cel al incluziunii și se poate exprima prin:

$$[T_{ij}] = \{[I_{ij}] + [S_{ik}] \cdot [D_{kp}]_m \cdot ([C_{pj}]_f - [C_{pj}]_m)\}^{-1} \quad (3.31)$$

$$[A_{ij}] = [C]_m \cdot [T_{kp}]^{-1} \cdot [D_{pj}]_f \quad (3.32)$$

unde S este forma simplificată a tensorului de ordinul al patrulea a lui Eshelby, I este tensorul de unitate de ordinul al patrulea, $[D]_k$ este matricea de complianță și $[C]_k$ matricea de rigiditate (pentru fiecare fază constituantă, f incluziunea, respectiv m matricea compozitului).

Fără evidențierea dimensiunii tensorilor, ecuațiile (3.31) și (3.32) au forma:

$$T = \{I + S \cdot D_m \cdot (C_f - C_m)\}^{-1} \quad (3.33)$$

$$A = C_m \cdot T^{-1} \cdot D_f \quad (3.34)$$

Considerând situația tratată la §3.4.2 și ecuația (3.27), respectiv (3.34), tensorul A poate fi scrisă sub forma:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$A_{11} = \frac{E^m}{E_{11}^f} \left[1 + \frac{\nu^m \cdot (\nu^m - \nu_{12}^f)}{(1 + \nu^m) \cdot (1 - \nu^m)} \right] \quad (3.35)$$

$$A_{12} = \frac{E^m}{E_{22}^f} \frac{\nu^m \cdot (1 - \nu_{23}^f)}{2(1 + \nu^m)(1 - \nu^m)} - \frac{E^m}{E_{11}^f} \frac{\nu_{12}^f}{(1 + \nu^m)(1 - \nu^m)} + \frac{\nu^m}{2(1 - \nu^m)} \quad (3.35)$$

$$A_{22} = \frac{E^m}{E_{22}^f} \frac{(\nu_{23}^f - 3)}{8(\nu^m - 1)(\nu^m + 1)} + \frac{E^m}{E_{11}^f} \frac{\nu_{12}^f \nu^m}{2(\nu^m - 1)(\nu^m + 1)} + \frac{(\nu^m + 1)(4\nu^m - 5)}{8(\nu^m - 1)(\nu^m + 1)} \quad (3.35)$$

$$A_{32} = \frac{E^m}{E_{22}^f} \frac{(3\nu_{23}^f - 1)}{8(\nu^m - 1)(\nu^m + 1)} + \frac{E^m}{E_{11}^f} \frac{\nu_{12}^f \nu^m}{2(\nu^m - 1)(\nu^m + 1)} + \frac{(\nu^m + 1)(1 - 4\nu^m)}{8(\nu^m - 1)(\nu^m + 1)} \quad (3.35)$$

$$A_{44} = \frac{G^m}{G_{23}^f} \frac{1}{4(1 - \nu^m)} + \frac{(3 - 4\nu^m)}{4(1 - \nu^m)} \quad (3.35)$$

$$A_{55} = \frac{G^m + G_{12}^f}{2G_{13}^f} \quad (3.35)$$

$$A_{13} = A_{12}; A_{31} = A_{21}; A_{33} = A_{22}; A_{23} = A_{32}; A_{66} = A_{55}. \quad (3.35)$$

unde E și G sunt modulele de elasticitate, longitudinal, respectiv transversal al materialelor (m matrice și f incluziune) și ν coeficientul lui Poisson.

Folosind ecuațiile prezentate, se poate determina modulul de elasticitate efectiv al compozitului, prin:

$$C_{eff} = (f_f D_f + f_m D_m A)(f_f I + f_m A)^{-1} \quad (3.36)$$

unde f este fracția volumică corespunzătoare materialului precizat prin indice m matrice și f incluziune ($f_f + f_m = 1$).

Modelul M-T pe baza MFH, ia în considerare influența elementelor înglobate și astfel dă o aproximație mai precisă în ceea ce privește proprietățile generale ale materialului eterogen. Teoretic acest model este limitat la fracțiuni de volum moderate [43][146] (mai puțin de 20-25%), dar, în practică, poate da predicții satisfăcătoare dincolo de această limită. Această afirmație se bazează atât pe considerentele din literatura de specialitate, cât și pe calculele și analizele efectuate în lucrările [110][111].

Ecuatiile prezentate până acum sunt determinate pe baza proprietăților elastice ale constituenților. Metodele de omogenizare în cazul unui model elasto-plastic utilizează un material de referință fictiv, ipoteze simplificate și alte metode concepute în acest sens.

În ciuda eficienței ridicate a metodelor Eshelby-Mori-Tanaka, eficiență care se datorează explicității soluției și expresiilor matematice care poate fi evaluate într-un număr finit de operații, această abordare poate să conducă la soluții neașteptate și erori mari, de exemplu, în cazul în care matricea de rigiditate a compozitului este asimetrică. Această condiție de simetrie, conform Y. Benveniste [10] este satisfăcută numai în cazul compozitelor cu două faze (matrice și incluziune) sau în cazul unui compozit polifazic cu condiția ca incluziunile să aibă formă similară și aceeași orientare. [81]

3.5 Metode numerice de analiză. Metoda elementului finit

3.5.1 Prezentarea generală a metodei

Orice tip de analiză, fie vorba de metodă analitică sau numerică, presupune parcurgerea unor etape principale, precum (e_1) transformarea sistemului fizic (problema reală) într-un model conceptual prin intermediul adoptării ipotezelor simplificatoare alese; (e_2) formularea modelului matematic bazat pe modelul conceptual = echivalarea cu ecuații care deservește la rezolvarea problemei; prin intermediul rezolvării acestor ecuații, obținem răspunsul problemei formulată; în cazul metodelor numerice, comportarea acestui model adesea este descrisă prin utilizarea

ecuațiilor diferențiale cu condiții de limită (marginale) impusă; (e₃) interpretarea rezultatelor.

Este recunoscut faptul că predicțiile analitice nu tot timpul sunt în directă corelație cu rezultatele experimentale, adică cu comportarea reală, ceea ce a condus la căutarea și conceperea altor metode mai exacte.

Putem considera că metoda elementului finit (MEF) a apărut ca o consecință a necesității de a calcula structuri complexe pentru care metodele analitice de calcul nu sunt operabile. [40] Deși această soluție poate conduce la rezultate mai bune și oferă informații suplimentare în ceea ce privește comportarea materialului în comparație cu metodele analitice sau semi-analitice, presupune ecuații diferențiale complicate, respectiv timp și resurse computaționale serioase.

Apariția și formularea MEF nu poate fi atribuită unei singure persoane, chiar mai mult de atât, un precursor al conceptului poate fi considerat procedeul utilizat de către Arhimede (aproximativ în 287 î.Hr.) pentru determinarea numărului π , obținut prin descompunerea cercului în sub-elemente. Se consideră totuși că bazele analizei cu elemente finite au fost pentru prima dată formulate în 1943 de către matematicianul german-american Richard Courant (1888-1972, New York). R. Courant, îmbinând metoda Ritz cu analiza numerică în probleme de calcul variațional și minimizare, a obținut soluții satisfăcătoare pentru analiza sistemelor cu vibrații. [13] Totodată, formularea metodei așa cum se cunoaște și în prezent (bazat pe metoda deplasărilor) a fost realizată de către M. Jonathan Turner⁴, definitivată în perioada 1953 – 1959, iar folosirea prima dată a termenul de „element finit” a fost în anul 1960 de către R. W. Clough.

Începând cu anii '70, metoda elementelor finite a fost folosită la rezolvarea celor mai complexe probleme din domeniul structurilor elastice continue, de la construcțiile civile, industriale sau de baraje până la construcțiile de nave maritime, respectiv cosmice. [13]

Putem considera deci, că această metodă, din punct de vedere al aplicabilității, poate fi extinsă în orice domeniu de activitate. Pe lângă analiza structurală, în scopul

⁴ M. Jonathan Turner (șeful diviziei Structural Dynamics Unit Boeing) – Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., and Topp, L. J., "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures," *Journal of the Aeronautical Sciences*, Sept. 1956. [83]

determinării câmpurilor de deplasări și tensiuni, această metodă se poate utiliza pentru analize termice, electromagnetice, biomecanică sau pentru analiza mecanică a fluidelor. Așadar, metoda elementului finit, notat în continuare MEF, este o metodă generală (aproximativă) de rezolvare a unor fenomene fizice, care sunt descrise din punct de vedere matematic de ecuații diferențiale. Rezolvarea problemei presupune integrarea acestora, în condiții la limită impusă.

Această metodă aproximativă presupune echivalarea mediului continuu cu un model discret (procedură denumită discretizare) și transformarea ecuațiilor diferențiale în ecuații liniare. Discretizarea reprezintă împărțirea mediului continuu analizat în subdomenii, adică în elemente simple numite elemente finite. Aceste elemente sunt conectate și interacționează doar prin intermediul punctelor nodale numite noduri, caracterizate de un număr finit de grade de libertate (obținând astfel un sistem discret). Mărimile definite prin funcții continue (o infinitate de valori) se limitează deci, la un număr finit de necunoscute (grade de libertate), alese arbitrar de analist (gradele de libertate definesc variația spațială a unui domeniu de analiză). [28] Așadar, rezolvarea problemei în mod analitic este practic imposibil.

Evoluția metodei și rezolvarea celor mai complexe probleme utilizând MEF se datorează în primul rând dezvoltării accelerate a calculatoarelor și implementării metodei în proiectarea asistată de calculator (CAE - Computer-Aided Engineering). Apariția rapidă (1965-1969 NASTRAN - NASA Structural Analysis, comercializat de MSC Software [18]) a implementării metodei în programe de calcul se poate explica prin spectrul larg de aplicabilitate a conceptului și posibilitatea utilizării aproape în toate domeniile ingineriei. Acest lucru explică și numărul relativ mare de software prezente deja pe piață, dintre care cele mai eficiente și renumite utilizând MEF sunt NASTRAN (1965), ANSYS (1970), ADINA (1975) sau ABAQUS (1978).

În momentul de față se utilizează mai multe formulări ale metodei elementului finit, fiecare având avantajele și dezavantajele ei. În programele MEF actuale se folosește și în prezent adesea modelul de deplasare, pentru care necunoscutele sunt deplasările nodale.

3.5.2 Procedura simplificată MEF

În vederea aplicării procedurii simplificată MEF (metoda directă) se consideră cazul unei bare simplă în consolă, într-un sistem cartezian xOy , cu secțiune constantă și lungime L , încastrată și supusă la întindere axială conform Figura 3.8. Fiecare punct al domeniului $[0, L]$ prezintă o deplasare pe direcția Ox . Deplasările posibile ale nodurilor (parametru denumit grade de libertate) se notează în continuare cu $u(x)$. Rezolvarea problemei reprezintă determinarea câmpului de deplasări și de tensiuni pentru problema formulată. Pe baza formulării simple MEF ecuațiile diferențiale descriu deformația axială în acest caz astfel [6]:

$$-\frac{d}{dx}\left(EA \frac{du}{dx}\right) - f = 0; \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.37)$$

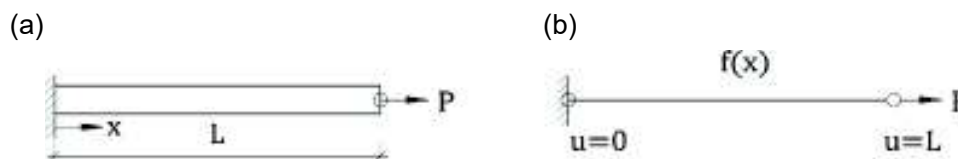
unde E reprezintă modulul, A este aria secțiunii a barei, f este forța distribuită, iar L este lungimea acesteia. Condițiile limită în cazul de față se formulează:

$$\left[\left(EA \frac{du}{dx}\right)\right]_{x=L}^{u(0)=0} = P \quad (3.38)$$

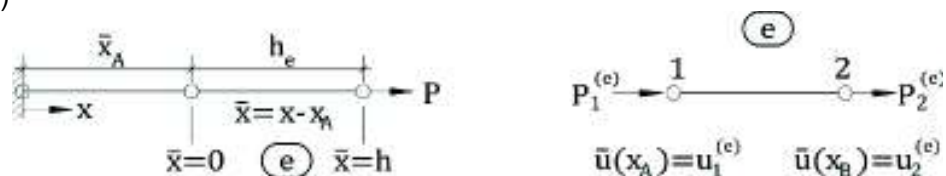
În formularea matematică, prezentată schematic în Figura 3.8 (b), această bară se extinde pe domeniul $[0, L]$ de-a lungul axei x , iar P reprezintă forța de întindere. **Studiul structurii** sau a sistemului și alegerea modelului și al tipului de element finit reprezintă primul pas, care este esențial în cazul MEF. Pe lângă cel prezentat (element finit liniar 1D), forma elementului finit poate să fie și parabolic, cubic, 2 sau 3D.

Metoda presupune în următorul pas, împărțirea acestui domeniu $[0, L]$ în subdomenii, adică aplicarea procedurii de **discretizare** a barei în elemente finite. Discretizarea modelului conceptual (model matematic) este prezentat în Figura 3.8 (c).

Figura 3.8 – Procedura MEF simplificată; (a) schema de grindă reală; (b) modelul matematic, considerând grinda ca și element linear; (c) discretizare în elemente finite e .



(c)



Conform acestei figuri, se consideră elementul finit oarecare e (rezultat după discretizare) la care valoarea deplasării este necunoscută (în cazul nodul din încastrare gradul de libertate este zero, fiind încastrat, adică deplasarea nu reprezintă parametru necunoscut). Pentru obținerea ecuațiilor în cazul unui astfel de element finit, o formă integrală a ecuației diferențiale (3.37) trebuie folosită, care este obținută prin integrarea produsului:

$$\int_{x_A}^{x_B} v \left[-\frac{d}{dx} \left(EA \frac{du}{dx} \right) - f \right] dx = 0 \quad (3.39)$$

unde v - funcție de ponderare, iar ecuația (3.39) se numește „forma slabă”, deoarece în cazul funcționalei, conținând ecuațiile diferențiale, soluția $u(x)$ nu satisface aceste ecuații diferențiale pentru fiecare valoare a lui x cuprins în domeniul $[0, L]$, doar în sensul unei medieri pe acest domeniu. Se consideră că are „forma exactă” atunci când, ecuațiile diferențiale a funcționalei sunt valabile pentru toate punctele (oricare punct) al domeniului impus. Prin urmare, este mai ușor să găsim o soluție „slabă” decât una „puternică” sau „exactă”.

În nodul unui astfel de element finit, rezultat după procedura de discretizare, este valabilă relația:

$$P^{(e)} = C^{(e)} \cdot u^{(e)} \quad (3.40)$$

adică vectorul forțelor P și vectorul deplasărilor u nodale pentru elementul finit e sunt legate prin intermediul matricei de rigiditate C a acestuia. Matricea de rigiditate $C^{(e)}$, pentru fiecare element finit în parte, se poate determina pe baza ecuațiilor fundamentale a teoriei elasticității. Bineînțeles, în caz general, într-un nod sunt n elemente concurente și fiecare acționează cu o forță în nodul respectiv la care se adaugă și forțele exterioare dacă ele acționează în acel nod. Condiția de echilibru stabilește ca suma tuturor forțelor în nodul considerat este zero.

Etapa prezentată, adică **studiul elementelor finite** (construirea ecuațiilor) pe baza metoda deplasărilor poate fi considerată una simplă și ușoară, însă utilizarea și aplicarea ei este posibilă doar la structuri sau sisteme alcătuite din bare. Din acest motiv, în cazul problemelor și structurilor complexe care nu satisfac condiția menționată, pentru constituirea ecuațiilor, se poate utiliza formulările bazate pe metode variaționale (principiul lucrului mecanic virtual, teorema minimului energiei interne de deformație), metoda reziduurilor (când cealaltă metodă nu poate fi aplicată) sau formularea bazată pe bilanțul energetic (pe baza primei legi a termodinamicii). [40][80]

Rezolvarea problemei prin MEF, după discretizare și stabilirea ecuațiilor elementelor finite, în mod automat presupune translatarea acestora în sistem global, adică **transformarea matricei de rigiditate** fiecărui element finit (sistem local) în sistemul global și **asamblarea elementelor finite** (asamblarea matricelor de rigiditate sau a ecuațiilor din punct de vedere matematic). Astfel, funcțiile necunoscute trebuie să aibă valori egale în noduri comune în vederea efectuării asamblării.

După această operațiune, se obține sistemul general de ecuații:

$$P_g = C_g \cdot u_g \quad (3.41)$$

unde u_g este un vector conținând funcțiile necunoscute (deplasările) problemei.

Rezolvarea acestuia (3.41) se poate realiza prin adoptarea metodelor numerice cunoscute în domeniul matematicii aplicate, precum metode de eliminare directă (eliminarea Gauss, Gauss-Jordan etc.) sau metode iterative (aproximative), de exemplu metoda Jacobi, Gauss – Seidel, metoda relaxării etc. Astfel, se obțin necunoscutele problemei, adică valoarea gradelor de libertate din noduri. [114][40]

3.5.3 Aspecte privind analiza mortarelor cu MEF

Proiectarea și analiza preliminară a materialelor compozite se poate efectua bazându-se pe aproximări simple privind geometria, precum și condițiile de încărcare și de limită. În acest sens, pot fi aplicate metode relativ simple de analiză, în cazul cărora calculele pot fi efectuate pur și simplu folosind algebra elementară. Aceste aproximări bineînțelese au o serie de deficiențe care pot fi eliminate prin adoptarea metodelor de analiză complexe, precum analiza MEF sau alte metode care au la bază principiile micro-mecanicii avansată a materialelor compozite.

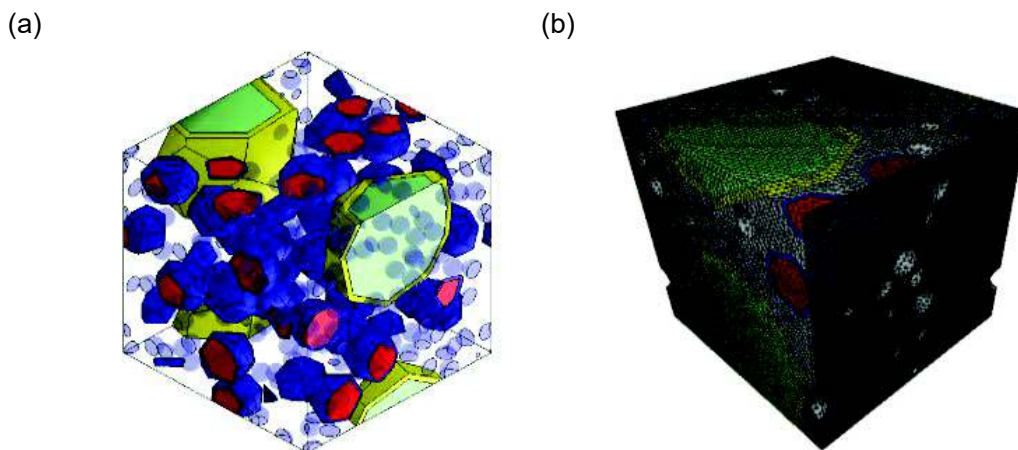
Deși în cazul problemei unei bare, prezentată în secțiunea anterioară §3.5.2 (Procedura simplificată MEF), soluția sau forma „exactă” este cunoscută, cele mai multe probleme ale mecanicii compozitelor nu are o soluție exactă și proiectarea sistemelor din materiale compozite necesită implementarea unor modele constitutive bine alese pentru descrierea comportării acestora.

Așadar, cum reiese din cele prezentate, în cazul unui material compozit, în special în cazul compozitelor armate cu fibre discontinue și distribuție aleatorie, în cazul MEF modelul construit trebuie împărțit (discretizat) într-un număr foarte mare de elemente finite (n elemente finite), care în mod automat presupune un număr mare ($n + 1$) de noduri, adică ecuații și calcule complexe (Figura 3.9) pentru obținerea unor rezultate satisfăcătoare. Această are ca și consecință necesitatea utilizării a unor programe de calcul, adică implicarea proiectării asistată de calculator (CAE), fără ajutorul căruia acest tip de analiză și verificare ar fi practic imposibilă. De asemenea, putem spune că progresele noi în programele comerciale MEF, precum și capacitatea satisfăcătoare sau chiar mare ale calculatoarelor personale, au făcut accesibilă proiectantului efectuarea analizei detaliată a compozitelor prin această metodă. O astfel de analiză, pe lângă cunoașterea bazei metodei, presupune și înțelegerea solidă a micro-mecanicii avansată a compozitelor.

Întrucât programele de calcul MEF nu analizează problema reală, ci folosește un model conceput și ales de către utilizator, rezultatele pot fi confirmate prin încercări și teste sau nu, în funcție de conceperea acestui model. O modelare MEF corectă, ca și orice altă analiză numerică și nu numai, presupune deci cunoașterea bazelor teoretice ale metodei. Chiar și în cazul utilizării programelor specializate, MEF presupune întemeierea cunoașterii și înțelegerea bună a conceptelor de inginerie, prin care nu se înțelege în nici un caz doar desenarea și modelare 3D realizată prin intermediul unui software. Robert D. Cook⁵ considera că „În timp ce metoda elementului finit poate face ca un inginer bun să devină mai bun, ea poate face ca un inginer slab să devină mai periculos. Se pot face greșeli cu mai multă încredere decât până acum”.

⁵ *Concepts and Applications of Finite Element Analysis.*

Figura 3.9 – Analiza mortarului simplu [110], modelând ca și material compozit alcătuit din trei faze constituente: matrice cimentoasă (pasta de ciment), agregat (nisip) și ITZ; (a) RVE realistic 3D; (b) RVE discretizat în 867 309 de elemente finite.



În momentul de față sunt deja disponibile într-un număr destul de mare programele de calcul care se bazează pe MEF, cu potențial ridicat și eficiență crescută, utilizate în diferite analize inginerești. Câteva dintre acestea, cum ar fi ANSYS sau ABAQUS, permit efectuarea unei analiză asupra materialelor compozite și acceptă ecuații constitutive stabilite de utilizator. Totodată, datorită complexității problemei în special în cazul compozitelor precum mortarul armat dispers cu fibre (compozite cu elemente înglobate distribuite aleatoriu), construirea unui RVE realistic, discretizarea într-un număr suficient de elemente și rularea propriu-zisă a analizei presupune timp foarte îndelungat. O soluție în vederea reducerii timpului de analiză MEF, atât din punct de vedere al utilizatorului privind conceperea și construirea RVE-ului, cât și din punct de vedere al timpului de calcul, reprezintă utilizarea programelor optimizate și specializate, precum Digimat. Primul program comercial MEF conceput se datorează aceleiași companie, și se axează pe modelarea multi-scalară a materialelor și sistemelor materiale complexe. Acest instrument, cuprinde atât modulul care permite efectuare unei analize semi-analitică bazată pe teoriile și modelele prezentate în acest capitol, cât și un modul bazat pe MEF. Acest software a fost studiat în vederea efectuării unor analize asupra mortarelor armate cu fibre și va fi implementat și prezentat în Capitolul 5 utilizând datele programului experimental.

Indiferent de softwareul ales sau metoda aplicată, rezultatele și eficiența utilizării acestora, adică analiza și testarea virtuală, depinde în cea mai mare măsură de utilizator, adică de proiectant și de nivelul de analiză, respectiv complexitatea

modelului conceptual. Așadar, trebuie avut în vedere că rezultatele nu în toate cazurile sunt în directă corelație cu testele de laborator, dar acest lucru nu se datorează ineficienței metodei utilizată, ci se poate explica prin adoptarea succesiunii de ipoteze simplificatoare, necesare în primul rând pentru reducerea timpului de calcul.

Acele fenomene complexe care au loc la interfața fazelor constituente, prezentate și în lucrarea de față, determină și influențează în mare măsură comportamentul materialului compozit (comportament real). Aceasta este însă adesea neglijată în analiza și testarea virtuală, fapt care se datorează în primul rând lipsei unei experiențe și date exacte, respectiv datorită creșterii complexității și amploarea problemei care implică resurse computaționale avansate. Între simplificările des adoptate în acest caz se numără și considerarea legăturii între faze constituente ca fiind perfectă. Având în vedere că cedarea materialului și scăderea performanței acestuia se datorează în mare măsură imperfecțiunii privind adeziunea și legătura fazelor, putem să spunem că aceasta este o idealizare prea îngăduitoare privind comportarea sistemului compozit. Totodată, pentru o estimare și verificare preliminară chiar și această simplificare poate avea rezultate satisfăcătoare sau chiar bune.

Importanța modelării și analizei virtuală chiar și într-un mod simplificat a materialelor compozite cu fibre discontinue, care include modificarea fracțiunii de volum a elementelor înglobate, forma, natura etc. afectează semnificativ proprietățile mecanice și răspunsul compozitului rezultat [2]. Așadar, testarea fizică a tuturor „scenariilor”, adică combinațiilor aproape infinite, presupune timp foarte îndelungat și cantitate mare de materii prime. Toate aceste afirmații sunt formulate pe baza considerentei că analiza virtuală poate fi aplicată ca și una preliminară sau una complementară, iar aceasta nu înlocuiește în nici un caz încercările de laborator dar pot fi folosite concomitent pentru reducerea numărului probelor de testare.

4 CAPITOL 4

PROGRAMUL EXPERIMENTAL

4.1 Aspecte generale

Comportarea materialelor de construcții cimentoase a fost studiată de mult timp și se știe că cele nearmate, precum betonul sau mortarul simplu prezintă o caracteristică nedorită, și anume, se caracterizează printr-o comportare fragilă și cedare bruscă. Adăugarea unor fibre în compoziția acestora modifică acest caracter, iar ruperea și comportarea la solicitări mecanice poate deveni mai ductilă. Așadar, adăugarea unor fibre scurte, precum fibre de oțel, polipropilenă, carbon ș.a.m.d. au ca principal avantaj sporirea ductilității și evitarea ruperii casante.

Pentru îmbunătățirea compoziției mortarelor tradiționale și efectuarea studiului asupra eficienței testării virtuale, programul experimental a fost axat pe realizarea și încercarea mai multor tipuri de rețete de mortar. Studiul comportamentului și performanța mecanică ale mortarelor au fost evaluate prin supunerea acestora la eforturi de compresiune și întindere uni-axială, respectiv încovoiere în trei puncte. Pe lângă acestea, aderența la suport și modulul de elasticitate a materialelor au fost, de asemenea, determinate.

Printre obiectivele efectuării încercărilor și realizarea programului experimental se numără:

- comparația performanței mortarelor armate cu fibre cu mortarul standard (materialul de referință care reprezintă matricea de bază);
- comparația performanțelor obținute cu diferite tipuri de fibre, având aceleași matrice de bază;
- evaluarea posibilității încercării acestor tipuri de materiale la întindere uni-axială;
- simularea și testarea virtuală a materialelor compozite cu fibre discontinue și orientarea aleatorie.

Studierea și analiza convențională privind performanța mecanică a betoanelor și mortarelor, se bazează, aproape exclusiv, pe determinarea rezistenței la compresiune, caracteristică folosită ca mijloc de precizare a calității acestora. Alte

proprietăți, cum ar fi rezistența la întindere, modulul de elasticitate, durabilitatea etc., sunt determinate mai des empiric, folosind rezistența la compresiune sau rezistența la încovoiere, în special în cazul mortarului. Cu toate acestea, apariția materialelor de construcții cimentoase de înaltă performanță și cele armate cu diferite tipuri de fibre ne-au determinat să privim mai îndeaproape alte proprietăți decât rezistența la compresiune, întrucât performanța acestora deja nu se mai poate caracteriza doar prin această rezistență. În acest sens s-a propus efectuarea testelor de laborator, rar folosite în cazul mortarelor: încercarea la întindere directă și determinarea modulului de elasticitate pe cală experimentală, caracteristici necesare și în cazul efectuării testelor virtuale.

Epruvetele de mortar simplu (material de referință, martor) și armate cu diferite tipuri de fibre discontinue au fost realizate în condiții de laborator, executate în laboratorul de Materiale de Construcții, Facultatea de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, prezentat mai detaliat în secțiunea §4.3.

Au fost concepute și testate în total cinci compozite care vor fi prezentate în această lucrare, testarea fiind realizată în două etape, prin modificarea fracției de volum a fibrelor. Ca studiu preliminar, a fost investigat efectul unui procent minim de armare, recomandat de producător (prima etapă). O parte din rezultatele obținute au fost publicate de către autor în [111]. Acest studiu a fost efectuat în vederea îmbunătățirii tezei de doctorat, și va fi prezentată atât aparatura utilizată, cât și rezultatele obținute, la care se va face referire prin sufixul (1) la denumirea rețetelor (prima etapă). În etapa a doua, a fost efectuată testarea compozitelor, folosind aceleași matrice de bază și tipuri de fibre, modificând doar cantitatea adăugată (procent de armare), și testarea unui compozit nou față de prima etapă, folosind fibre de carbon. Rețetele testate în acest caz (etapa a doua) sunt evidențiate prin adăugarea sufixul (2). Informațiile legate de fibre și prezentarea detaliată ale acestora se regăsește în subcapitolul următor.

4.2 Materiale utilizate la realizarea mortarelor

Descrierea materialelor utilizate, respectiv prepararea mortarelor se referă atât la prima etapă, cât și la cea de-a doua, neavând diferențe între acestea sau lotul din care provin materialele.

4.2.1 Ciment Portland compozit

Cimentul utilizat în programul experimental a fost un ciment Portland compozit aditivat: „Structo Plus” CEM II/B-M (S-LL), produs de Holcim România, cu rezistență la compresiune minimă standard de 42.5 N/mm² (declarația producătorului). Cimentul are în compoziție: 65 – 79% clincher (K), 21 – 35% zgură de furnal (S) și calcar (LL) și componente auxiliare minore cuprinse între 0 – 5% [153]. Cimentul respectă toate prevederile SR EN 197-1 din 2011 privind compoziția și criteriile de conformitate [161].

4.2.2 Apă

La prepararea mortarelor s-a folosit apa potabilă din rețeaua publică. Cantitatea a fost stabilită în funcție de consistența mortarului standard.

4.2.3 Agregat. Compoziția granulometrică a nisipului

Nisipul utilizat ca material de masă în compoziția mortarului satisface condițiile de aspect, natura mineralogică, conținutul de impurități, granulozitate ș.a.m.d., privind specificațiile standardului SR EN 13139 [180].

În ceea ce privește compoziția granulometrică a nisipului utilizat, aceasta a fost determinată prin cernerea mecanică a unei cantități de 1 kg nisip printr-un set de site care respectă prevederile SR EN 932-5/2012 [188]. În urma efectuării cernerii și cântărirea restului de nisip pe fiecare sită, au fost înregistrate datele prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 – Raport granulozitate în urma procedurii de cernere, conform EN 933-1.

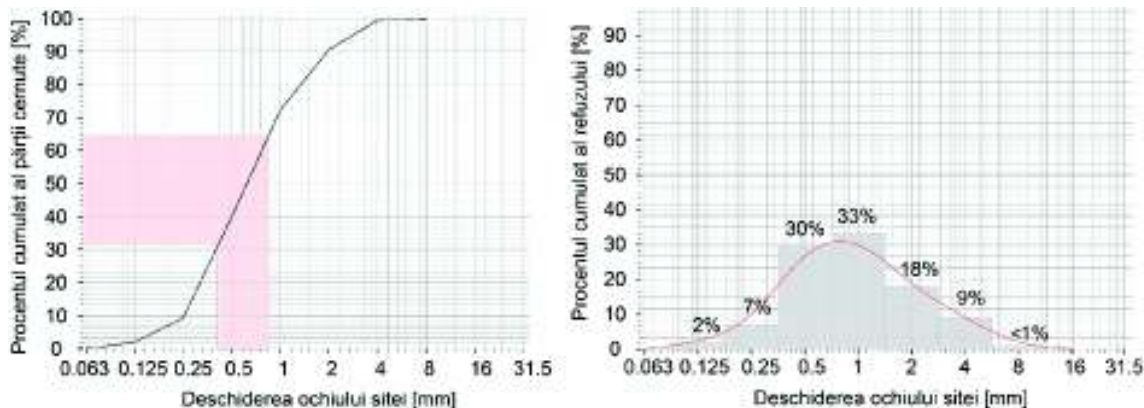
Deschiderile ochiurilor sitelor [mm]	Masa de refuz [kg]	Procentul de refuz *	Procentele cumulate ale cernutului **
> 4.00	0.0057	0.567	99.432
2.00 – 4.00	0.0883	8.794	90.637
1.00 – 2.00	0.1845	18.376	72.261
0.50 – 1 .00	0.3250	32.370	39.890
0.25 – 0.50	0.3075	30.627	9.263
0.125 – 0.25	0.0728	7.251	2.012
< 0.125	0.0202	2.012	0
	1.00	100	0

* Procentul de refuz – procentul față de proba luată în lucru;

** Procentele cumulate ale cernutului – trecerea cumulată prin site în procente.

Pe baza datelor din Tabelul 4.1, rezultatele granulometriei sunt prezentate grafic în Figura 4.1, din care rezultă granulozitatea și concentrația granulației (histograma).

Figura 4.1 – Curba granulometrică și histograma granulației.



Pe baza curbei granulometrice a fost determinată modulul de finețe rezultând valoarea de 3.86, respectiv gradul de uniformitate care este egal cu 36%.

În cazul materialelor de construcții cimentoase, precum betonul, a fost constatată că rezistența la întindere este puternic influențată de proporția nisip-pietriș. Experimentele au arătat că odată cu creșterea raportului volumic al agregatului grosier, rezistența la întindere este redusă, respectiv că această caracteristică este mai accentuată în cazul agregatului cuarț decât în cazul calcarelor. Diferența dintre comportamentul la întindere, folosind cele două tipuri de rocă, este probabil să fie explicată de modul de elasticitate diferit.

De asemenea, a fost demonstrat faptul că în cazul unui raport apă-ciment dat, nisipul de concasaj întotdeauna conduce la obținerea unei rezistențe la întindere mai mare decât în cazul folosirii celui natural cu formă regulată-sferică. În timp ce granulele sferice cu suprafață netedă îmbunătățesc rezistența la compresiune, cele de concasaj cu muchii și suprafață rugoasă conduc la creșterea rezistenței la întindere. Cu toate acestea, nisipul cu suprafață foarte netedă este mai puțin utilizat datorită lucrabilității mai scăzute, care poate fi remediată numai prin folosirea unei cantități mai mare de ciment sau adoptarea unui raport mai mare de apă-ciment care are ca și consecință alte efecte nedorite.

În cazul mortarelor, obiectivul principal la alegerea agregatului (nisip) reprezintă fezabilitatea din punct de vedere economic, adică obținerea lucrabilității și posibilitatea aplicării corespunzătoare scopului sau domeniului urmărit, folosind un raport apă-liant și o cantitate de ciment minimă.

4.2.4 Alegerea fibrelor și caracteristicile acestora

În programul experimental s-a propus realizarea și testarea mortarelor armate dispers, folosind trei tipuri de fibre discontinue, și anume: fibre de oțel, polipropilenă și carbon (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Aspectul fibrelor utilizate în programul experimental. [159][160][199]







Alegerea celor trei tipuri de fibre se bazează pe cercetările teoretice ale autorului și informațiile insuficiente, privind comparația și aplicabilitatea acestora în cazul mortarelor, comparativ cu alte tipuri de fibre sau în comparație cu alt tip de matrice, precum betonul. Astfel, pot fi comparate tipurile principale de fibre și compozitele obținute din punct de vedere tehnico-economic.

4.2.4.1 Fibre de oțel RFC

Fibrele de oțel au fost oferite de către firma RomFracht Group (RomFracht Fibre) și s-a ales varianta RFC 45/50. S-a optat pentru utilizarea fibrelor de oțel întrucât sunt cele mai utilizate tipuri de fibre pe plan mondial și constituie tipul de armătură principală în armarea dispersă. Utilizarea acestui tip de fibră aduce cu sine câteva avantaje, cum ar fi cost scăzut, mortar de calitate cu posibilitate de armare în zone greu accesibile (a se vedea §2.6 Domenii de utilizare ale mortarelor armate cu fibre), timp redus în ceea ce privește turnarea ș.a.m.d.

Avantajele și proprietăți principale ale fibrelor de oțel RFC 45/50 RomFracht Fibre conform [159], sunt prezentate în Tabelul 4.2.

Tabelul 4.2 – Avantajele utilizării fibrelor de oțel RFC 45/50 RomFracht în mortare și materiale de construcții cimentoase, respectiv proprietățile principale ale acestora. [159]

	<i>Avantaje</i>	<p>îmbunătățirea caracteristicilor materialului de bază, precum:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ reducerea contracției plastice, termice și a dilatării în stare întărită; ▪ creșterea rezistenței la impact și uzură; ▪ creșterea capacității portanță; ▪ creșterea durabilității; ▪ reducerea apariției fisurilor; ▪ creșterea omogenității, ductilității și elasticitatea matricei; ▪ creșterea rezistenței la șocuri termice.
	<i>Aplicații</i>	<p>sunt folosite în principal în aplicațiile care necesită o armare dispersă cu ductilitate și elasticitate sporită:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ lucrări de sub-turnare; ▪ reparații locale ale structurilor degradate de beton/beton armat; ▪ reabilitarea rosturilor la structuri de zidărie; ▪ lucrări de zidărie și îmbinări între diferite tipuri de materiale; ▪ elemente prefabricate; ▪ căptușirea tunelurilor; ▪ alee, piste, pardoseli, pavele și alte aplicații la nivelul solului
	<i>Mod de utilizare</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dozajul recomandat: 15 – 40 kg/m³; ▪ se adăugă fie direct în stația, fie în cifă; ▪ în cazul dozajelor mari se recomandă utilizarea unui fluidizant.
	<i>Proprietăți fizice</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Material: oțel; ▪ Culoare: gri; ▪ Forma: cu ciocuri, capete îndoite; ▪ Densitate: 7.9 g/cm³; ▪ Absorbție: nulă; ▪ Rezistența la rupere: min. 1 100 N/mm²; ▪ Lungime: 50 mm; ▪ Diametru: 1.05 mm.

În vederea utilizării acestor fibre de oțel în domeniul construcțiilor este necesară și obligatorie atestarea conformității, cu respectarea prevederilor specificate în

standardul SR EN 14889-1 [182][27]. Fibrele utilizate în programul experimental, produse la RomFracht, au certificări de produs CE conform SR EN 14889-1 și ASTM - A820, respectiv certificări Quality System Certification ISO 9001:2008 (142499/2013) și ISO 14001 (142501/2013).


4.2.4.2 Fibre de polipropilenă RoFero




Fibrele de polipropilenă au fost oferite de către firma RomFracht Group (RomFracht Fibre) și s-a optat pentru tipul de fibră ROFERO, varianta produsă în România care corespunde tipului FORTA FERRO, fabrică în S.U.A. La noi în țară, FORTA FERRO a fost folosit cu succes pentru pereți și panouri prefabricate, utilizat prima dată în Cluj-Napoca [41].

Aceste fibre sunt realizate din copolimer/polipropilenă 100% virgină, sub forma unui mănunchi de fire mono-filament răsucite și ne-fibrilate, ce se folosesc în primul rând în cazul unor solicitări mai mari (armarea structurală dispersă) [160]. S-a optat pentru acest tip de fibră de polipropilenă întrucât, conform declarația producătorului, efectul fibrelor asupra matricei (rezistențele mecanice) sunt comparabile cu cele de oțel, respectiv armarea dispersă cu fibre de oțel poate fi înlocuită folosind ROFERO.

Fibrele ROFERO, în comparație cu fibrele de oțel, sunt non-corozive, non-magnetice și rezistente 100% la substanțe alcaline. Astfel, oferă durabilitate maximă pe termen lung, îmbunătățiri structurale și eficacitate secundară în controlul temperaturii la contracția matricei cimentoase. Avantajele și alte proprietăți ale fibrelor de polipropilenă ROFERO conform [160], sunt prezentate în Tabelul 4.3.

Tabelul 4.3 – Avantajele utilizării fibrelor de polipropilenă ROFERO în mortare și materiale de construcții cimentoase, respectiv proprietățile principale ale acestora. [160]

 Avantaje	<p>îmbunătățirea caracteristicilor materialului de bază, precum:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ reducerea contracției plastice, termice și a dilatării materialului întărit; ▪ creșterea rezistenței la impact cu ~20%; ▪ creșterea rezistenței la compresiune și uzură; ▪ creșterea durabilității; ▪ reducerea apariției fisurilor; ▪ scăderea greutății a elementelor realizate;
---	--

- înlocuirea fibrelor metalice în raport de 1:10;
 - posibilitatea de a crește dozajul cu până la 50% față de fibrele metalice.
-  **Aplicații** sunt folosite în principal în aplicațiile care necesită o armare dispersă performantă:
- torcretări;
 - pardoseli industriale sau centre comerciale, parcări etc.
 - rampe de încărcare-descărcare;
 - diferite elemente prefabricate;
 - alte tipuri de proiecte.
-  **Mod de utilizare**
- dozajul recomandat este între **1 – 7.5 kg/m³**;
 - se adăugă fie direct în stație, fie în cifă, caz în care se malaxează la viteza medie timp de 7 minute;
 - în cazul dozajelor mari se recomandă utilizarea unui fluidizant.
-  **Proprietăți fizice**
- Material: Copolimer/polipropilenă 100% virgină;
 - Culoare: **gri**;
 - Forma: mono-filament;
 - Rezistența la acizi/alcalini: **100%**;
 - Densitate: **0.91 g/cm³**;
 - Absorbție: nulă;
 - Rezistența la rupere: min. **550 N/mm²**;
 - Lungimi disponibile: 54 mm/**38 mm**.
-





4.2.4.3 Fibre de carbon scurte

Fibrele de carbon au fost achiziționate de la producătorul de fibre ACG Composites Co. Ltd. Zhejiang, China în vederea analizei posibilității de utilizare în compoziția mortarelor și comparația performanței cu cele două tipuri de fibre prezentate anterior. Este o companie care produce materiale compozite și materiale componente profesionale pentru acestea, printre care se numără fibrele de carbon, de sticlă, aramid (kevlar), fibrele de bazalt, PMI/PVC, rășini ș.m.d.

Fibrele scurte de carbon sunt obținute prin tăierea sârmei de fibre de carbon și este un material relativ nou pe piață. Printre avantajele acestora se numără rezistența ridicată la întindere, rezistența la abraziune, rezistența la coroziune, conductivitate bună și rezistență la temperaturi ridicate.

În principal sunt folosite pentru armarea maselor plastice, precum nailon (PA), polipropilenă (PP), policarbonat (PC), etc., dar și pentru armarea materialelor de construcții cimentoase, pentru obținerea unor vopsele conductoare, materiale termoizolante cu rezistențe mecanice sporite și stabilitate structurală mai ridicată, producerea cărămidilor refractară armate cu fibre sau pentru armarea ceramicilor, pereților cortină ș.a.m.d. Proprietățile principale ale fibrelor de carbon utilizate în lucrarea de față sunt prezentate în Tabelul 4.4

Tabelul 4.4 – Avantajele utilizării fibrelor de carbon în mortare și materiale de construcții cimentoase, respectiv proprietățile principale ale acestora.

 <i>Avantaje</i>	<p>îmbunătățirea caracteristicilor materialului de bază, precum:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ reducerea contracției plastice, termice și a dilatării materialului întărit; ▪ creșterea rezistenței la impact; ▪ creșterea rezistenței la solicitările termo-mecanice; ▪ creșterea durabilității; ▪ reducerea apariției fisurilor; ▪ scăderea greutateii a elementelor realizate; ▪ permite o lucrabilitate excelentă și permite utilizarea compozitului în straturi foarte subțiri.
 <i>Aplicații</i>	<p>sunt folosite în principal în aplicațiile care necesită o armare dispersă performantă:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ torcretări; ▪ aplicații în care este necesară creșterea rezistenței la solicitări termo-mecanice; ▪ în cazul mortarelor sunt utilizate în special în compoziția tencuielilor unde este necesară o rezistență la impact, șoc etc. foarte ridicat; ▪ lucrări în care materialul poate fi aplicat doar în straturi subțiri/ elemente cu grosimi mici; ▪ diferite elemente prefabricate; ▪ variațiile extreme ale temperaturii; ▪ alte tipuri de proiecte.
 <i>Mod de utilizare</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dozajul recomandat: nu există; ▪ se adăugă după preferințe, nu există prevedere în ceea ce privește omogenizarea, însă fibrele pot fi deteriorate.
 <i>Proprietăți fizice</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Material: 100% fibre de carbon, cu conținut $\geq 95\%$ carbon; ▪ Culoare: negru;

- Forma: mono-filament;
- Rezistența la acizi/alkalini: **100%**;
- Densitate: **1.6 g/cm³**;
- Absorbție: nulă;
- Rezistența la rupere: min. **3 600 N/mm²**;
- Lungime: **6 mm**;
- Diametru: **7.0 μm**.

Comparația celor trei tipuri de fibre în funcție de posibilitatea aplicării mortarului ranforsat cu acestea este prezentată în Tabelul 4.5.

Tabelul 4.5 – Posibilitatea utilizării mortarului armat dispers cu cele trei tipuri de fibre.
 ✗ nu este aplicabil; (A) aplicabil; ✓ recomandat; ✓ optim.

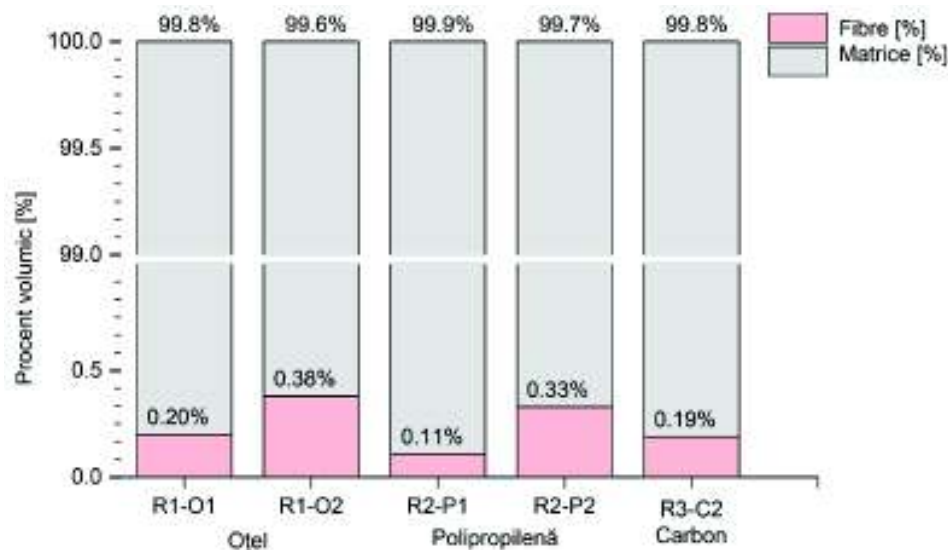
Tipul de mortar și lucrare	Fibre de oțel	Fibre RoFero	Fibre de carbon
Mortar de sub-turnare	✓	✓	(A)
Mortar pentru reparația elementelor structurale	(A)	✓	✓
Mortar pentru renovare prin tencuire	✗	(A)	✓
Mortar pentru consolidarea și refacerea rosturilor de zidărie	✓	(A)	(A)
Mortar de uz general pentru tencuire și finisare	✗	(A)	✓
Mortar ușor pentru tencuire	✗	(A)	✓
Elemente și panouri prefabricate	(A)	✓	✓
Acoperirea suprafețelor orizontale de rezistență (piste, rampe, platforme etc.)	✓	✓	✓

4.3 Stabilirea și prepararea rețetelor de mortar

În vederea analizei mortarelor armate dispers cu diferite tipuri de fibre și începerea programului experimental, a fost stabilită compoziția mortarului standard pe bază de ciment, folosit ca și material de referință, respectiv ca și matrice de bază pentru compozitele cu fibre discontinue. În urma acestuia, au fost stabilite procentele de armare și cantitățile de fibre: (1) prima etapă – cantitatea minimă de armare

recomandată de producător (15 kg/m^3 în cazul oțelului R1-O1 și 1 kg/m^3 în cazul fibrelor de polipropilenă R2-P1); (2) etapa a doua – cantitatea optimă recomandată (30 kg/m^3 oțel R1-O2 și echivalentul în cazul fibrelor sintetice R2-P2, R3-C2: 3 kg/m^3). Valorile exprimate în fracție volumică este ilustrată în Figura 4.3

Figura 4.3 – Frația volumică ale fibrelor în compoziția mortarelor.



Raportul ciment/nisip a fost stabilit 1:3, și cantitatea de apă în funcție de consistență, respectiv a fost verificată curba granulometrică prezentată în secțiunea §4.2.3. Astfel, s-a obținut următoarea rețetă pentru mortarul standard, dată în Tabelul 4.6, utilizată ca matrice pentru compozite armate cu fibre atât în prima etapă (RS-1), cât și în al doilea (RS-2).

Tabelul 4.6 – Rețetă de mortar standard pe bază de ciment RS (RS-1/RS-2) pentru 1 m^3 și 4.5 litri.

Material	Cantitate /1 m ³	/4.5 l	U.M.
Nisip de râu sort 0...4 mm	1 892 177.8	8 514.8	[g]
Ciment Portland compozit CEM II	630 733.3	2 838.3	[g]
Apă	366 666.7	1 600	[ml]
Adaos/Aditiv	0	0	[g]
Raport A/C	0.56	0.56	[-]
Raport C/N	1:3	1:3	[-]

După dozajul liant-nisip, respectiv proporția în volume, rețeta stabilită pentru mortarul standard se încadrează în categoria mortarelor mijlocii conform [92], având dozajul cuprins între 1:3 și 1:5.

Prepararea mortarelor în toate cazurile au fost realizate în laboratorul de Materiale de Construcții din cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, ținând cont de prevederile standardelor [170][174] în ceea ce privește compoziția și prepararea mortarelor.

Pentru minimalizarea aerului oclus, vibrarea mecanizată a fost efectuată prin utilizarea mesei vibrante din dotarea laboratorului menționat, asigurând astfel o compactare adecvată, umplerea cofrajelor și creșterea aderenței matricei-armătură în cazul compozitelor cu fibre. Compozițiile acestora sunt prezentate în Tabelul 4.7.

Tabelul 4.7 – Rețeta mortarelor utilizate în programul experimental pentru 4.5 litri.

Denumire	Cantitate	U.M.
RS (RS-1/RS-2)		
Nisip de râu sort 0...4 mm	8 514.8	[g]
Ciment Portland compozit CEM II	2 838.3	[g]
Apă	1 650	[ml]
Adaos/Aditiv	0	[g]
R1-O1 – fibre de oțel, etapa (1)		
Matrice	RS-1	[-]
Adaos/Aditiv: RFC 45/50 RomFracht	67.5	[g]
R2-P1 – fibre de polipropilenă etapa (1)		
Matrice	RS-1	[-]
Adaos/Aditiv: RoFero RomFracht	4.5	[g]
R1-O2 – fibre de oțel, etapa (2)		
Matrice	RS-2	[-]
Adaos/Aditiv: RFC 45/50 RomFracht	135	[g]
R2-P2 – fibre de polipropilenă etapa (2)		
Matrice	RS-2	[-]
Adaos/Aditiv: RoFero RomFracht	13.5	[g]
R3-C2 – fibre de carbon etapa (2)		
Matrice	RS-2	[-]
Adaos/Aditiv: ACG Chopped Carbon	13.5	[g]

4.4 Determinări asupra mortarelor în stare proaspătă și stare întărită

4.4.1 Determinarea consistenței mortarelor

Lucrabilitatea mortarelor a fost pusă în evidență prin determinarea consistenței acestora, folosind conul etalon și vasul tronconic. Așa cum a fost menționat, cantitatea de apă a fost stabilită în funcție de consistența mortarului proaspăt. S-a stabilit ca această valoare determinată prin pătrunderea conului etalon să fie de 8-9 cm. Astfel, mortarele obținute pot fi folosite atât ca mortare pentru zidărie (cărămizi pline, blocuri de beton ușor, cărămizi cu goluri, blocuri ceramice cu goluri), cât și pentru tencuieli executate manual, în principiu pentru grund, conform [92].

4.4.2 Omogenizarea și verificarea gradului de omogenitate

Conform recomandării literaturii de specialitate, dintre care menționăm [14][136][97][104], omogenizarea fibrelor cu constituenții matricei de bază trebuie efectuată după amestecarea și prepararea mortarului adăugând și apa, adică în amestecul ud. Introducerea componentelor a respectat, deci, succesiunea: nisip, ciment, apă, iar după amestecarea acestora au fost introduse fibrele și a fost realizată omogenizarea mecanizată corespunzătoare. Această succesiune are deosebită importanță în vederea evitării aderenței pe suprafața interioară a cuvei a cimentului în prima fază și evitarea unor fenomene nedorite (flotare și aglomerare) în cazul adăugării fibrelor. Formarea vârtelurilor în timpul omogenizării mecanizate poate avea efecte negative în cazul adăugării fibrelor în compoziția mortarului în stare uscată, în special în cazul celor cu greutate redusă, din acest motiv, succesiunea descrisă și respectată în ceea ce privește adăugarea componentelor poate fi considerată una optimă.

Pe baza studiilor teoretice efectuate pe această temă, în capitolele anterioare a fost arătat că dispersia și distribuția fibrelor este un factor important care afectează în mod semnificativ proprietățile mortarelor atât în stare proaspătă, cât și în stare întărită, de care depinde în mare măsură și performanța acestora. Deși sunt cunoscute câteva metode de determinare și verificare a dispersiei fibrelor, majoritatea sunt ori distructive ori foarte laborioase, a căror precizie nu tot timpul este proporțională cu timpul și efortul depus.

Literatura de specialitate prezintă numeroase cercetări privind instrumentele și metodele care pot fi folosite în vederea monitorizării distribuției, orientării și eventualele aglomerări de fibre. O metodă nedistructivă și rapidă pentru determinarea dispersiei fibrelor în materialul pe bază de ciment conform [142] este spectroscopia de impedanță cu curent alternativ AC-IS. Neavând posibilitatea aplicării și utilizării acestei metode, verificarea gradului de omogenitate a fost efectuată doar vizual, prelevând mai mult probe din masa materialului, stabilind astfel dacă aceasta corespunde sau nu cerințelor. Timpul de omogenizare a fost diferit în fiecare caz, în funcție de gradul de omogenizare constatat vizual. Trebuie menționat că nu s-a observat cantitate semnificativă de fibre nici pe pereții cuvei și nici pe paletele malaxorului după punerea în operă.

4.4.3 Determinarea densității aparente

Densitatea aparentă a fost determinată la vârsta de 28 de zile de la preparare, respectând SR EN 1015 – Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie, partea 10: Determinarea densității aparente a mortarului întărit [171].

Valorile înregistrate au fost obținute prin cântărirea epruvetelor realizate în vederea determinării rezistențelor mecanice și sunt prezentate în Tabelul 4.8, iar variația rezultatelor înregistrate în etapa a doua sunt ilustrate în Figura 4.4.

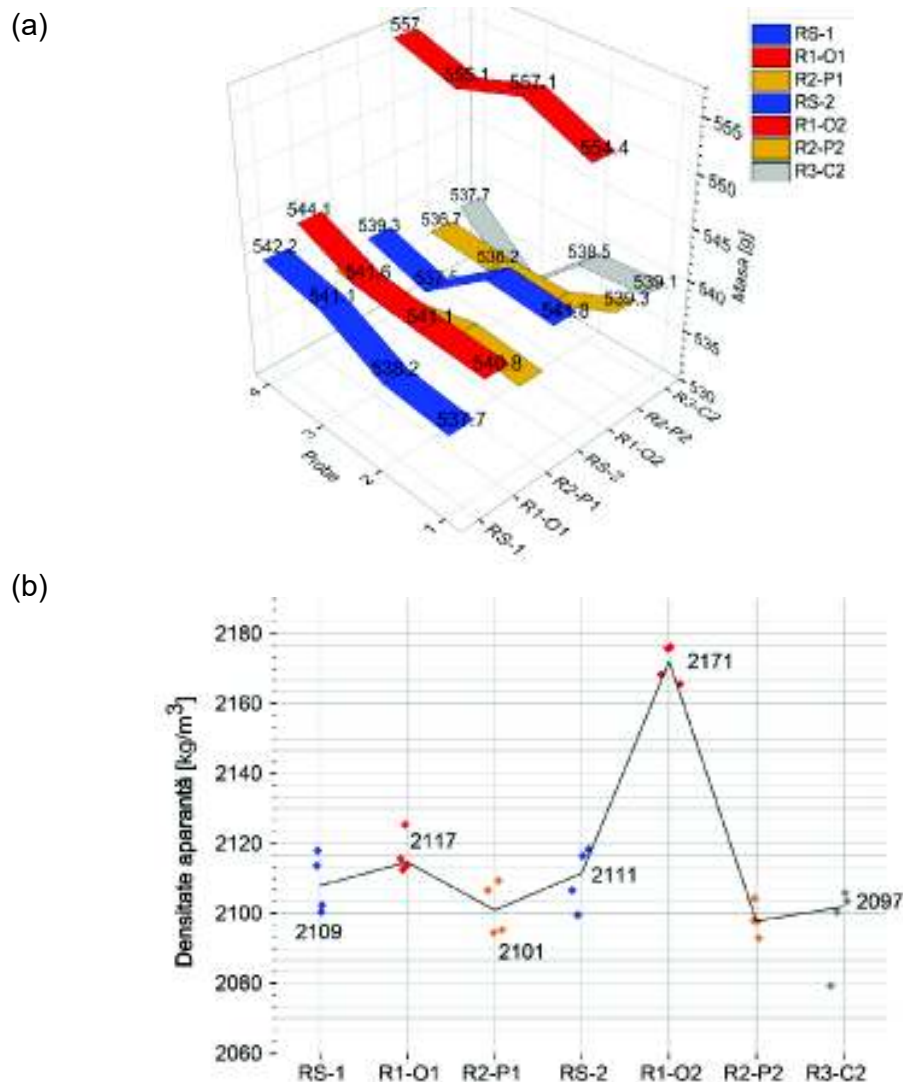
Tabelul 4.8 – Densitatea aparentă ale mortarelor la 28 de zile.

Proba	Masa* [g]	Volumul aparent [cm ³]	Densitatea aparentă [kg/m ³]
RS (medie 1-2)	540.1	256	2 109
R1-O1	541.9	256	2 117
R2-P1	537.9	256	2 101
R1-O2	555.9	256	2 171
R2-P2	537.1	256	2 098
R3-P3	536.9	256	2 097

* Valoarea medie a rezultatelor, luând în considerare 4 epruvete de 4x4x16 cm.

Conform rezultatelor obținute se poate concluziona că nu sunt diferențe semnificative în cazul celor șase rețete privind densitatea aparentă și toate se încadrează în categoria mortarelor grele având $\rho_a > 1\,800\text{ kg/m}^3$.

Figura 4.4 – Masa epruvetelor 4x4x16 (a) și densitatea aparentă (b). Variația valorilor obținute în funcție de rețetă.



Deși modificări semnificative privind densitatea aparentă ale mortarelor nu au fost produse la astfel de procente de armare, trebuie menționat că utilizarea fibrelor de carbon într-o cantitate mai mare poate conduce la scăderea greutății și încadrarea într-o altă categorie privind densitatea (mortare semigrele).

4.4.4 Determinarea aderenței la stratul suport

Valoarea medie a adeziunii la stratul suport ale mortarelor de zidărie și de tencuială exprimată prin rezistența la smulgere, depinde de tipul suportului (ceramic, beton sau piatră, beton celular autoclavizat), iar valoare în mod normal trebuie să fie

cuprinsă între 0.08 și 0.45 N/mm². Determinarea experimentală a fost realizată ținând cont de prevederile SR EN 1015-12:2001 [173].

Pentru determinarea adeziunii la stratul suport au fost realizate epruvete de formă cilindrică 50x15 mm în mortarul turnat direct pe suprafață unor cărămizi. Piesele astfel realizate au fost centralizate în aparatul prezentat în Figura 4.5 și a fost determinată forța de smulgere (P_a) ale epruvetelor cilindrice de pe stratul suport în fiecare caz, după care adeziunea la suport a fost stabilită prin calcul și este prezentată în Tabelul 4.9. Această determinare a fost efectuată doar în etapa a doua. Nu sunt referiri la adeziunea mortarelor armate cu fibre, având conținut mai mic de fibre.

Tabelul 4.9 – Rezultatele obținute în urma determină adeziunii la stratul suport.

Rețeta	Forța [kN]	Aderența [N/mm ²]	Aderența medie [N/mm ²]
RS-2	0.024	0.01	0.01
	0.028	0.01	
	0.024	0.01	
	0.027	0.01	
R1-O2	0.078	0.04	0.03
	0.059	0.03	
	0.050	0.03	
	0.055	0.03	
R2-P2	0.106	0.05	0.06
	0.130	0.07	
	0.110	0.06	
	0.136	0.07	
R3-C2	0.105	0.05	0.06
	0.104	0.05	
	0.123	0.06	
	0.111	0.06	

Putem considera că valorile obținute sunt nesatisfăcătoare, dar totuși o creștere a aderenței la suport față de mortarul standard RS-2 (0.01 N/mm²) s-a obținut în toate cazurile (R1-O2, R2-P2 și R3-C2), iar aderența cea mai mare la stratul suport s-a obținut în cazul folosirii fibrelor de polipropilenă și de carbon, având aceeași valoare medie. Valoarea minimă admisă pentru un mortar de marca M25 pe cărămidă ar trebui să fie 0.3 N/mm² și 0.2 N/mm² pentru M10, conform [92].

Cedarea în toate cazurile s-a produs prin aderență, și nu prin rupere de coeziune în mortar sau substrat (cărămidă). Astfel, rezultatele obținute și prezentate în tabel, conform [173], reflectă adeziunea reală ale mortarelor la stratul suport. În caz

contrar, adeziunea ar fi fost mai puternică (valoarea reală este mai mare decât cea înregistrată în cazul în care cedarea nu se produce la interfața mortar-cărămidă).

Figura 4.5 – Determinarea aderenței mortarelor la stratul suport. Aparatura utilizată și cărămida cu mortar armat cu fibre de carbon după realizare.



4.4.5 Determinarea rezistenței la încovoiere

4.4.5.1 Epruvetele de încercare

Pentru determinarea rezistențelor la încovoiere au fost realizate 4 prisme de 40x40x160 mm, conform SR EN 1015-11 [172]. Prepararea rețetelor a fost prezentată în secțiunea § 4.3 *Stabilirea și prepararea rețetelor de mortar*, și este valabilă la toate tipurile de epruvete, dacă nu este specificată altfel în secțiunea aferentă acestuia.

Epruvetele au fost turnate în tipare metalice, respectând standardului [172], și au fost compactate cu masa vibrantă (Figura 4.6). Au fost păstrate 28 de zile în condiții de laborator înainte de încercare, conform prevederilor standardelor în vigoare.

Figura 4.6 – Compactarea epruvetelor prismatice în Laboratorul de Materiale de construcții, UTCN.



4.4.5.2 Aparatura și echipamentele utilizate

În prima etapă, în vederea studierii efectului procentului minim de armare, mortarul standard (RS-1) și mortarele armate cu fibre (R1-O1, R2-P1) au fost încercate la încovoiere în cadrul laboratorului Universității Tehnice din Cluj-Napoca, Facultatea de Mecanică, Departamentul Inginerie Mecanică. Pentru determinarea rezistențelor la încovoiere a fost utilizată mașina de încercare universală Instron 3366 împreună cu dispozitivul Instron 2810 Flexure Fixture, cu control total prin intermediul softwareului și al calculatorului instalat. Acuratețea preseii și a încercării este 0.5% din încărcarea indicată, respectiv ± 0.02 mm (0.15%) în cazul deplasărilor, conform declarației producătorului. Sistemul utilizat este prezentat în Figura 4.7.

În a doua etapă, în cazul mortarelor RS-2, R1-O2, R2-P2 și R3-C2, cu procent mai mare de armare, rezistența la încovoiere a prismelor a fost determinată cu mașina automată pentru încercarea la încovoiere/întindere 65-L0015/A Controls (Controls-Group, Italia), cu capacitate de 5 000 N. Această mașină de încercare din dotarea laboratorului disciplinei Materiale de construcții este prezentată în Figura 4.8.

Figura 4.7 – Presa utilizată în vederea determinării rezistențelor la încovoiere.

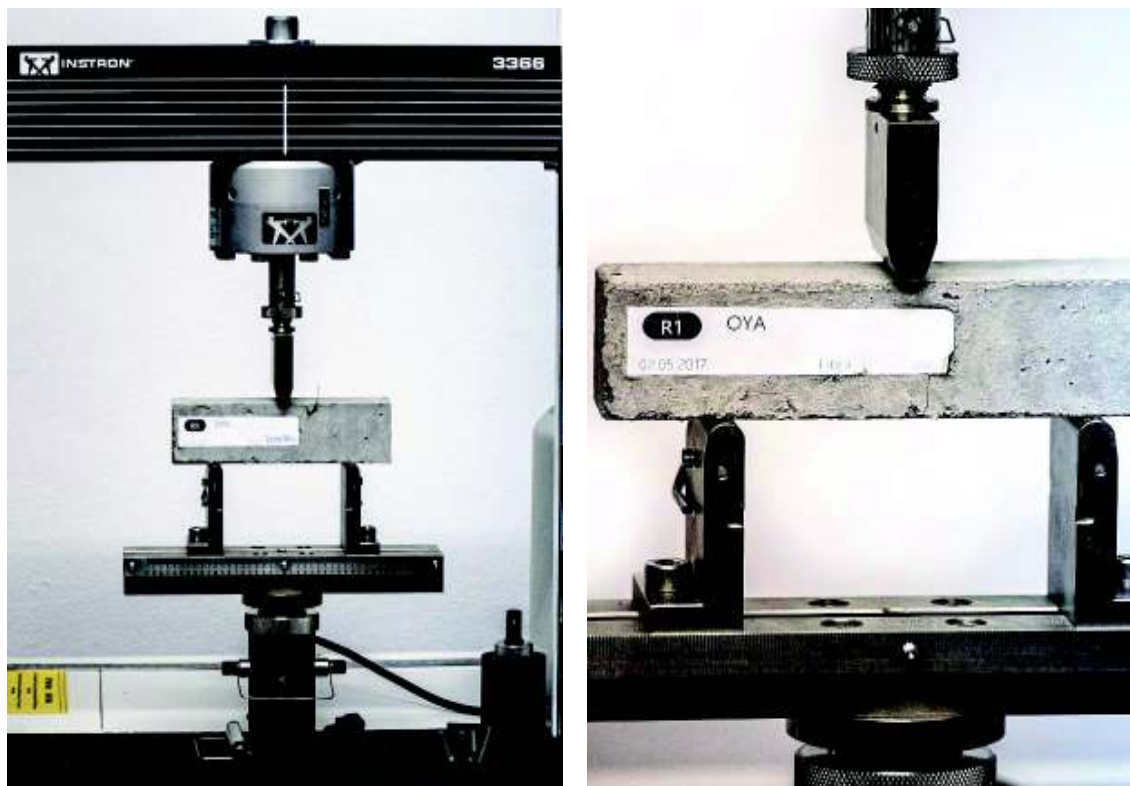
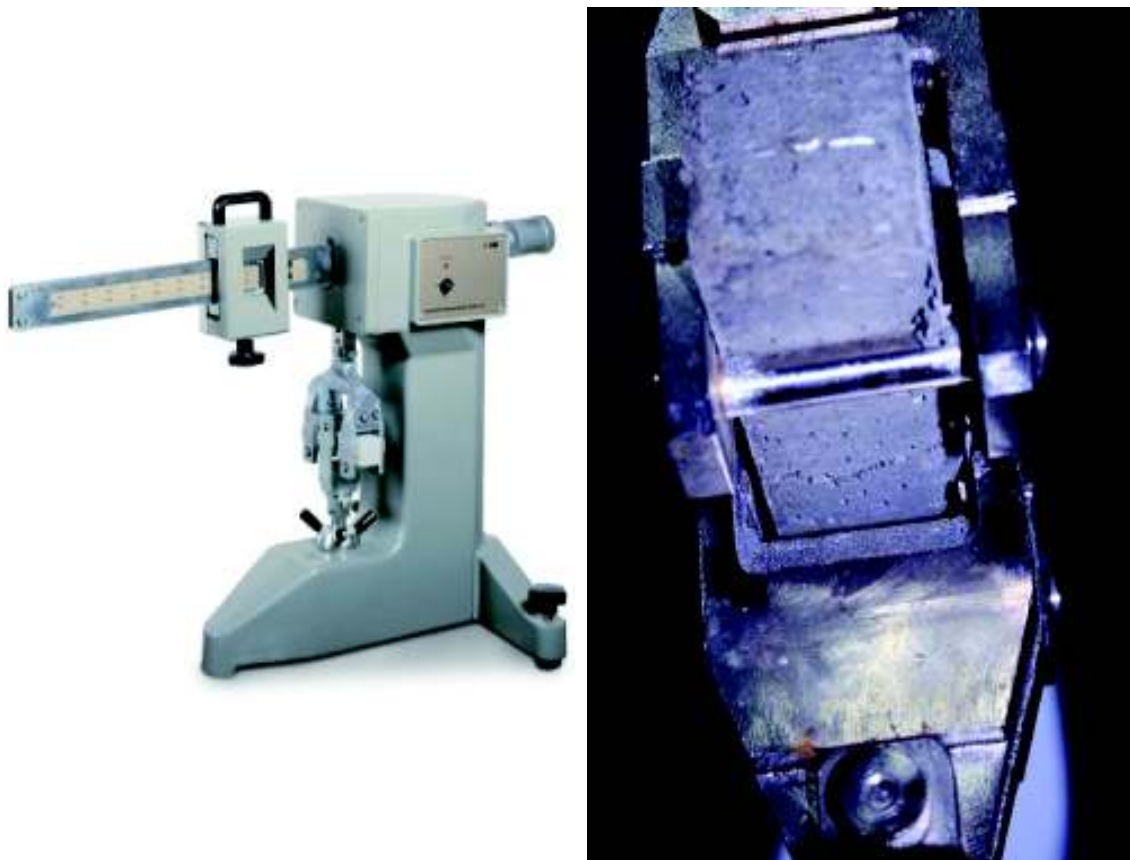


Figura 4.8 – Mașina automată pentru încercarea la încovoiere Controls 65-L0015/A din dotarea laboratorului UTCN și imaginea captată în timpul încercării. Ruperea epruvetei de mortar standard.



4.4.5.3 Procedura de determinare

Determinarea rezistențelor la încovoiere a fost în conformitate cu prevederile standardului SR EN 1015-11 [172]. Sarcina a fost aplicată fără șocuri, cu creștere constată până la rupere, cu viteza recomandată de Anexa A1 – SR EN 1015-11.

Epruvetele au fost verificate înainte de încercare pentru asigurarea ca acestea să respecte cerințele și toleranțele dimensionale prevăzute în normativ, iar direcția aplicării sarcinii a fost perpendiculară pe direcția de turnare a eșantioanelor (valori inferioare ale rezistențelor).

4.4.5.4 Rezultatele obținute în urma încercării la încovoiere

După oprirea automată a mașinii de încercat (fisurarea și/sau ruperea epruvetelor) a fost înregistrată forța maximă și a fost calculată rezistența pentru fiecare

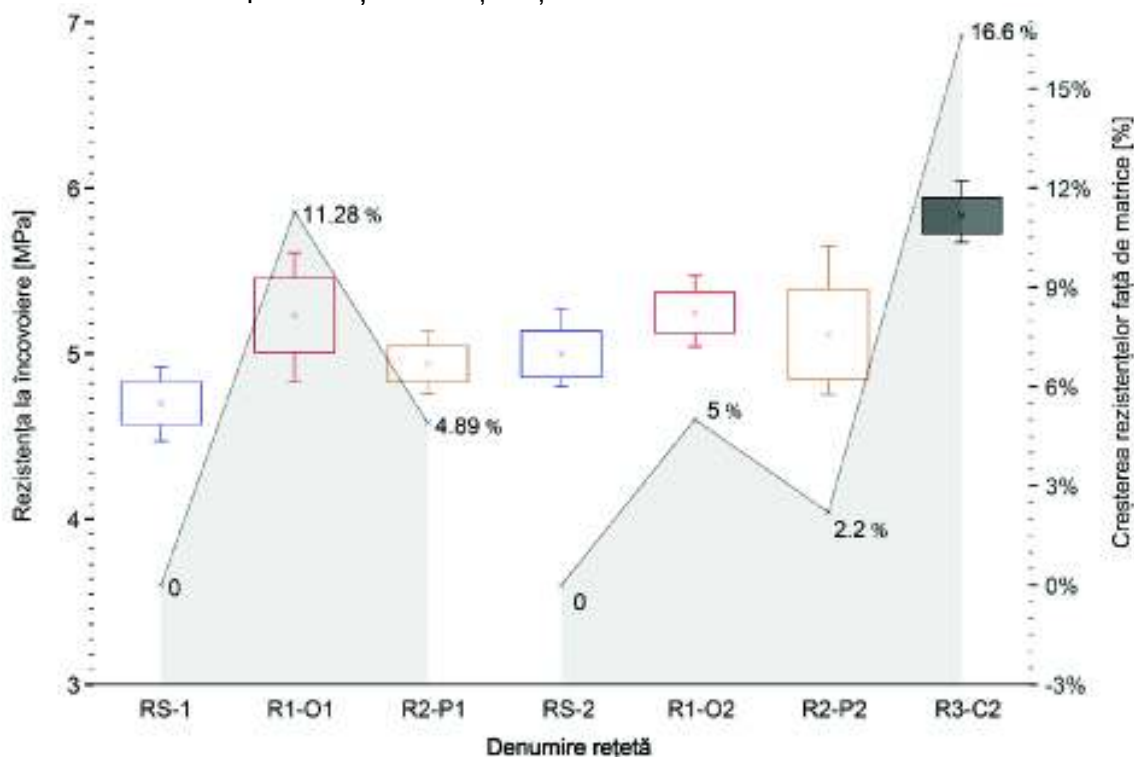
rețetă sau dată direct de softwarul mașinii de încercat în prima etapă, folosind Instron 3366 pe baza dimensiunilor și datelor introduse înainte de începerea testării. Valorile acestora sunt prezentate în Tabelul 4.10.

Tabelul 4.10 – Valoarea rezistențelor la încovoiere ale mortarelor, determinate pe cale experimentală în prima și în a doua etapă.

Denumire probă	Forța de rupere [N]	Rezistența la încovoiere [N/mm ²]	dL [mm]	Rezistența la încovoiere medie [N/mm ²]
RS-1	2 100	4.92	0.188	4.70
	2 010	4.71	0.212	
	1 910	4.47	0.197	
R1-O1	2 062	4.83	0.239	5.23
	2 241	5.25	0.219	
	2 393	5.61	0.254	
R2-P1	2 094	4.91	0.387	4.93
	2 186	5.14	0.323	
	2 030	4.76	0.466	
RS-2	2 250	5.27	-	5.0
	2 050	4.80	-	
	2 100	4.92	-	
R1-O2	2 230	5.23	-	5.25
	2 150	5.04	-	
	2 335	5.47	-	
R2-P2	2 025	4.75	-	5.11
	2 410	5.65	-	
	2 110	4.95	-	
R3-C2	2 420	5.67	-	5.83
	2 575	6.04	-	
	2 470	5.79	-	

Rezultatele acestui studiu, privind rezistența la încovoiere a compozitelor, obținută pe cale experimentală, sunt ilustrate și în Figura 4.9. Neavând posibilitatea încercării epruvetelor cu presa Instron 3366 și în etapa a doua, nu sunt date referitoare la deformația materialelor testate.

Figura 4.9 – Rezistențele obținute la încovoiere. Variația rezultatelor determinate pe trei epruvete și diferența față de matricea acestora.

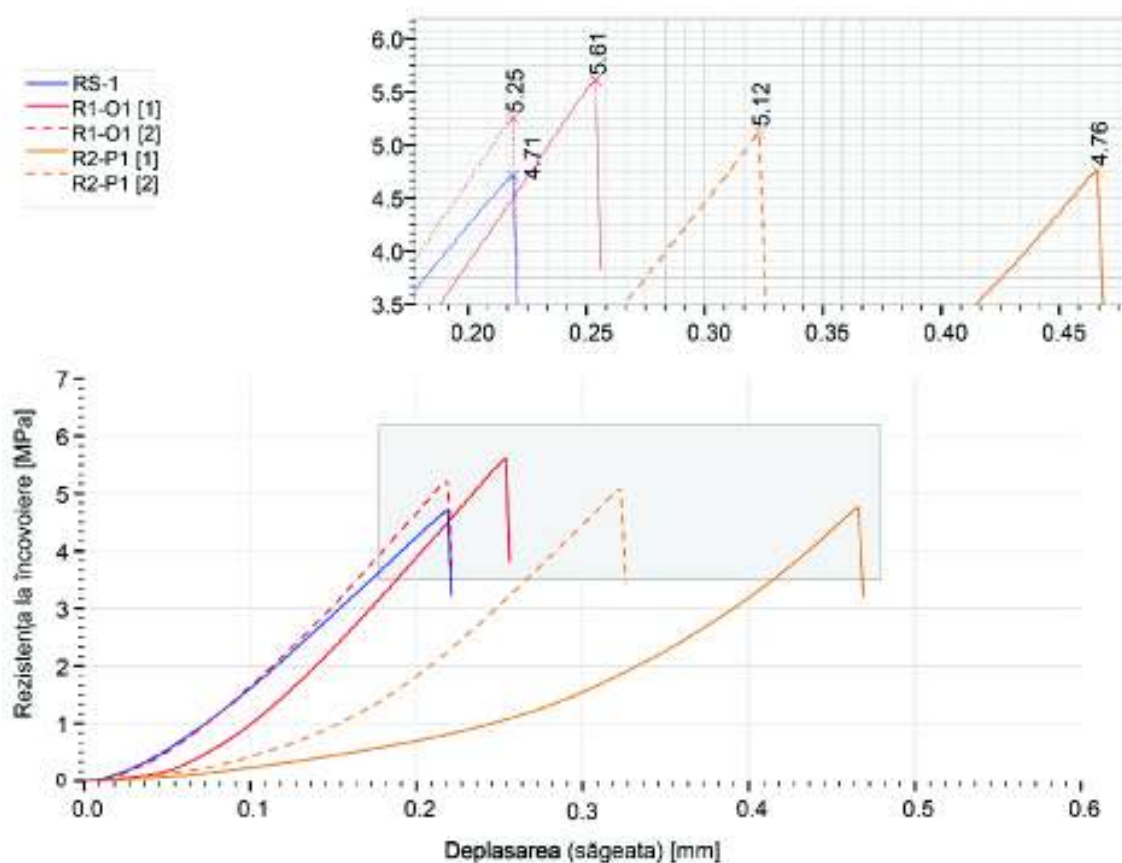


În ceea ce privește rezistențele la încovoiere, prezentate în Tabelul 4.10 și prezentate grafic în Figura 4.9, se poate observa că în prima etapă cea mai mare valoare s-a obținut în cazul utilizării fibrelor de oțel, însă în etapa a doua o creștere mai mare a fost obținută prin folosirea fibrelor de carbon, înregistrând valoarea medie de 5.83 MPa, reprezentând o creștere de 16.6% față de matricea (RS-2 mortar standard). Date referitor la rezistențele mecanice la un procent mai mic de armare în cazul fibrelor de carbon nu avem, astfel nu putem analiza influența creșterii procentului de armare la aceste fibre.

În cazul R1-O1, o creștere mai mare a rezistenței față de matricea a fost obținută în prima etapă, adică la un procent mai mic de armare, înregistrând o creștere de 11%. În a doua etapă, adăugând o cantitate dublă de fibre, creșterea a fost doar 5% față de matricea (RS-2). Acest fenomen se poate explica prin dificultatea de compactare în cazul creșterii cantității de fibre de oțel, rezultatul fiind un material cu porozitate mai accentuată, ceea ce are ca și efect diminuarea rezistențelor mecanice. O compactare bună se poate obține și în cazul procentului ridicat de armare (§2.3.2.4), însă este

necesară folosirea unei matrice cu agregat/particule mai mici (pastă de ciment, silice ultra-fine etc.).

Figura 4.10 – Diagrama de efort-deformație înregistrată la încovoiere în prima etapă de încercare.



Creșterea procentului de armare nici în cazul fibrelor de polipropilenă nu a avut efect pozitiv, înregistrând o creștere mai ușoară față de matricea de bază, ca și în prima etapă. La fel ca și în cazul fibrelor de oțel, acest fenomen se poate explica și prin dificultatea de compactare datorită cantității mai mare de macro-fibre.

În cazul prezenței fibrelor în matrice cimentoasă este acceptat faptul că după fisurare (domeniul post-elastic), tensiunea scade, dar materialul încă are rezerve serioase și este capabil în continuare să suporte eforturi suplimentare (eforturi mai mici decât cel rezultat din forța de rupere). În acest studiu, comportamentul post-fisurare, astfel avantajul principal al utilizării fibrelor și creșterea ductilității sau a capacității de disipare a energiei, nu se poate deduce în mod clar din diagramele prezentate în Figura 4.10, întrucât mașina de testare s-a oprit automat la apariția primei fisuri, la care

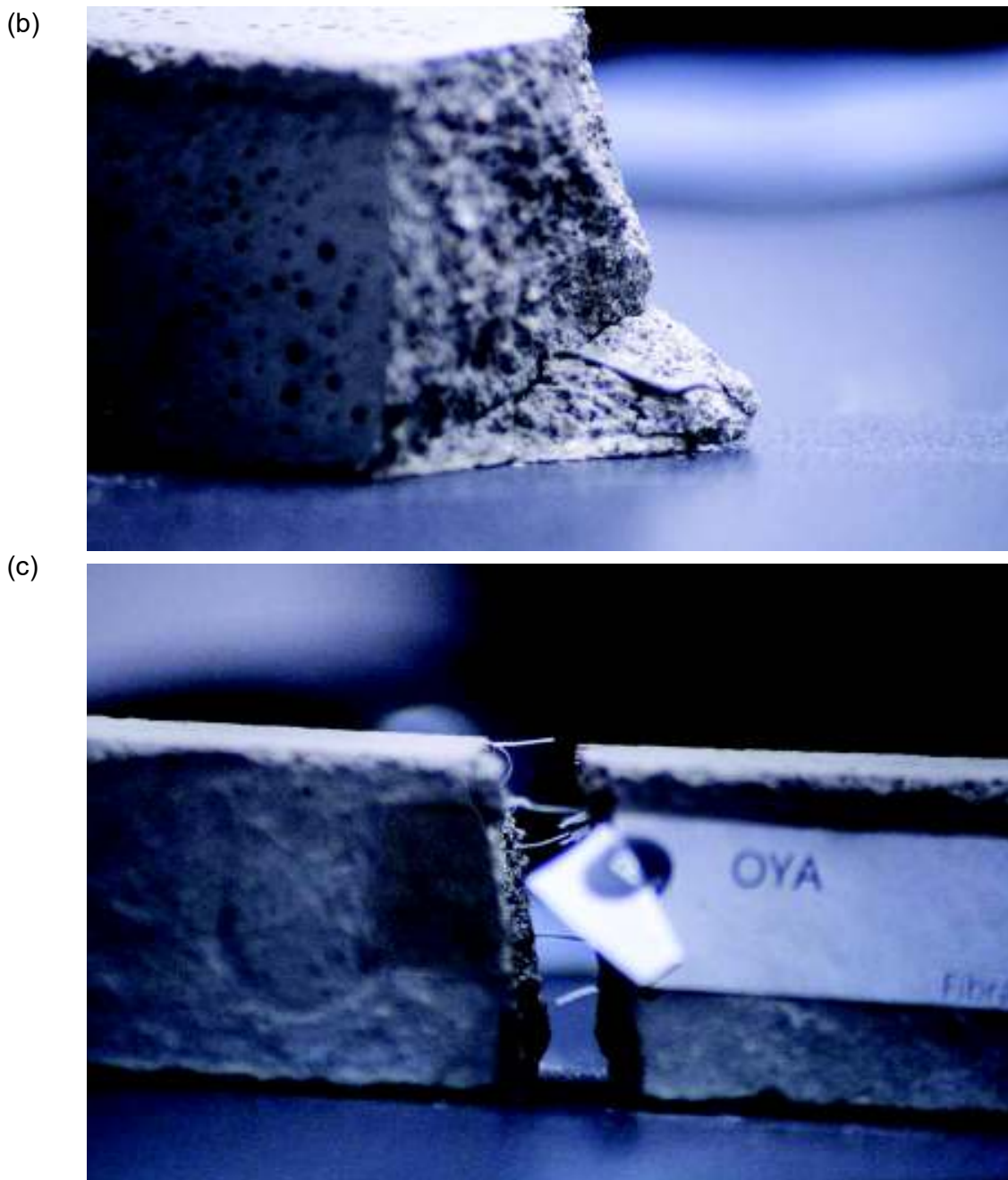
se determină rezistența la încovoiere, conform standardelor în vigoare. Se poate afirma însă că epruvetele realizate din mortare armate cu fibre nu s-au strivit după încercare, mai mult, separarea părților în vederea analizei suprafețelor de rupere nu s-a putut efectua de mână (în special în etapa a doua).

Totodată, din datele prezentate în tabel și din figura de mai sus reiese că prezența fibrelor în cazul R1-01 determină creșterea rezistenței la încovoiere în comparație cu materialul de referință, însă fără o modificare semnificativă a diagramei specifice, adică deformațiile aferente forțelor de rupere nu prezintă diferențe semnificative.

Deși în cazul fibrelor de polipropilenă, atât în prima etapă (0.11 v%), cât și în a doua (0.33 v%), creșterea rezistențelor față de RS-1 și RS-2 pot fi neglijate, capacitatea de deformare a epruvetelor R2-P1 a fost mai mare în comparație cu celelalte compozite. Deși deformația specifică ultimă nu a fost determinată, în cazul utilizării fibrelor de polipropilenă se poate estima o creștere a ductilității și a absorbției de energie a materialului obținut. Comparând deplasările aferente tensiunilor maxime se constată că prin adăugarea fibrelor de oțel (~0.25 mm) nu s-a obținut o deplasare semnificativ mai mare în comparație cu matricea de bază (de ordinul ~0.23 mm), în schimb în cazul utilizării fibrelor de polipropilenă (~0.40 mm) s-a înregistrat o creștere de 75%.

Figura 4.11 – Modul de cedare (b) și suprafața de rupere (b) al epruvetei R1-O1. Aspectul R2-P1 după separarea părților de prismă.





În ceea ce privește analiza vizuală a modului de rupere (Figura 4.11) și analiza suprafețelor și a planului de rupere, trebuie menționat că în acele cazuri în care s-a produs separarea părților probelor, nu s-a constatat ruperea fibrelor, doar smulgerea datorită aderenței slăbite (nu facem aici referire la fibre de carbon, întrucât în acest caz nu s-a putut determina vizual acest aspect). Au fost foarte puține astfel de cazuri și se poate afirma că în etapa a doua (procent mai ridicat de armare) în proporție de 90% epruvetele, după încercarea și oprirea testului, s-au prezentat întregi (aici excludem RS-1 și RS-2).

4.4.6 Determinarea rezistența la compresiune

4.4.6.1 Considerente generale. Scopul determinării

Rezistența la compresiune a mortarelor reprezintă o caracteristică importantă, la fel ca și în cazul betoanelor. Valoarea medie a rezistențelor la vârsta de 28 de zile determină conform [92] marca mortarelor, iar conform [194][195] clasele de rezistență. Marca mortarelor conform [92] și clasele de rezistență pentru mortare de tencuire [194] în funcție de rezistența la compresiune, sunt date în Tabelul 4.11. În mod obișnuit, rezistența acestora la compresiune se determină pe resturile de prismă rezultate după încercarea la încovoiere (§4.4.5), cu ajutorul unor plăcuțe, prezentate în Figura 4.12 (b), conform SR EN 1015-11 [172].

Tabelul 4.11 – Clasa de rezistență și marca mortarelor, în funcție de rezistența la compresiune determinată la vârsta de 28 de zile [194][92].

Clasa de rezistență	Rezistența la compresiune [N/mm ²]	Marca mortarului	Rezistența minimă la compresiune [N/mm ²]
CS I	0.4 – 2.5	M4	4
CS II	1.5 – 5	M10	10
CS III	3.5 – 7.5	M25	25
CS IV	≥ 6	M50	50
		M100	100

4.4.6.2 Epruvetele de încercare

Pentru determinarea rezistențelor la compresiune au fost utilizate, în primul rând, resturile de prisme, rezultate după încercarea la încovoiere, conform SR EN 1015-11 [172]. Pe lângă resturile de prisme, au fost confecționat cilindrii standard cu diametrul de 150 mm și înălțime de 300 mm, în vederea determinării rezistenței la compresiune, necesari pentru măsurarea pe cale experimentală a modulului de elasticitate, conform SR EN 12390-13/2013: *Testing hardened concrete. Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression* [177].

Importanța efectuării acestei determinări și motivația cercetării este prezentată în subcapitolul §4.4.8 Determinarea modulului de elasticitate. Prezentarea și detalierea epruvetelor utilizate se găsește în §4.4.8.2 Eșantioanele de încercare.

4.4.6.3 Aparatura și echipamentele utilizate

Rezistența la compresiune pe resturile de prisme a fost determinată în prima etapă cu ajutorul presei hidraulice automatizată din dotarea laboratorului Facultății de Mecanică și în etapa a doua cu ajutorul presei Tecnotest (Italina, 2006), Figura 4.12 (a), din dotarea laboratorului disciplinei Materiale de construcții, folosind aceleași plăcuțe metalice pentru transmiterea eforturilor Figura 4.12 (b).

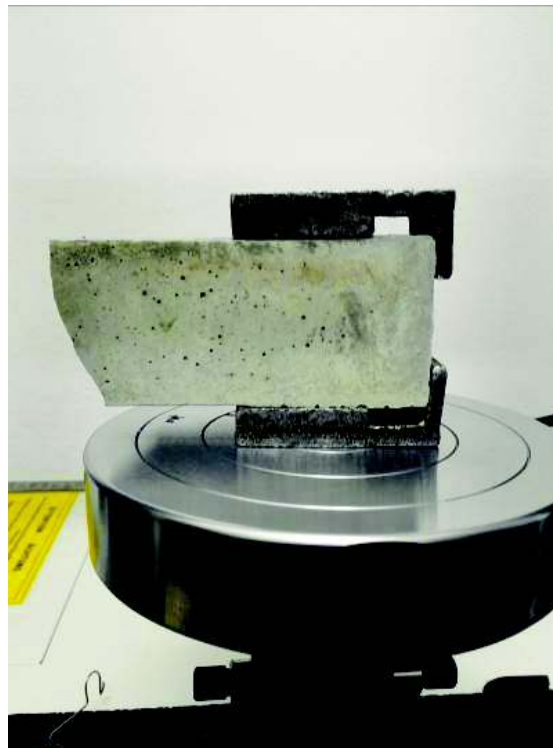
Rezistența la compresiune pe cilindri a fost determinată folosind presa hidraulică Advantest 9 - Controls-Group Italia, Figura 4.12 (c), din dotarea Laboratorului Central al Facultății de Construcții. Toate determinările eu fost efectuate în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca. Presa Advantest 9 este prezentată detaliat în secțiunea §4.4.8.3.

Figura 4.12 – Determinarea rezistenței la compresiune în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca; (a) presa hidraulică Tecnotest, laboratorul de Materiale de Construcții; (b) plăcuțele utilizate în cazul resturilor de prisme, laboratorul Facultății de Mecanică; (c) presa hidraulică Advantest 9, Laboratorul Central.

(a)



(b)



(c)

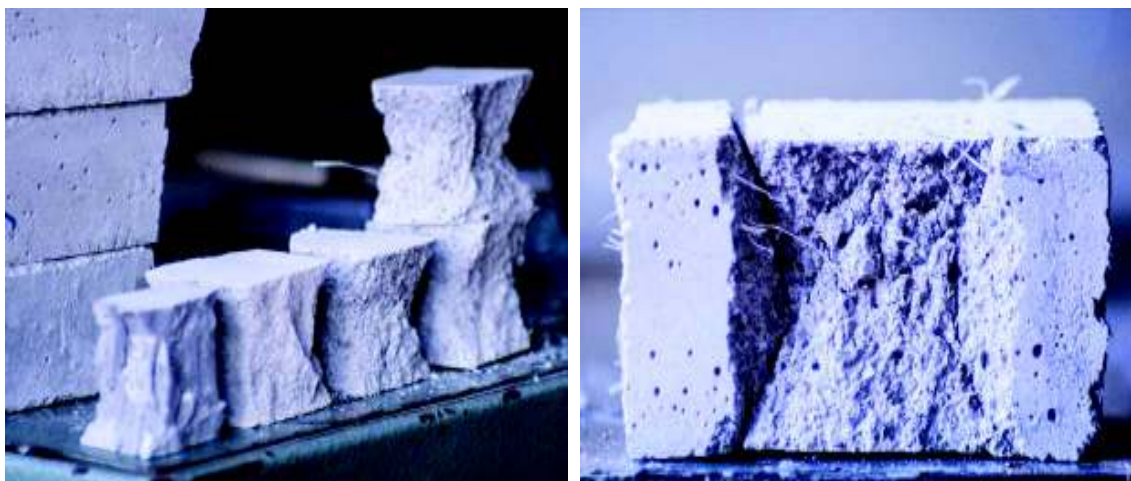


4.4.6.4 Procedura de determinare și rezultatele încercării

Prin intermediul plăcuțelor prezentate și în Figura 4.12 (b), forța a fost aplicată perpendicular pe direcția de turnare (rezistențe mai mici datorită segregării) până la cedarea epruvetelor (Figura 4.13).

Plăcuțele metalice utilizate sunt în conformitate cu ISO 6507-1, și au suprafața de contact de 40x40 mm \pm 0.1 mm (contact plăcuță-epruvetă). După alinierea cu atenție și verificarea ca sarcina să fie aplicată întregului lățime, proba a fost supusă încercării la compresiune, până la cedarea acestuia, și au fost înregistrate forțele, respectiv rezistențele prezentate în Tabelul 4.12.

Figura 4.13 – Modul de cedare a resturilor de prisme după încercarea la compresiune. Tip și mod de cedare corespunzător, conform standardul în vigoare.



Tabelul 4.12 – Valoarea rezistențelor la compresiune ale mortarelor, determinate pe cale experimentală în prima și în a doua etapă pe resturile de prismă.

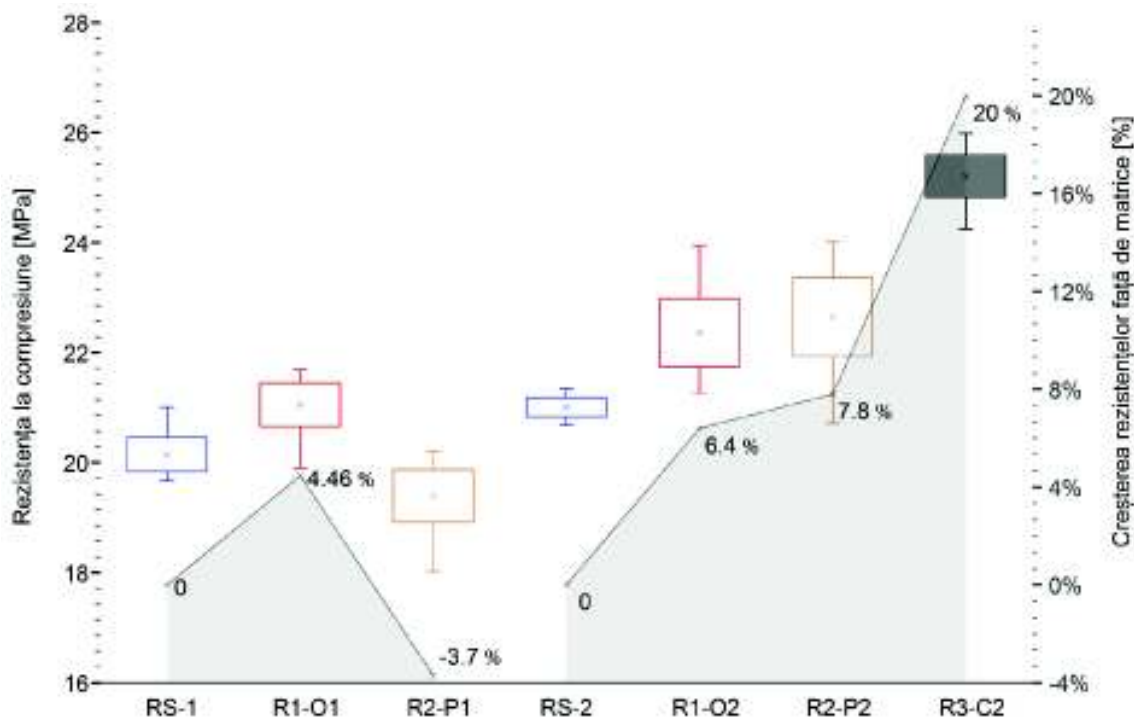
Denumire probă	Forța de rupere [kN]	Rezistența la compresiune [N/mm ²]	Deformația [-]	Rezistența la compresiune medie [N/mm ²]
RS-1	33.62	21.01	0.003955	20.15
	31.47	19.67	0.003575	
	31.59	19.74	0.003850	
	32.27	20.17	0.003900	
R1-O1	31.84	19.90	0.003650	21.05
	34.15	21.34	0.003575	
	34.71	21.69	0.004125	

	34.04	21.28	0.004275	
R2-P1	31.22	19.52	0.002800	
	32.32	20.20	0.003050	19.40
	28.85	18.02	0.004900	
	31.74	19.84	0.004650	
RS-2	33.18	20.74	-	
	34.15	21.34	-	21.01
	33.09	20.68	-	
	34.04	21.28	-	
R1-O2	36.37	22.73	-	
	34.04	21.27	-	22.36
	34.40	21.50	-	
	38.32	23.95	-	
R2-P2	37.29	23.30	-	
	33.15	20.71	-	22.65
	38.43	24.01	-	
	36.11	22.56	-	
R3-C2	41.57	25.98	-	
	38.79	24.24	-	25.21
	39.99	24.99	-	
	40.99	25.62	-	

Din Tabelul 4.12 reiese că rezistența cea mai mare la compresiune, la fel ca și la încovoiere, s-a obținut la R3-C2, adică în cazul utilizării fibrelor de carbon. Cu această valoare a depășit rezistența la compresiune a materialului de referință (RS2) cu 20%, respectiv cu 12% compozitul cu aceeași cantitate de fibre de polipropilenă și echivalentul acestuia (14%), având în compoziție fibre de oțel.

La prima vedere o creștere a rezistențelor la compresiune se poate observa prin adăugarea cantității mai mare de fibre, atât la R1-O2, cât și la R2-P2, față de R1-O1 și R2-P1, însă trebuie avut în vedere faptul că proba martor, adică matricea de bază ale compozitelor în a doua etapă a avut o rezistență mai mare la compresiune decât RS-1 (matricea în prima etapă). Creșterea rezistenței la compresiune a compozitelor față de matricea acestora este ilustrată în Figura 4.14.

Figura 4.14 – Rezistențele obținute la compresiune. Variația rezultatelor determinate pe patru epruvete și diferența față de matricea acestora.



Această figură evidențiază diferența între valorile obținute la același grup de probe (domeniul de variație a rezistențelor în cadrul fiecărei rețetă) și diferența valorilor medii față de mortarul standard, exprimată în procente. Se poate vedea că la o cantitate mai mare de fibre în cazul polipropilenei (R2-P2), domeniul de variație a rezultatelor obținute este destul de mare (diferența între valoarea minimă și maximă), în schimb la mortarele standard, rezistențele obținute pe cele patru epruvete sunt apropiate. Acest lucru se poate datora neomogenității distribuției fibrelor de polipropilenă și/sau orientarea fibrelor față de direcția forței aplicate.

Tot la acest compozit, conținând macro-fibre de polipropilenă, o micșorare a rezistenței la încovoiere (~3.7%) a fost înregistrată în prima etapă, ceea ce în a doua etapă, la un conținut la mai mare de fibre nu s-a mai produs. Literatura de specialitate confirmă efectul negativ posibil asupra rezistenței la compresiune ale macro-fibrelor flexibile cu raport de aspect mare. Acest efect negativ este direct legat de creșterea porozității datorită dificultății de compactare, care este intensificat cu creșterea procentului de armare, respectiv legat de modulul de elasticitate mult mai scăzut al fibrelor de polipropilenă în comparație cu cel al matricei. Având în vedere rezultatele obținute în a doua etapă, putem considera că acest studiu nu confirmă cele

menționate, având în vedere că scăderea rezistenței s-a produs la procentul mic de armare.

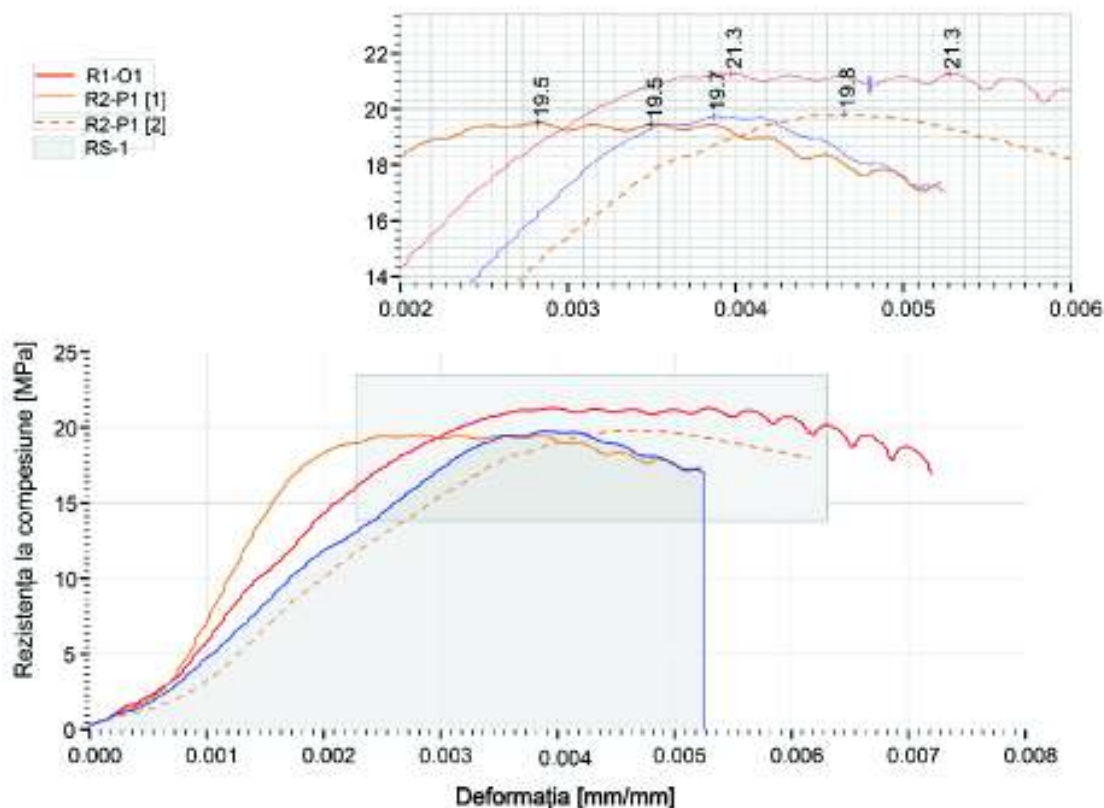
În cazul fibrelor de oțel o ușoară creștere se poate observa atât în prima, cât și în a doua etapă, însă această creștere nu este proporțională cu cantitatea adăugată (comparație R1-O1 și R1-O2 cu RS-1 și RS-2). Se poate considera deci, că un procent optim există în fiecare caz: fracția de volum mare ale fibrelor în cazul oțelului nu influențează semnificativ rezistența la compresiune, însă în cazul polipropilenei, o influență pozitivă se poate constata odată cu creșterea cantității de fibre.

Neavând rezultate în cazul fibrei de carbon în prima etapă, efectul procentului de armare în acest caz nu se poate discuta, însă utilizarea acestora într-o cantitate de 3 kg/m^3 (R3-C2) a produs cea mai mare creștere a rezistenței la compresiune față de RS-2 (matrice). Aceasta se poate explica prin proprietățile mecanice și dimensiunea fibrelor, respectiv aderența și compatibilitatea acestora cu matricea cimentoasă.

În ceea ce privește rezistențele la compresiune determinate pe cilindri, valori mai ridicate au fost înregistrate în toate cazurile, în comparație cu rezultatele obținute pe prisme. Lucrările [135] [87], privind variația rezistențelor la compresiune în funcție de forma și dimensiunea epruvetelor, demonstrează o tendință contrară de cea constatată în lucrarea de față. În lucrările menționate, rezistențele mai mari au fost obținute la grupurile de epruvete având forma cubică, în cadrul căroră creșterea s-a produs odată cu scăderea dimensiunii epruvetelor. În cazul betoanelor se știe că rezistența la compresiune a unui cub este cu aproximativ 20% mai mare decât a cilindrului realizat din același amestec. De asemenea, trebuie menționat că rezistența compozitului cu fibre de carbon, determinată pe cilindru, nu a prezentat o creștere semnificativă față de materialul de referință, ca și în cazul prismelor.

Figura 4.15 prezintă răspunsul și diagrama specifică efort-deformație la compresiune, obținută în prima etapă. Comparând deformațiile specifice aferente tensiunilor maxime obținute în acest studiu cu valorile din lucrările [7][55][98], se poate afirma că determinarea a condus la rezultate similare, ținând cont de faptul că raportului A/C mai mare determină creșterea capacității de deformare a materialului, iar cu scăderea cantității de ciment materialul devine mai rigid. Pe diagrama prezentată în Figura 4.15, curbele caracteristice sunt corectate, eliminând o parte din nelinearitatea curbei pe primele porțiuni care se datorează așezării inițiale a probelor.

Figura 4.15 – Diagrama de efort-deformație înregistrată la compresiune în prima etapă de încercare.



Se poate observa la RS-1 că diagrama este una tipică materialelor fragile: rigiditatea materialului scade după atingerea efortului unitar maxim, iar panta curbei este puternic descendentă în zona post-fisurare. Diagrama mortarelor R1-O1 și R2-P1, după atingerea valorii maxime a eforturilor, în zona post-fisurare, este alterată ca urmare a prezenței fibrelor. La aceste compozite, deși rezistențele înregistrate prezintă valori apropiate de cea a mortarului tradițional, o redistribuire a eforturilor se poate constata, ceea ce la încovoiere nu a fost pusă în evidență și demonstrată, datorită modului de efectuare a determinării. Astfel, rezultă că mortarele armate cu fibre prezintă încă rezerve suplimentare după atingerea efortului maxim, în domeniul post-elastic. Panta curbei efort-deformație după fisurare este mult mai mică și nu prezintă o coborâre puternică și pronunțată ca și în cazul mortarului tradițional RS-1.

La încercarea epruvetelor RS-1 și R1-O1, un comportament asemănător a fost constatat la fiecare probă din cadrul aceleiași grup de mortar, cu valori ale deplasărilor apropiate, așadar Figura 4.15 prezintă doar o singură curbă caracteristică pentru fiecare tip de compozit. În schimb, prezența fibrelor de polipropilenă (rețeta R2-P1) au

determinat două tipuri de curbe, ambele prezentate în această figură, cu modul de elasticitate mai mic și modul mai mare, raportat la matricea RS-1.

Comparând deformațiile specifice medie, înregistrate la atingerea tensiunii maxime la compresiune, se poate observa că la toate cazurile valori similare au fost obținute: RS-1 – 3.82‰, R1-O1 – 3.91‰ și R2-P1 – 3.85‰. Dacă analizăm însă diagramele prezentate, în cazul fibrelor de polipropilenă se poate constata și o creșterea a capacității de deformare cu 20% la R2-P1 [2], dar tot prin utilizarea acestor fibre se poate observa și o scădere a acesteia cu 27% la R2-P1 [1]. Acest fenomen în cazul R2-P1, cel mai probabil se datorează neomogenității structurii materialului și a gradului diferit de compactare, datorită macro-fibrelor de polipropilenă.

Deși, în comparație cu diagramele înregistrate la încovoiere, Figura 4.15 pune în evidență avantajul prezenței fibrelor după fisurare (domeniul post-elastic), creșterea capacității de disipare a energiei nu se poate calcula. În cazul betoanelor aceasta se evidențiază prin valoarea ariei cuprinse între axa orizontală și curba caracteristică determinată până la valoarea deformației specifice egală cu ~6 ‰ [127]. Deci, această caracteristică, fără diagrama completă, nu se poate determina conform criteriului menționat, dar se poate considera că pe baza tendinței evidențiată în Figura 4.15, privind curba caracteristică în zona post-fisurare, se poate admite că o creștere a capacității de disipare a energiei a fost adusă prin încorporarea fibrelor discontinue în masa mortarului tradițional.

Se pot observa, de asemenea, diferențe semnificative între gradul de deteriorare în cazul materialului nearmat și cel armat cu fibre în Figura 4.16. Se vede, în mod clar, că deteriorarea și macro-fisurile au fost dominante în RS-2, în timp ce în cazul compozitelor armate cu fibre, mai multe micro-fisuri s-au concentrat/coalizat în macro-fisuri. Aceste macro-fisuri s-au dezvoltat în mare măsură fără smulgerea fibrelor, astfel funcționând ca legături pentru transmiterea eforturilor („bridge-effect”).

Figura 4.16 – Epruvetele cilindrice după încercarea la compresiune.

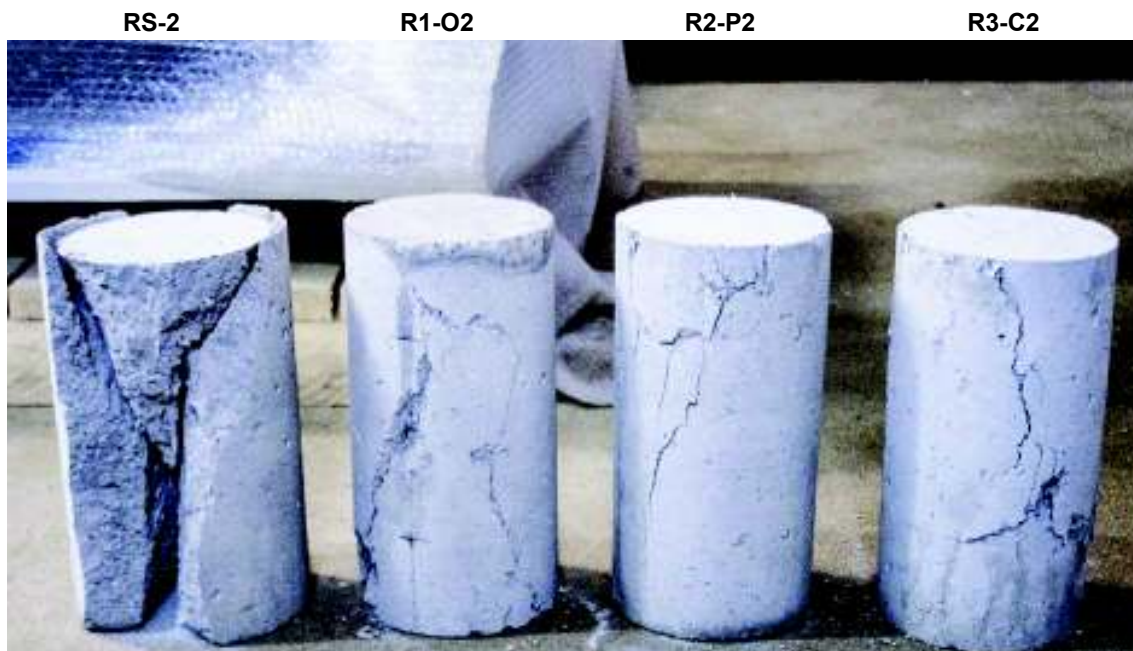
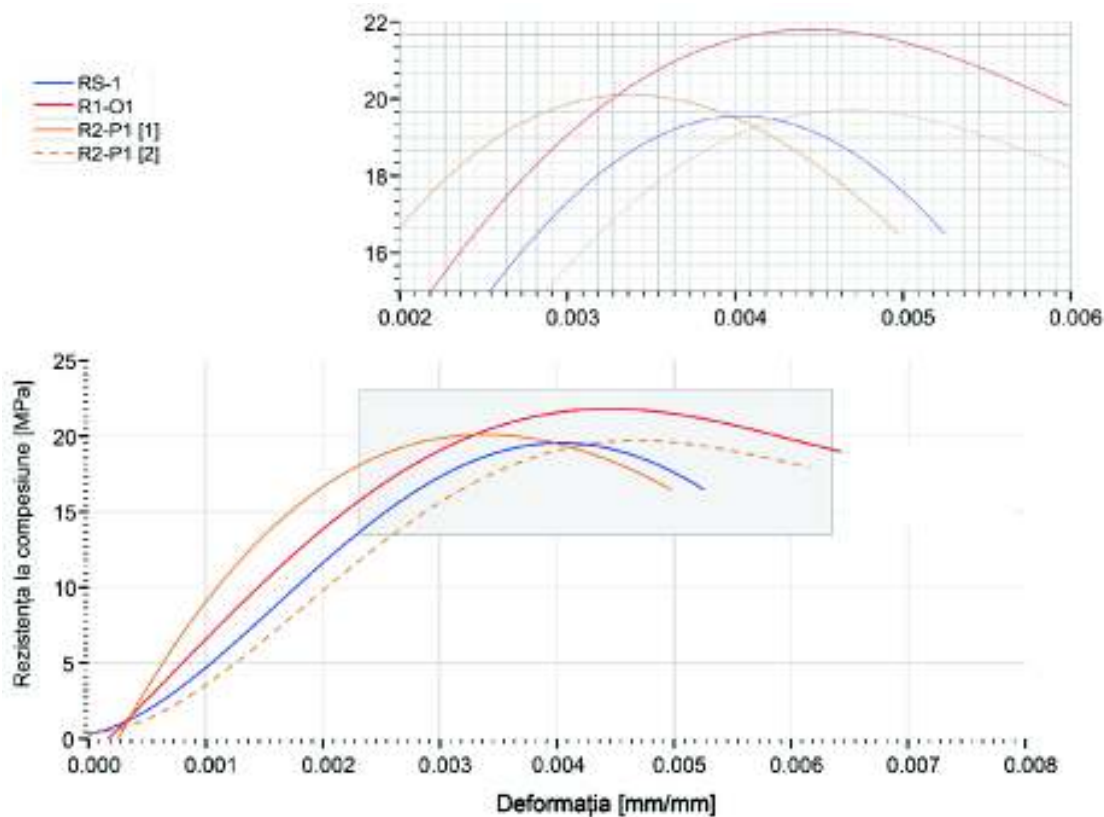


Figura 4.17 – Diagrama de efort-deformație idealizată pentru compozite testate în prima etapă. Curbele reale înlocuite cu cele aproximare prin interpolare polinomială.



4.4.7 Determinarea rezistenței la întindere directă

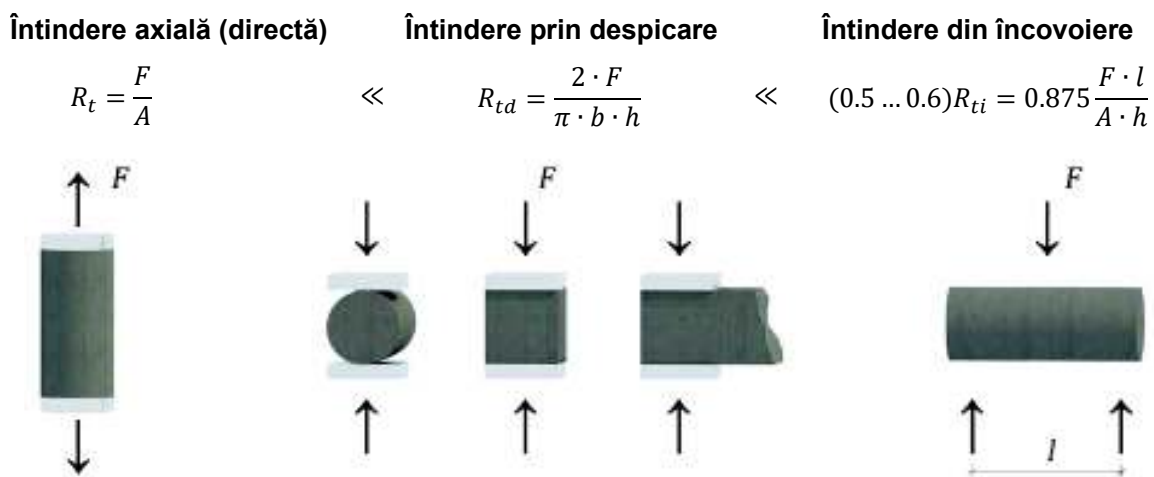
4.4.7.1 Considerente generale. Scopul determinării

Mortarul armat cu fibre este o clasă de materiale compozite, în majoritatea cazurilor pe bază de ciment, proiectat să prezinte proprietăți superioare în comparație cu matricea de bază și durabilitate ridicată, inclusiv rezistențe mecanice sporite. Cercetările teoretice pe această temă și experimentele efectuate în acest sens au indicat că materialele cimentoase armate cu fibre (inclusiv toate materialele de construcții pe bază de ciment) pot prezenta proprietăți mecanice la întindere mai mari decât cele așteptate de la matricea de bază convențională a acestora.

S-a prezentat la introducerea acestui capitol că rezistența la compresiune este o caracteristică importantă, utilizată în mod obișnuit ca mijloc de evaluare a performanței betoanelor și mortarelor, însă în cazul armării cu fibre, această proprietate nu este suficientă pentru determinarea performanței acestora.

Rezistența la întindere a betonului sau a mortarului este mult mai mică decât rezistența la compresiune, în mare măsură datorită ușurinței cu care fisurile se propagă sub sarcina de tracțiune, și se admite determinarea acesteia în trei moduri: întindere directă (uni-axială), întindere prin despicare și estimarea prin încercări la încovoiere (Figura 4.18).

Figura 4.18 – Posibilitățile de determinare și estimare a rezistenței la întindere în cazul betoanelor și mortarelor. Relația între rezistențe în funcție de modul de determinare.



Datorită dificultății de centrare a forței aplicate, se admite ca rezistența la întindere să fie calculată pe cală empirică pe baza rezistențelor rezultate din încovoiere sau întindere prin despicare. O altă problemă în acest caz este prinderea epruvetelor în mod satisfăcător, fără deteriorarea acestuia, pe lângă asigurarea aplicării forței fără inducerea excentricității. Având în vedere cele menționate, această testare nu este standardizată în cazul betoanelor sau mortarelor, și este utilizată rar. Există însă standardul internațional pentru determinarea rezistenței la tracțiune uni-axială a compozitelor avansate cu matrice ceramică: ASTM C1273 – 15: Standard Test Method for Tensile Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Ambient Temperatures [196]. Metoda de testare descrisă în acest standard se aplică, în primul rând, materialelor ceramice avansate⁶ care prezintă un comportament macroscopic izotrop și omogen, dar și materialelor compozite cu matrice ceramică (minerală), având în compoziție armături sub formă de whisker sau particule, precum fibre discontinue, dacă compozitul rezultat respectă cerința menționată privind comportamentul macroscopic. Compozitele armate cu fibre continue, în general, nu îndeplinesc această caracteristică (izotrop sau cvasi-izotrop și omogen), prin urmare aplicarea standardului și metodei descrise în această situație nu este recomandată.

Totuși, această încercare nu este nouă, experimente efectuate în vederea determinării rezistenței la întindere directă a betonului în literatura de specialitate apar deja în anii 1928. H.F. Gonnerman și E.C. Shuman au testat epruvete cilindrice de beton⁷, prinderea fiind realizată la capetele eșantioanelor cu curele de oțel pe toată circumferința elementului. Dezvoltarea metodei de testare la întinderea directă a betoanelor însă nu s-a oprit aici. În următoarele decenii au apărut alte metode, dintre care metoda utilizată și în prezent, și anume lipirea prinderilor cu adeziv la capetele epruvetelor, confecționate din oțel. Avantajul acestui tip de testare este că eșantionul poate fi încărcat fără inducerea unor solicitări semnificative de încovoiere. Cu toate acestea, o astfel de metodă necesită lipirea cu adeziv puternic și costisitor (se folosește rășină epoxidică), respectiv un număr mare de elemente metalice care vor fi lipite de epruvete. Mai rar, este utilizată metoda care presupune încorporarea directă a elementului metalic în epruveta de testare în faza de fabricație. Apariția unor tensiuni locale, în apropierea suprafețelor aderente, sau prindere în acest caz, conduc adesea

⁶ *Ceramică avansată - un material ceramic ingineresc, de înaltă performanță, predominant nemetalic, anorganic, cu atribute funcționale specifice.*

⁷ *Compression, Flexure and Tension Tests of Plain Concrete, ASTM Proceeding 1928 - Volume 28*

la un eșec prematur, neuniform, iar realizarea și centrarea corectă a elementelor metalice pe capătul epruvetelor conduc la creșterea semnificativă a duratei testării.

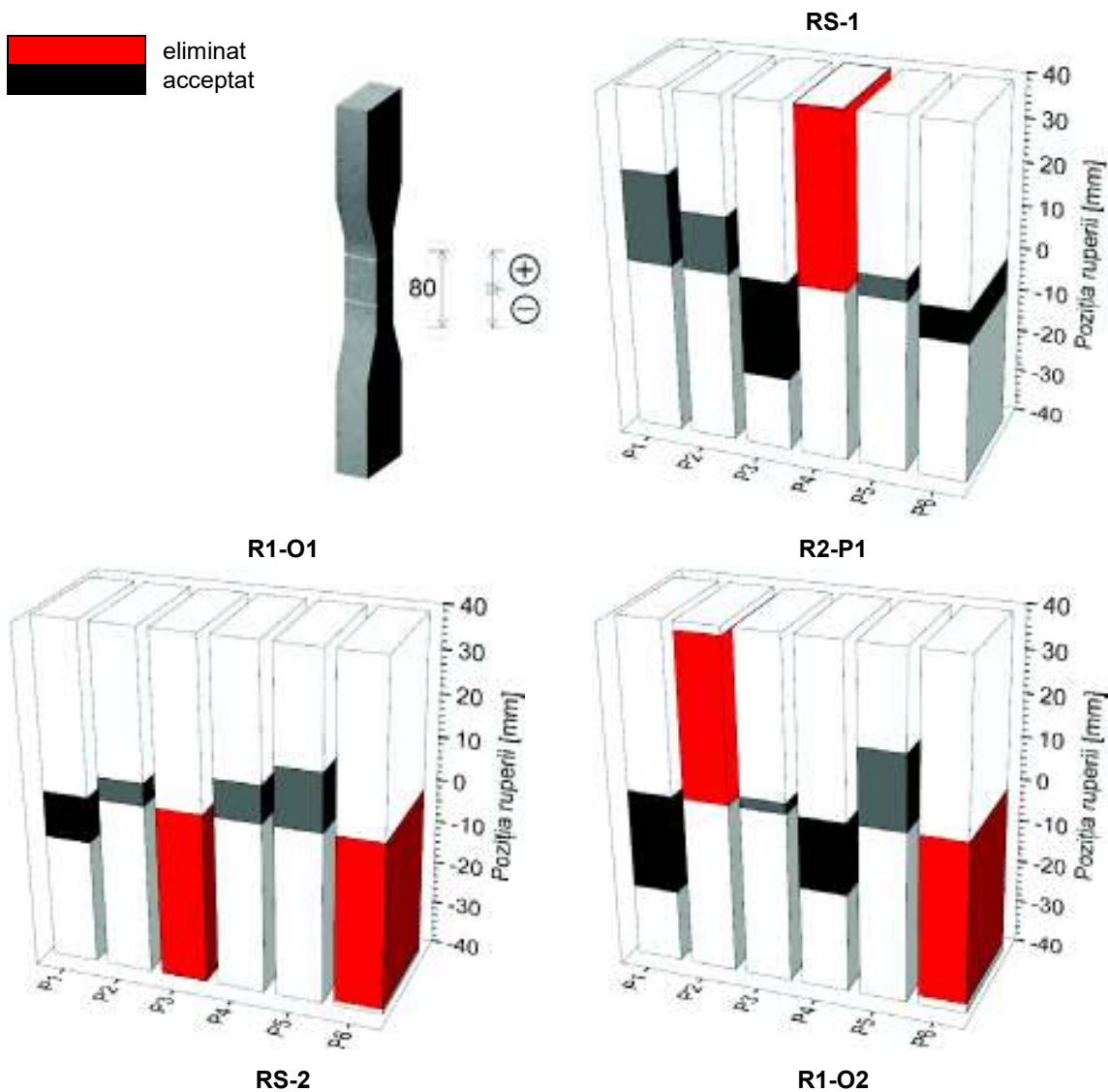
Ulterior au apărut tipurile de eșantioane având secțiune pătrată la capete, și eșantioanele tip „dog-bone”, care permit o prindere mai ușoară prin intermediul unor dispozitive speciale. Deficiența acestor dispozitive reprezintă că unele permit rotirea relativă a capetelor, dând astfel posibilitatea încovoierii inițiale, în timp ce determină un răspuns post-elastic și rezistență invalidă. Prin urmare, această cercetare a propus încercarea dezvoltării unei metode simple și fiabile de testare la întindere directă, luând în considerare [196], prin intermediul căruia se poate determina răspunsul mecanic la întindere uni-axială, aplicabilă atât în cazul mortarului simplu, cât și în cazul celui armat cu fibre. Rezultatele obținute sunt comparate cu valorile obținute în mod empiric, și nu în ultimul rând, cu valorile determinate în urma efectuării testării virtuale în penultimul capitol.

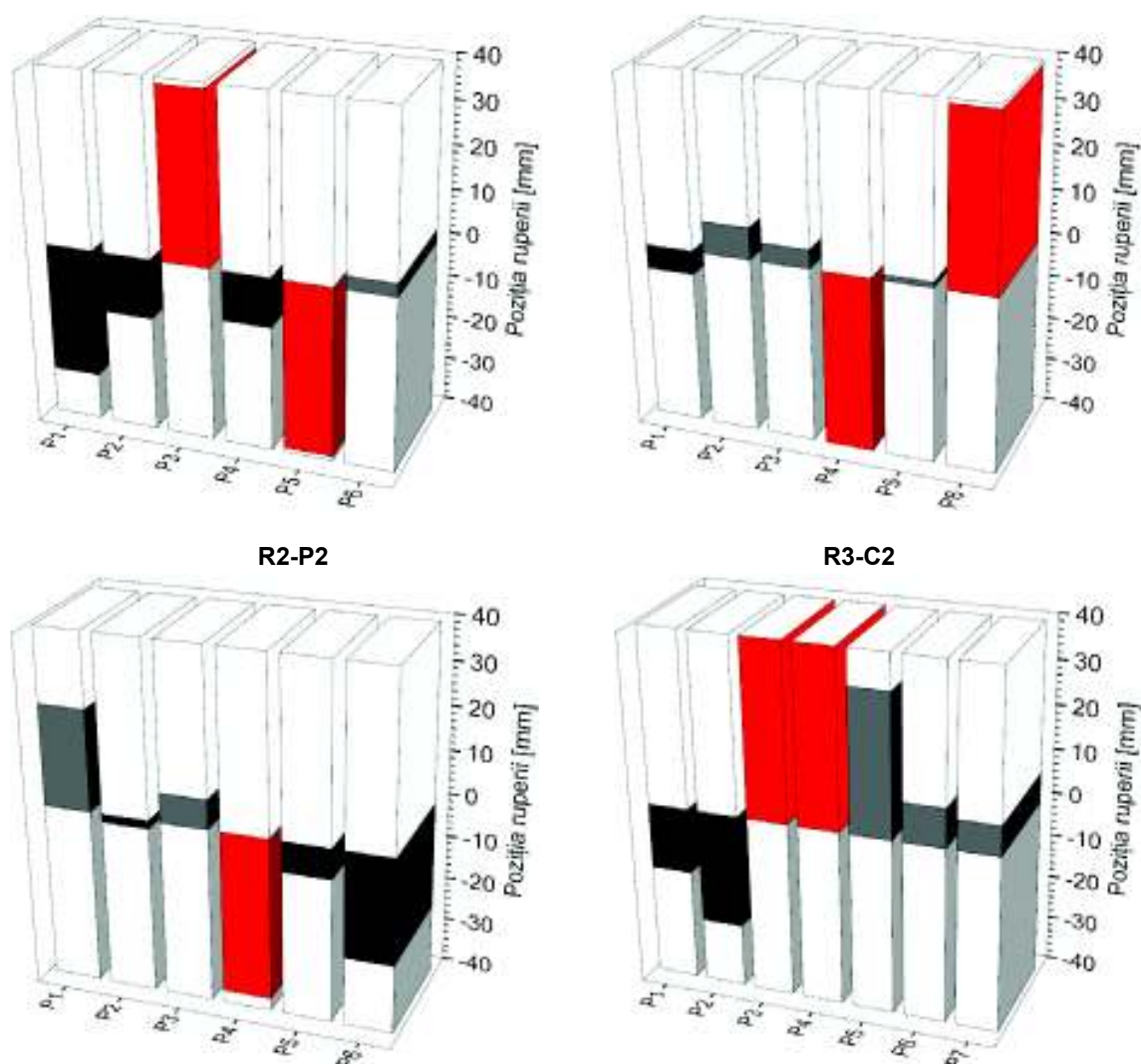
4.4.7.2 Eșantioanele de încercare

4.4.7.3 Aparatura și echipamentele utilizate

4.4.7.4 Procedura de determinare și rezultatele încercării

Figura 4.19 – Ruperea epruvetelor și distanța față de mijlocul secțiunii constante. Hașura roșie indică ruperea necorespunzătoare (distanță prea mare față de ± 0.00) și proba care a fost eliminată.





4.4.8 Determinarea modului de elasticitate la compresiune

4.4.8.1 Considerente generale. Scopul determinării

4.4.8.2 Eșantioanele de încercare

4.4.8.3 Aparatura și echipamentele utilizate

4.4.8.4 Procedura de determinare și rezultatele încercării

5 CAPITOL 5

ANALIZA VIRTUALĂ ALE COMPOZITELOR STUDIATE

5.1 Considerente generale privind proiectarea asistată de calculator și modelarea mortarelor armate dispers

În primele capitole a fost prezentat că mortarul armat dispers este utilizat în diferite aplicații, atât la construcții civile, cât și la cele industriale, la construcții noi și performante, precum și la structuri vechi și degradate, în vederea reabilitării și restabilirii capacității portante ale unor elemente structurale.

Examinarea mezo-structurii a materialelor eterogene atât în cazul modelării multi-scalare, cât și în cazul tehnologiei materialelor este o problemă și o sarcină importantă [15]. După prezentarea metodelor și a teoriei pe care se bazează examinarea și simularea (proiectarea asistată de calculator) materialelor eterogene (§ 3 Aspecte privind testarea virtuală a mortarelor), acest capitol prezintă analiza mortarelor armate cu fibre folosind metode semi-analitice și numerice bazate pe modele cu elemente finite.

Dezvoltarea materialelor noi și performante pe bază de ciment și cerințele diversificate determină provocări noi în ceea ce privește proiectarea asistată de calculator și simularea comportării acestor materiale. Această abordare în vederea determinării proprietăților este importantă, în primul rând, în cazul dezvoltării materialelor cimentoase cu performanțe ridicate, însă aplicarea analizei virtuale este din ce în ce mai des utilizată și cercetată în cazul materialelor de construcții de orice fel. Prezenta lucrare își propune dezvoltarea modelelor semi-analitice și numerice implementate în programe de calcul, în vederea determinării proprietăților materialelor pe bază de ciment și analiza virtuală a compozitelor studiate și testate (prezentate în capitolul anterior – § 4 Programul experimental).

Aceste materiale, în vederea simulării, pot fi privite ca materiale compozite alcătuite din mai multe faze constituente, în funcție de nivelul analizei (scală). Numărul constituenților considerați (compozit cu două faze, trei ș.a.m.d.) depinde, deci, în primul rând, de nivelul analizei (analiză multi-scalară). În cazul materialelor compozite

cimentoase, o analiză virtuală poate fi efectuată atât la nivel macro-, mezo-, micro-, cât și nano. La nivel macro mortarul poate fi privit ca un material omogen cu proprietăți izotrope, care la mezo-scară este alcătuit din agregat (nisip), piatră de ciment și zona ITZ. La nivel micro, structura compozitului este alcătuită din pasta de ciment (matrice), agregat fin (incluziune), zona ITZ și pori sau chiar micro defecte structurale. Pasta de ciment la o scară microscopică este considerată un material omogen, deși la o scară inferioară acestuia (nano) este, de asemenea, o structură eterogenă (material compozit, § 4.2.1 Ciment Portland compozit), rezultată în urma procesului de hidratare. În general, putem considera că în calculele și analizele ingineresti, modelarea structurii materialelor se efectuează la macro-scară. Lucrările și cercetările de specialitate [15], [16], [64], [86], au arătat că un model construit la mezo-scară oferă o reprezentare adecvată și permite o analiză eficientă privind comportamentul și proprietățile materialelor cimentoase. În același timp, un model construit la mezo-scară permite și o simulare mai reprezentativă în ceea ce privește răspunsul materialului în comparație cu un model omogen (analiză la macro-scară). Această scară leagă nivelul micro și cel macro, iar analiza efectuată la acest nivel este specifică științelor materiale.

În studiul preliminar al autorului, mortarul tradițional a fost analizat privind ca un material compozit alcătuit din pastă de ciment, agregat fin (nisip), ITZ și pori, considerând proprietățile fiecăruia, acceptând anumite considerente simplificatoare în ceea ce privește legile constitutive care descriu comportamentul acestor faze, respectiv legătura între acestea (legătură perfectă) [110].

Simularea comportării materialelor în lucrarea de față, fie vorba de analiza numerică sau semi-analitică, se bazează pe micro-mecanica materialelor (teoria micro-mecanicii continue) și utilizează un element de volum reprezentativ (RVE), aplicată prin intermediul programul Digimat (e-Xstream Engineering, MSC Software) [145]. Teoria micro-mecanicii continue oferă un cadru pentru analiza virtuală a materialelor eterogene, separând materialul în faze constitutive cu proprietăți materiale constante, luate în medie (a se vedea § 3.1, § 3.2, § 3.3). Conform acestui concept, scopul principal este prezicerea răspunsului materialului compozit (proprietăți macroscopice) pe baza geometriei, a fracțiunilor de volum și a proprietăților fazelor individuale – în urma procesului de omogenizare (modele analitice sau numerice, computaționale). Așadar, proprietățile individuale ale fazelor au fost utilizate pentru a

calcula caracteristicile macroscopice ale compozitelor, considerând un element de volum reprezentativ (RVE), care a fost prezentat și descris detaliat în secțiunea § 3.2 Analiza multi-scalară a materialelor compozite.

În comparație cu metodele de testare tradiționale (încercări experimentale), această abordare are avantajul că permite efectuarea mai multor analize și examinarea diversilor parametri în timp relativ scurt, în funcție de complexitatea modelelor construite de proiectant, dar în mod evident, nu înlocuiește testele tradiționale și încercările experimentale propriu-zise.

Totodată, metodele analitice, fie vorba de cele bazate pe teoria micro-mecanicii a materialelor sau regresii matematice și date empirice (fenomene fizice neglijate), metoda acceptă ipoteze și simplificări majore, care limitează aplicabilitatea acestora în multe cazuri sau conduc la erori și abateri semnificative. Pentru a depăși aceste limitări și neajunsuri, instrumente alternative (software speciale) au fost inventate în vederea proiectării materialelor compozite. Una dintre metodele computaționale cele mai frecvent utilizate se bazează pe metoda elementului finit (MEF). Acestea permit o simulare mai complexă, oferind posibilitatea analizei apariției deformațiilor și tensiunilor localizate și mecanismelor de cedare. Teoria Mean-Field Homogenization (MFH) și metodele semi-analitice au fost introduse în acest studiu pentru a simula, într-o formă mai simplă și eficientă din punct de vedere al timpului de calcul, comportamentul macro-mecanic ale compozitelor pe bază de ciment, oferind un punct de referință suplimentar pentru testarea eficienței abordării cu MEF.

5.2 Generalități privind metodologia și programul de calcul utilizat

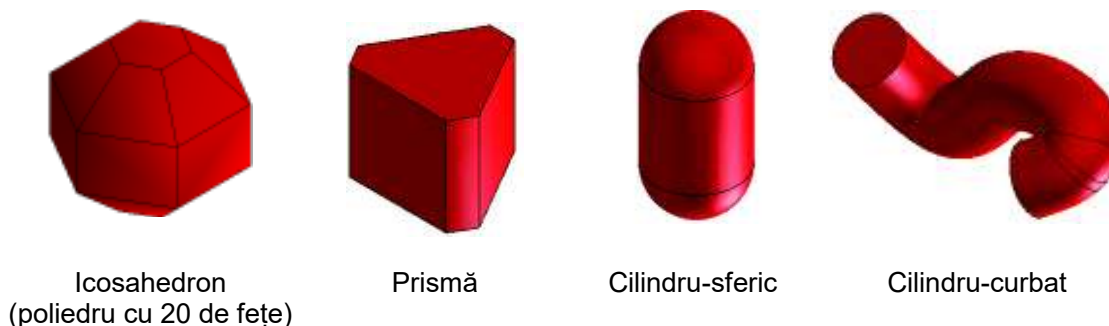
Predicția proprietăților efective pentru un material compozit, bazat pe considerentele micro-mecanicii continue atât în cazul modelelor semi-analitice, cât și al celor numerice, presupune parcurgerea unor etape: cunoașterea (micro) mezo-structurii și reconstrucția RVE-ului corespunzător, recunoașterea proprietăților și comportării constituenților considerați și utilizarea modelelor materiale adecvate pentru fiecare fază, urmat de calculul efectiv în condițiile de limită și încărcare dată. Descrierea detaliată a metodologiei și a pașilor parcurși vor fi prezentate în subcapitolele următoare, evidențiind diferențele privind cele două metode alese.

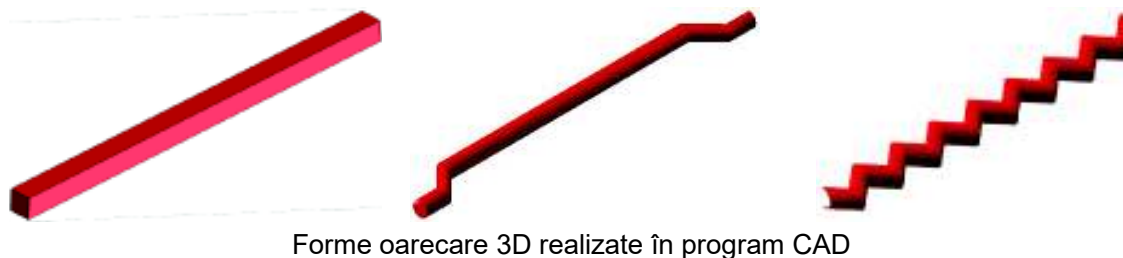
5.2.1 Analiza structurii compozitelor în vederea definirii RVE-urilor

Construirea unui model (RVE realistic), în cazul compozitelor cu incluziuni orientate și distribuite haotic, a fost o problemă complexă a cărei rezolvare necesita timp îndelungat chiar și după dezvoltarea proiectării asistată de calculator și apariția unor programe complexe. Aceasta presupune adesea, și în momentul de față, utilizarea unor programe secundare sau chiar cunoașterea unor limbaje de programare în vederea generării distribuției și orientării 3D aleatorii (Random 3D). Interesul în acest domeniu și importanța materialelor compozite de acest tip, ulterior a determinat conceperea și apariția unor programe speciale precum Digimat de la e-Xstream Engineering (MSC Software Belgium) care ușurează și reduce semnificativ timpul de lucru privind pașii preliminari și construirea, respectiv generarea modelelor realiste tridimensionale. Programul rezolvă, astfel, o problemă majoră și anume plasarea intruziunilor în așa fel încât să nu se intersecteze (suprapunerea cu incluziunile deja plasate și distribuția spațială cât mai omogenă macroscopic).

În program este implementată o varietate mare de geometrii în vederea definirii cât mai apropiată a formei incluziunilor (Figura 5.1), dar este posibilă și importarea geometriei exacte, desenată într-un program CAD 3D precum Rhino, Allplan, AutoCAD etc., și sunt incluse algoritme complementare, de exemplu pentru stimularea aglomerării incluziunilor (formarea ghemelor) și generarea rapoartelor statistice privind distribuția incluziunilor.

Figura 5.1 – Exemple de geometrii implementate în Digimat-FE pentru definirea formei incluziunilor.





În general, pentru definirea precisă a RVE-ului, micro-structura materialului este supusă unor analize, precum tomografie computerizată (CT) sau microscopie electronică (SEM), pe baza cărora sunt identificate fazele constituente (caracteristicile importante și specifice acestora) sau a compozitului (porozitate, defecte structurale, interfață matrice-incluziune etc.), dar și a unor fenomene care la nivel macroscopic nu pot fi identificate. Bineînțeles, considerarea "exactă" a unei structuri eterogene ar necesita o durată de calcul nerezonabil de lungă și calculatoare cu capacitate aproape infinit de mare, astfel, simplificările privind morfologia materialului sunt inevitabile.

Neavând posibilitatea efectuării unei astfel de investigații, compozitele au fost analizate doar vizual și au fost capturate câteva imagini macro al secțiunii epruvetelor dog-bone după cedarea acestora la solicitarea de întindere uni-axială. Imaginile cu mezo-structura compozitelor sunt prezentate în figurile de mai jos, Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5.

Una dintre principalele ipoteze simplificatoare în ceea ce privește modelarea și construirea RVE, este alcătuirea și compoziția materialelor studiate. Fiecare a fost privit ca un material compozit alcătuit din două faze distincte: mortarul pe bază de ciment și fibrele discontinue alese pentru investigare. Este o ipoteză simplificatoare, întrucât și matricea acestui compozit (mortarul) este un material neomogen, alcătuit din nisip și pasta de ciment, care la rândul lui include diferite adaosuri (§ 4.2.1 Ciment Portland compozit) și porozitatea intrinsecă, însă la scara de analiză aleasă (mezo-scară), matricea compozitului poate fi privit ca material omogen. În etapa a doua, în vederea simulării imperfecțiunii privind zona de legătură între cele două faze, ITZ a fost modelată ca fază separată, cu proprietăți inferioare matricei.

Deși prezența fibrelor în structura mortarului adesea determină schimbarea porozității a materialului de bază (mortar tradițional), această caracteristică a fost neglijată. Efectul porozității și a prezenței golurilor a fost luat în considerare doar prin

proprietățile efective ale matricei, deși definirea acestora în modelul considerat este posibilă prin introducerea unei faze distinctă, fără proprietăți mecanice (proprietăți mecanice nule). Într-un alt studiu și activitate viitoare, se poate investiga această influență și schimbarea porozității, determinând experimental gradul acestuia, introducând, mai apoi, ca și fază constituantă, porii în modelul construit în vederea analizei virtuale și testarea compozitelor.

După analiza structurii materialelor, procesul propriu-zis de generare al RVE-ului necesită definirea conținutului de fibre în termeni de fracție de volum sau masă și informații privind dispersia și distribuția incluziunilor. În acest studiu, s-a realizat o bună dispersie a fibrelor, deoarece nu s-a observat formarea ghemelor (cluster) în urma analizelor probelor. Totodată, în cazul fibrelor de carbon se poate constata formarea unor gheme „locale”⁸, ale căror dispersie este uniformă în matrice. Fibrele scurte și subțiri se mențin într-o măsură oarecare împreună, iar formațiunile rezultate se dispersează uniform (Figura 5.5). Acest efect a fost introdus, considerând fibre mai groase cu o lungime variată, definită printr-un coeficient de modificare (Random size reduction), pe baza unui algoritm implementat în programul de calcul.

5.2.2 Modele materiale și legile constitutive

Datorită caracteristicilor specifice a materialelor studiate, prezentate în capitolele anterioare, un model elastic a fost ales pentru definirea comportamentului fibrelor, respectiv elasto-plastic (cu și fără degradare) pentru matricea de mortar. Proprietățile elastice presupun definirea valorii modulului de elasticitate și coeficientul lui Poisson, iar proprietățile plastice includ rezistențele caracteristice ale materialelor (limita de curgere, hardening modulus etc.).

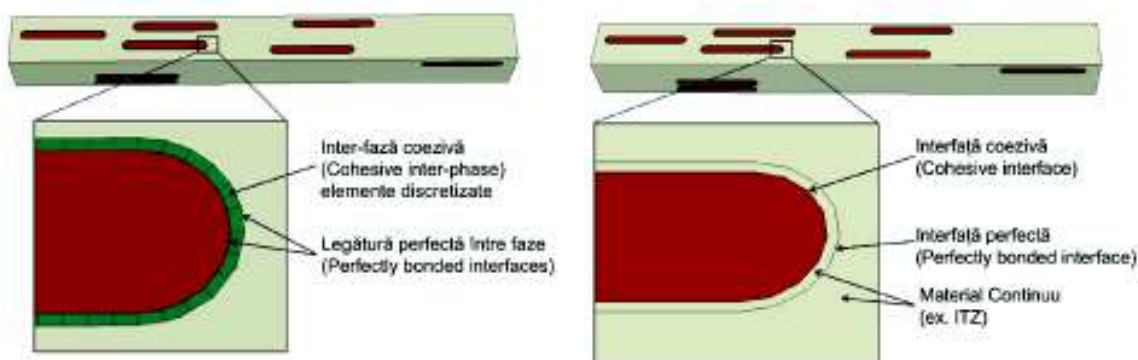
Conform [134], în cazul materialelor cimentoase, cel mai bun rezultat și potrivire cu datele experimentale se poate obține prin adoptarea unui model elasto-plastic cu legea constitutivă de material „power-law”, folosit și în acest studiu. Așadar, modelul constitutiv elasto-plastic cu model de plasticitate J_2 a fost ales pentru matricea compozitului. Acest model se bazează pe criteriul tensiunii echivalente von Mises [86].

⁸ Formarea unei sistem de fibre fără o legătură puternică sau distanță între ele, care se formează și se prezintă după un model anume.

Așa cum a fost prezentat, la compresiune uni-axială materialele studiate au un răspuns elastic până la valoarea σ_{c0} (yield stress - limita de curgere), urmată de un regim plastic, caracterizat de o creștere a tensiunii și a deformației până la atingerea tensiunii ultime σ_{cu} [24]. Sub solicitarea de întindere uni-axială, răspunsul materialelor însă prezintă practic o relație elastic-liniară (E) până la atingea valorii efortului maxim (atingerea tensiunii ultime). În ciuda acestui fapt, și în cazul testării virtuale la întindere uni-axială un model elasto-plastic cu degradare a fost folosit considerând limita de curgere practic egală cu efortul maxim pentru a putea studia evoluția rezistenței la întindere ale compozitelor (modelul elastic permite doar vizualizarea schimbării modulului de elasticitate).

5.2.3 Legătura fazelor constituente

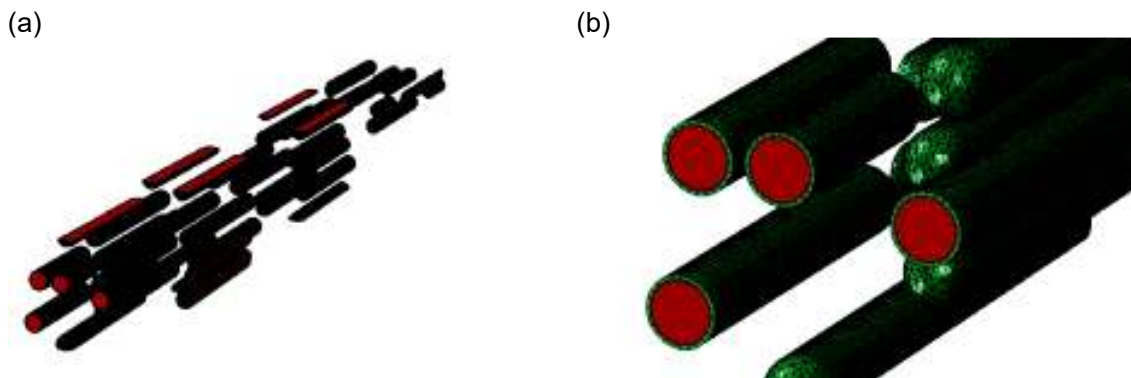
Figura 5.2 – Ilustrarea conceptelor de legătură perfectă, interfață coezivă, inter-fază coezivă și inter-fază material continuu conform Digimat [147]



Tabelul 5.1 – Comparația celor trei cazuri, considerând același matrice polimerică și fibră de sticlă: cazul 1 – inter-fază coezivă (Cohesive inter-phase), cazul 2 – interfață coezivă (Cohesive interface); cazul 3 – legătură perfectă (Perfectly bonded interface), realizat în Digimat-FE. [147], [146]

	Cazul 1	Cazul 2	Cazul 3
Numărul elementelor finite	247 181	340 087	169 615
Numărul nodurilor	453 658	147 457	449 614
Numărul de iterații	50	62	60
Timpul total CPU [s]	63 317 (17h 35m)	20 125 (5h 35m)	229 988 (63h 53m)

Figura 5.3 – Model FE discretizat utilizând tipul „tetra” (Tetra mesh type); (a) Model FE cu matricea eliminată: fibre și stratul de elemente coezive; (b) Vedere close-up a incluziunilor (roșu) și inter-faza coezivă (verde).



5.3 Aplicarea metodelor semi-analitice

5.3.1 Definirea și construirea modelului de material


Schema de omogenizare Mori-Tanaka de ordinul întâi pentru analiză semi-analitică MF a fost selectată în acest studiu. Metoda Mori-Tanaka prezentată în § 3.4.3 a fost propusă de Mori și Tanaka în 1973 și se bazează pe soluția lui Eshelby [99]. Detaliile privind metoda M-T se regăsesc în subcapitolul menționat.


RVE-urile imaginare⁹ au fost construite pe baza caracteristicilor și proprietăților materialelor constitutive, conform celor descrise anterior. Programul utilizat în acest sens a fost Digimat, modulul Digimat-MF. Procesul de lucru se rezumă și a urmat succesiunea pașilor după cum urmează:

- ✂ **Setări preliminare:** tipul analize (analiză mecanică, termică, electrică), schema și ordinul omogenizării, precum și unele setări privind modul de lucru al calculatorului și parametrii de integrare.
- 🌀 **Calcularea cantității,** a volumului de fibră care urmează să fie generat în unitatea RVE (realistic în cazul analizelor numerice și imaginar în cazul analizelor semi-analitice).
- 👉 **Definirea materialelor:** alegerea modelului și a legii constitutive (§ 5.2.2), care descrie comportamentul fiecărei faze (material) în parte. Introducerea în ambele

⁹ Acest modul nu generează (afișează) grafic structura RVE-ului stabilit prin introducerea parametrilor fazelor constituenți.

cazuri (model semi-analitic și numeric) a proprietăților elastice și elasto-plastice ale constituenților, bazate pe determinările experimentale ale autorului (*), declarația producătoarelor (**), respectiv cercetările științifice și considerentele literaturii de specialitate (***). Principalele valori necesare pentru definirea modelului de material includ proprietăți elastice (modulul de elasticitate longitudinal și coeficientul lui Poisson) și plastice (limita de curgere și evoluția curbei caracteristice până la valoarea rezistenței ultime) pentru fibre și matrice, de asemenea.

-  **Definirea structurii (morfologia) compozitului:** generarea compoziției prin adăugarea fazelor și asocierea acestora cu materiale definite anterior, setarea relației și a legăturii între acestea. În cazul MF, incluziunile pot fi modelate doar prin forme elipsoidale, determinate prin raportul geometric. Astfel, fibrele de oțel au fost modelate ca elipsoide cu distorsiune accentuată, având raportul geometric 50, rezultând elemente elipsoidale alungite, în timp ce formațiunile de fibre de carbon au fost considerate elipsoide cu abatere mai mică de forma sferică. Fibrele de polipropilenă, având raportul geometric 27-30, se situau între cele de oțel și carbon, privind distorsiunea și forma elipsoidală.

-  **Definirea solicitării, indicilor de cedare și rularea analizei.** Diagramele specifice și valoarea proprietăților elastice sunt generate automat de către post-procesorul programului și sunt listate în secțiunile aferente acestora. După definirea tipului, natra și a direcției solicitării, respectiv rularea analizei, proprietățile elastice, precum și matricea de rigiditate și complianță sunt afișate.

5.3.2 Model compozit cu două faze constituente: matrice și fibră

5.3.2.1 Compresiune uni-axială

5.3.2.2 Întindere directă uni-axială

5.3.3 Model compozit cu trei faze constituente: matrice, fibră și ITZ

5.3.3.1 Compresiune uni-axială

5.3.3.2 Întindere directă uni-axială

5.3.4 Analiza privind modificarea compozitelor prin schimbarea caracteristicilor fibrelor și a fracției volumice

Folosind ultimul model prezentat, pentru o analiză pur teoretică s-a determinat comportamentul și modificarea modulelor de elasticitate ale compozitelor studiate, presupunând că toate fibrele au: (i) aceeași geometrie (RG – raport geometric), respectiv (ii) aceeași fracție volumică (0.3%, 1%, 3%).

În cazul (i) se poate analiza influența geometriei și modificare proprietăților sau a comportamentului prin adoptarea unui aspect geometric diferit față de cel real (analize anterioare).

Utilizând proprietățile geometrice reale ale fibrelor (valori identice utilizate în analizele anterioare), creșterea procentului (ii) ne arată îmbunătățirea fictivă care poate fi adusă de cantitatea mai mare de fibre. Această îmbunătățire a fost denumită una fictivă, întrucât un procent prea mare de armare în realitate determină scăderea rezistențelor, în primul rând datorită dificultății de compactare.

(i) Influența geometriei fibrelor

(ii) Influența creșterii fracției volumice ale fibrelor asupra matricei de mortar

5.3.5 Estimarea coeficientului de eficiență privind orientarea fibrelor

Literatura de specialitate specifică diferite metode empirice (formule de calcul) pentru determinarea modulelor de elasticitate ale materialelor eterogene. Cele mai simple formule iau în considerare doar modulul de elasticitate al constituenților, în funcție de fracția volumică în care sunt prezenți în alcătuirea compozitelor, sau stabilesc valoarea modulului de elasticitate în funcție de rezistența caracteristică, determinată pe cale experimentală.

În lucrarea [64] este prezentată formula (5.1) utilizată pentru determinarea modulului de elasticitate la întindere ale compozitelor armate cu fibre scurte:

$$E = V_m E_m + \chi_1 \chi_2 V_f E_f \quad (5.1)$$

unde E reprezintă modulul de elasticitate longitudinal (m – matrice; f – fibră), V este fracția volumică aferentă fazei constituente, iar χ_2 este coeficientul de corecție al lungimii fibrei și χ_1 coeficientul sau factorul de eficiență al orientării considerate.

Determinarea coeficientului de eficiență χ_1 a fost tratată și în § Transferul de tensiuni între fascicule (filamente interioare) în cazul armăturilor fibrilate pot să apară prin frecare în punctele de contact (Figura 2.27), care în cazul matricelor cimentoase iau naștere prin formarea produselor de hidratare. În cazul fibrelor multi-filamente, dimensiunile spațiilor dintre fascicule nu depășesc câteva μm și, prin urmare, este dificil ca granulele de ciment mai mari ($20 \mu\text{m}$) să pătrundă în aceste spații. Acest lucru este valabil, în special, în cazul fibrelor de sticlă, care au o afinitate mult mai scăzută la pasta de ciment decât azbestul. Microstructura rezultată după câteva săptămâni de hidratare este caracterizată de spații libere între filamentele sau formarea limitată a produselor de hidratare în unele zone dintre acestea. Ca urmare, fascicolul de armare rămâne ca o unitate flexibilă chiar după 28 de zile de întărire, fiecare filament având o libertate considerabilă de mișcare unu față de celălalt. Spațiile dintre filamente pot fi umplute treptat cu produse de hidratare dacă compozitul este păstrat într-un mediu umed.

Morfologia și structura mortarelor armate cu fibre > Distribuția și orientarea fibrelor. Conform [64], acesta este egal cu 1 în cazul în care fibra este utilizată rațional – optim (orientare după direcția solicitării) și scade la 0.375 ($3/8$) în cazul orientării haotice 2D, respectiv la 0.20 ($1/5$) în cazul orientării aleatorii 3D.




5.4 Aplicare MEF și modelarea numerică a materialelor studiate







5.4.1 Definirea și construirea modelului de material

RVE-urile realiste 3D au fost construite pe baza caracteristicilor și proprietăților materialelor constitutive, conform celor descrise anterior. Programul utilizat în acest sens a fost Digimat, modulul Digimat-FE. Digimat-FE este modulul creat pentru omogenizarea proprietăților materialelor eterogene (multi-fazic), bazat pe metoda elementului finit.


Rezolvarea și analiza modelului construit în Digimat-FE se poate realiza în mai multe moduri. Programul permite o libertate mare în acest sens:


- ☐ rezolvare prin MEF utilizând propriul său sistem: de discretizare (mesher), de rezolvare a ecuațiilor rezultate (solver) și un sistem post-procesare, având astfel capacitatea să ruleze analiza creată cu elemente finite până la capăt.
- ☐ rezolvare prin MEF utilizând platforma programului Digimat (modul Digimat-FE), combinat cu alt solver: permite utilizarea codului programelor MEF deja instalate pe calculator (Abaqus, Nastran, Ansys etc.), prin specificarea și selectarea prealabilă a acestora.
- ☐ rezolvarea prin MEF într-un alt program/cod FEA (Finite Element Analysis/Analiza cu Elemente Finite), precum Abaqus, Ansys etc.: Digimat-FE este utilizat în acest caz doar pentru generarea RVE realistice (o varietate mare de microstructuri, morfologii de materiale pot fi create), iar importarea modelului rezultat în programul dorit se poate face în două moduri: după exportarea într-un format CAD 3D (*.iges, *.xmt_text, *.stp) compatibil cu programul FEA sau prin modulul de extensie (plug-in) – importarea directă a datelor Digimat, nemai fiind necesară crearea fișierelor CAD 3D.

Procesul de generare al RVE-urilor realiste se rezumă și a urmat succesiunea pașilor descriși la 5.3 Aplicarea metodelor semi-analitic  Calcularea cantității,  Definirea materialelor,  Definirea structurii compozitului, dar presupune parcurgerea pașilor suplimentari de:

-  **Alegerea unui solver FE:** selectarea sistemului de rezolvare (solver) care urmează să fie utilizat – trebuie să fie selectat la începutul definirii analizei (Digimat, Abaqus etc.). Această alegere va afecta modelele de materiale și opțiunile de modelare și de discretizare disponibile. În lucrarea de față, solver-ul propriu al programului Digimat a fost ales.
-  **Generarea RVE-ului 3D realistic:** generarea orientării aleatorii prin setarea corespunzătoare (mărime RVE, orientare „Random 3D”, vizualizare etc.) și rularea efectivă a generării pentru vizualizarea RVE-ului definit.
-  **Verificarea compozitului generat:** generarea compozitului a fost reluată în cazul în care aceasta a fost una neadecvată (tăierea fibrelor la limita RVE-ului – formă nesatisfăcătoare care conduce adesea la probleme de convergență sau cantitatea efectivă (volumul de fibre) a fost mult inferior valorii stabilite). Reluarea presupune doar parcurgerea pașilor de la .
-  **Discretizarea modelului (RVE 3D):** Un alt parametru foarte important în cazul analizelor numerice MEF este procedura de discretizare și setările adecvate privind aceasta. Discretizarea elementelor RVE au fost realizate folosind elemente discrete tip „voxel” (elemente tri-dimensionale numite și tip „cărămidă”), generate prin setarea următorilor parametri (influențează calitatea discretizării): mărimea elementului, factorul de deviație, factor de dimensiune minimă, numărul pașilor (serie) de îmbunătățire. În ceea ce privește tipul discretizării (Mesh type), celălalt tip implementat numit „tetra” (elemente tetraedrice) sunt mai puțin eficiente în comparație cu „voxel”, însă pentru a obține un compromis între calitatea și timpul computațional, în anumite situații adoptarea elementele „tetra” poate să fie o soluție. Aceste elemente descriu mai precis forma fibrelor scurte și, de obicei, necesită un număr mai redus de elemente finite în comparație cu cel de tip „cărămidă”, însă utilizarea acestora în cazul fibrelor lungi sau forme ascuțite conduce la rezultate nesatisfăcătoare. În cadrul § 5.4.2 - Figura 5.15 prezintă cele două tipuri de discretizări în cazul compozitelor studiate.
-  **Selectarea tipului condiției limită:** (BC) este, de asemenea, un factor important care afectează rezultatele, influențat și de dimensiunea RVE-ului (dimensiunea minimă - oferă o aproximație satisfăcătoare sau nu, în funcție de

condițiile limită). În vederea efectuării tuturor testelor virtuale, BC periodică (Periodic Boundary Condition Type) a fost utilizat în acest studiu, ținând cont de recomandările [146] și considerentele literaturii de specialitate în acest sens.

 **Definirea solicitării și rularea analizei:** presupune timp de calcul semnificativ mărit în comparație cu metoda semi-analitică aplicată prin intermediul Digimat-MF. În acest caz calculul numeric nu presupune și determinarea valorii proprietăților elastice (valoarea constantelor ingineresti, ca de exemplu, modulul de elasticitate sau coeficientul lui Poisson). Vizualizarea curbelor caracteristice presupune, de asemenea, pași suplimentari. După terminarea cu succes a analizei, care poate dura de la câteva ore până la câteva zile, în secțiunea Rezultate FE (FE Results) în cazul utilizării solver-ului implementat în Digimat-FE, se pot vizualiza eforturile și deformațiile în funcție de criteriul ales (de exemplu, criteriile implementate în program: tensiunile echivalente von Mises, Minimum Principal Stress, Maximum Principal Stress, deformațiile și deplasările după direcția aleasă etc.), precum pot fi vizualizate și forțele de frecare care apar în compozit.

 **Post-procesare FE:** diagramele pot fi vizualizate doar folosind modulul de post-procesare de către utilizator, generate în funcție de setările prealabile (direcție, element sau compozit etc.), iar modul de afișare al acestora poate fi modificat ulterior în secțiunea grafică (după afișare).

5.4.2 Determinarea modulelor de elasticitate folosind MEF

5.4.3 Testarea virtuală la întindere directă a compozitelor folosind MEF

6 CAPITOL 6

INTERPRETAREA REZULTATELOR

6.1 Evaluarea încercărilor experimentale și interpretarea rezultatelor obținute privind testele de laborator

Performanța materialelor de construcții cimentoase se exprimă, în primul rând, în funcție de rezistența acestora la **compresiune**. Pe baza rezultatelor obținute în urma determinării pe resturile de prisme, rezistența la compresiune cea mai mare a fost obținută în cazul R3-C2. Aceasta a înregistrat o creștere de 16.6% față de matricea RS-2 în care au fost înglobate fibrele de carbon, respectiv o creștere de 11-12% față de celelalte două tipuri de mortare armate cu fibre (R1-O2, R2-P2) și testate în etapa a doua. Cu toate acestea, rezultatele obținute pe cilindri nu au mai confirmat această performanță mai crescută al R3-C2, față de celelalte mortare. Ținând cont de rezultatele obținute la celelalte rețete și de considerentele literaturii de specialitate privind influența formei epruvetelor (prezentată în secțiunea aferentă § 4 Programul experimental), această diferență obținută se poate explica mai degrabă, prin amestecarea, sensibilitatea fibrelor de carbon și a gradului diferit de omogenizare sau formarea „locală” a ghemelor. Totodată, această creștere nu a fost confirmată nici de testele virtuale realizate.

Ținând cont doar de valoarea rezistențelor la compresiune, mortarele studiate pot fi utilizate fie ca mortare de zidărie, fie ca mortare de tencuială: ca mortare de zidărie, toate rețetele se încadrează în marca **M10**, mai puțin rețeta R3-C2, care este **M25**, având rezistența minimă la compresiune 25 N/mm² la vârsta de 28 de zile. Ca mortare de tencuială, toate rețetele, inclusiv și cele tradiționale se încadrează în clasa **CSIV** având rezistența la compresiune ≥ 6 N/mm² la vârsta de 28 de zile.

Deși rolul fibrelor de armare nu constă în mărirea capacității portante la solicitări de compresiune, putem considera că un procent optim, cu amestecare și omogenizare adecvată, poate determina o influență pozitivă și asupra acestei caracteristici, având în vedere că în toate cazurile, mai puțin R2-P1, a fost constatată creșterea rezistenței la compresiune față de matricea cimentoasă (RS-1, RS-2). Întrucât în cazul fibrelor de

polipropilenă (R2-P2) în etapa a doua valoarea medie a rezistenței a fost mai mare în comparație cu mortarului tradițional (RS-2), scăderea constatată la R2-P1 nu se poate explica prin modulul de elasticitate mult mai mic al polipropilenei în comparație cu cel al mortarului, așa cum se face în general. Deși literatura de specialitate specifică și confirmă efectul negativ posibil al acestora asupra rezistenței la compresiune, însă acest lucru se întâmplă mai degrabă în cazul procentelor mai mari de armare, datorită dificultăților de amestecare și compactare pe lângă E_{pp} mic.

Figura 6.1 – Imagine close-up: gol în structura matricei cimentoase în vecinătatea fibrei de oțel – R1-O1.

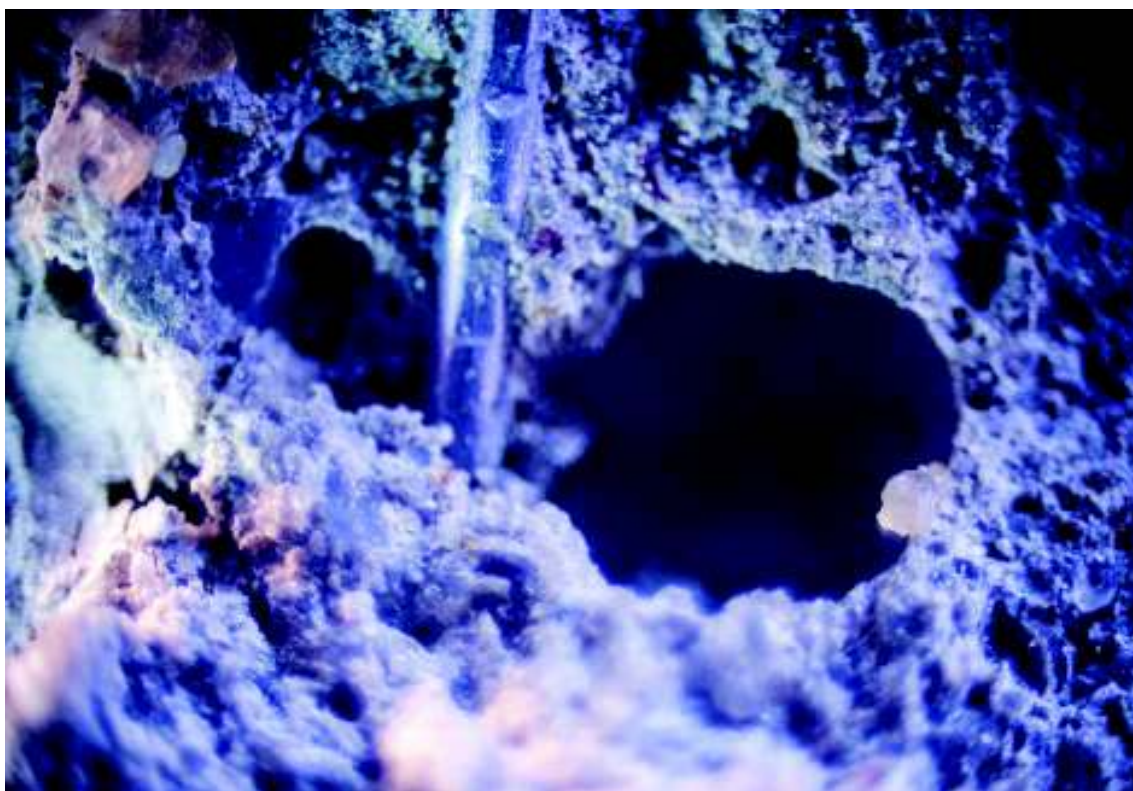
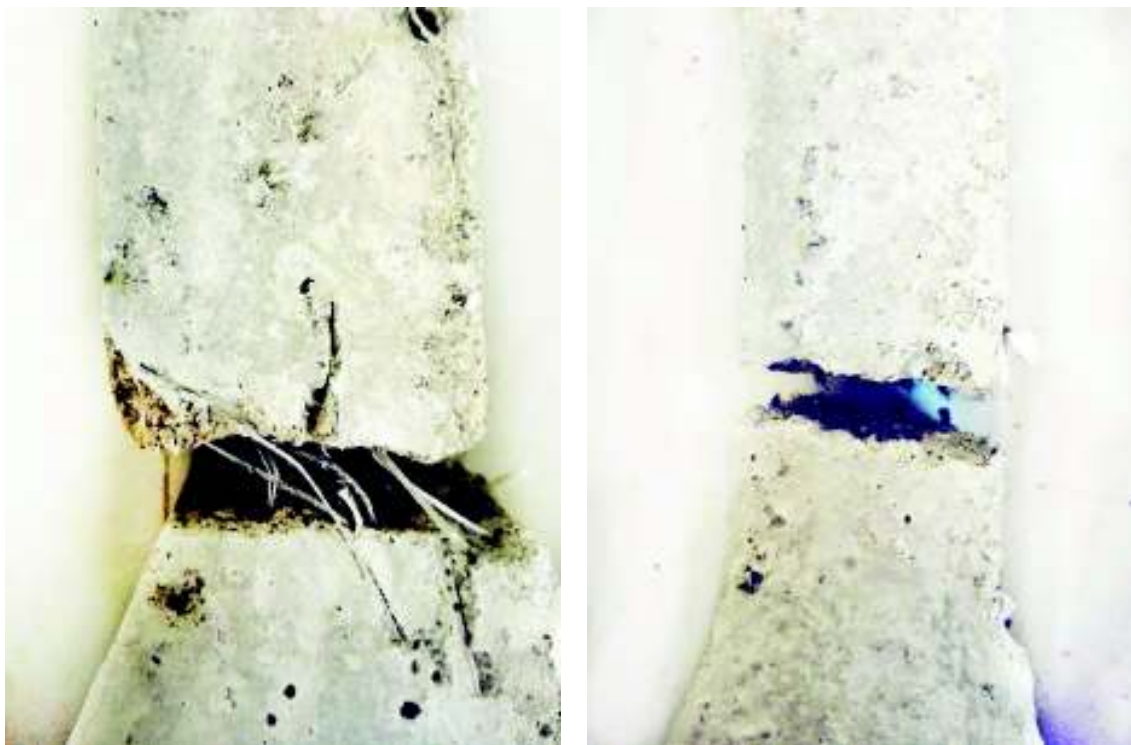


Figura 6.2 – (a) Fibre de polipropilenă: fibrele lungi leagă părțile separate și după cedare; (b) Fibre de carbon: cedarea matricei este urmată de separarea părților și ruperea bruscă.

(a)

(b)



În ceea ce privește rezistența la **încovoiere** a compozitelor studiate, în toate cazurile s-a constatat o creștere mai mult sau mai puțin semnificativă prin adăugarea fibrelor discontinue (luând în considerare valorile medii ale rezistențelor obținute). Această creștere variază de la 5% până la 16.6%. Cea mai mare creștere a fost și în acest caz la rețeta R3-C2 (16.6%) în etapa a doua, urmată de rețeta R1-O1 cu 11.3% (prima etapă). Fibrele de oțel în etapa a doua (procent dublu de armare față de R1-O1), au produs doar o creștere de 5% față de mortarul de referință. În ceea ce privește performanța la încovoiere a mortarelor armate cu fibre, în acest studiu, rețetele cu fibre de polipropilenă au fost inferioare celor de oțel și de carbon.

Evaluarea și comparația performanței mecanice a rețetelor, ținând cont și de aderența la stratul suport, este ilustrată în Figura 6.3.

În cazul determinării **aderenței la stratul suport**, în toate cazurile, cedarea s-a produs prin aderență, și nu prin rupere de coeziune în mortar sau substrat (cărămidă). Astfel, rezultatele reflectă adeziunea reală a mortarelor la stratul suport. Deși valorile obținute sunt relativ mici (valoarea minimă admisă pentru un mortar de marca M25 pe cărămidă este 0.3 N/mm^2 și 0.2 N/mm^2 pentru M10, conform [92]), o creștere a aderenței față de mortarul standard RS-2 (0.01 N/mm^2) s-a obținut în toate

cazurile (R1-O2, R2-P2 și R3-C2). Aderența cea mai mare a fost înregistrată în cazul folosirii fibrelor de polipropilenă și cele de carbon, având aceeași valoare egală cu 0.06 N/mm^2 (valoare medie). Deși s-a ținut cont de toate prevederile normative în vigoare [173] privind efectuarea determinării, rezistența nesatisfăcătoare se poate datora cărămizilor utilizate în acest sens.

Pe baza comparației prezentată în figura de mai sus, care ține cont de proprietățile fizico-mecanice ale compozitelor studiate, se poate considera că **rețeta optimă este R3-C2**. Deși o scădere semnificativă a densității aparente nu s-a obținut nici în cazul R3-C2, toate materialele încadrându-se în categoria mortarelor grele depășind valoarea de 1800 kg/m^3 , acest tip de fibră se poate utiliza pentru obținerea unui mortar ușor pentru tencuială într-o matrice cu greutate specifică mai redusă, la fel ca și firele de polipropilenă.

Totodată, nici fibrele de oțel nu au determinat o creștere majoră în ceea ce privește greutatea, respectiv densitatea aparentă, nici în cazul cantității minime de armare (R1-O1), și nici în cazul cantității duble față de aceasta (R1-O2). Exprimat în procente, aceasta înseamnă o creștere de 0.4%, respectiv 2.9% față de matricea de mortar standard. Inclusiv diferența între densitatea aparentă a mortarului R3-C2 și cel R1-O2 este doar 3.5%.

Independent de tipul solicitării, în cazul mortarelor armate dispers, este acceptat faptul că după fisurare (domeniul post-elastic), tensiunea scade, dar materialul încă are rezerve serioase și este capabil în continuare să suporte eforturi suplimentare (eforturi mai mici decât cel rezultat din forța de rupere) datorită prezenței fibrelor. În acest studiu, comportamentul post-fisurare și avantajul principal al utilizării fibrelor, adică creșterea ductilității sau a capacității de disipare a energiei, nu se poate deduce în mod clar din diagramele înregistrate, datorită mașinii de testare sau a modului de determinare conform standardelor în vigoare (încovoiere). Se poate afirma însă că epruvetele realizate din mortare armate cu fibre nu s-au strivit după încercare, mai mult de atât, ruperea părților separate după oprirea mașinii de testare, în vederea analizei suprafețelor de rupere, nu s-a putut efectua de mână (în special în etapa a doua).

În afară de densitatea aparentă, proprietăți fizice, precum, consistența sau aderența la stratul suport au fost determinate. **Consistența** a fost stabilită prin pătrunderea conului etalon, iar conform valorilor obținute (8-9 cm), mortarele pot fi folosite atât pentru lucrări de zidărie (cărămizi pline, blocuri de beton ușor, cărămizi cu goluri, blocuri ceramice cu goluri), cât și pentru tencuieli executate manual, în principiu pentru grund, conform [148]. Consistența mortarelor în acest studiu nu a fost influențată în mod semnificativ de prezența fibrelor. Totodată, acest aspect are o deosebită importanță, în special în cazul fibrelor sintetice; dacă luăm în considerare faptul că la o cantitate de 30 kg/m^3 de fibre de oțel rezultă un procent volumic de $\sim 0.38 \text{ v\%}$, iar echivalentul în cazul fibrelor sintetice este 4 kg/m^3 , care reprezintă un procent volumic mai mare, trebuie ținut cont de faptul că de două ori mai multă suprafață trebuie „învelită” de pasta de ciment (liant). Astfel, dacă cantitatea de liant și apă nu este suficientă, respectiv pasta de ciment nu acoperă fibrele sau particulele de nisip, consistența și rezistența vor fi afectate, iar legătura fibre-matrice va fi, de asemenea, mai slabă. Acest lucru trebuie luat în considerare în faza de proiectare (stabilirea rețetelor). Deși nu au fost constatate problemele menționate în cazul fibrelor de polipropilenă, este demonstrat și acceptat faptul că raportul ciment/nisip mai crescut determină creșterea performanței fibrelor (**notă**: cantitatea de nisip corespunzătoare volumului de fibre adăugate în cazul rețetelor R1, R2 și R3 nu a fost scăzută din rețeta standard în această lucrare, deși acest lucru se practică pentru asigurarea ca fibrele adăugate să nu conducă la scăderea lucrabilității/consistenței).

La determinarea consistenței mortarelor armate dispers trebuie ținut cont și de faptul că fibrele amestecate în matricea cimentoasă provoacă fenomenul asemănător tixotropiei: lucrabilitatea materialului se îmbunătățește foarte mult în urma unor agitații mecanice; astfel, valoarea consistenței mortarului poate fi diferită în funcție de metoda de determinare aleasă: în cazul determinării cu masa de împrăștiere datorită vibrațiilor induse de masă (efect dinamic) lucrabilitatea crește, ceea ce în cazul determinării cu conul etalon nu există – vibrarea reprezintă, deci, un aspect important nu doar în cazul compactării sau îmbunătățirii aderenței, ci și a legăturii dintre fibră-matrice.

6.2 Evaluarea eficienței testelor virtuale și comparația metodelor semi-analitice și numerice

Simularea fenomenelor „reale” care au loc la mezo-scară compozitului au fost realizate în programul Digimat, iar modelele construite au fost analizate prin metode semi-analitice (tehnica Mean-Field Homogenization) și numerice, prin metoda elementului finit, în vederea investigării efectului prezenței și distribuției aliațoare ale fibrelor scurte asupra proprietăților matricei cimentoase (mortar standard). Analiza multi-scalară adoptată permite aproximarea și evaluarea comportamentului (efort-deformație) și determinarea altor proprietăți, precum proprietățile elastice (modul de elasticitate longitudinal-, transversal, coeficientul lui Poisson etc.).

Principala caracteristică determinată prin aplicarea metodelor menționate (prezentat în §5 - Analiza virtuală ale compozitelor studiate) a fost modulul de elasticitate longitudinal, pe baza valorilor determinate în mod experimental (E_{RS}). În practica de proiectare se admite că valoarea modulului de elasticitate la întindere este egală cu cel la compresiune, însă pe baza diagramelor obținute în prima etapă se poate constata, că există o diferență între aceste valori, de care s-a ținut cont în efectuarea testelor virtuale. Deși, datorită structurii neomogene a materialelor studiate nu poate fi definit un modul de elasticitate longitudinal în accepțiunea obișnuită a termenului, și interpretarea geometrică, adică valoarea determinată pe baza diagramelor specifice nu este exactă, rezultatele sunt confirmate și de alte cercetări.

Astfel, diferite teste virtuale au fost efectuate folosind rezultatele obținute la compresiune și întindere (matricea de mortar tradițional), pentru determinarea modulelor de elasticitate ale compozitelor armate cu fibre. Comparația valorilor obținute în funcție de tipul solicitării și în funcție de metoda aplicată în vederea determinării sunt prezentate și ilustrate în cele ce urmează (Figura 6.4, Figura 6.5, Figura 6.6).

Pe baza diagramei de mai sus se poate constata și mai evident o discrepanță privind rezultatele FE: considerarea zonei de tranziție caracterizat de E_{ITZ} mai scăzut (***) decât cel al matricei, a determinat un E mai mare în comparație cu același model FE, dar fără ITZ. Această discrepanță în mod logic și cert nu se poate explica, ținând cont de multitudinea setărilor și considerentelor pe care le implică această metodă

(mărimea și tipul elementului discret, mărimea RVE etc.). Bineînțeles, sursa de eroare poate reprezenta și software-ul utilizat pentru determinare. O verificare a eficienței acestui modul ar fi utilizarea unui alt program de calcul MEF și reluarea analizelor în acest sens. Trebuie menționat însă, că programele MEF generale, precum Abaqus, nu au însă modul pentru determinarea directă a proprietăților elastice și al constantelor ingineresti așa cum se poate proceda în cazul Digimat (valorile E pot fi determinate pe baza diagramelor specifice efort-deformație).

Se poate observa, de asemenea, că valorilor determinate pe baza curbelor caracteristice la întindere în cazul R1-O1 și R2-P1 (notate cu --■-- pe figură, prima etapă), indică deviații mai mari față de RS-1 în comparație cu rezultatele testelor virtuale. Altfel spus, determinările experimentale arată că prezența fibrelor are o influență mai semnificativă asupra modificării modului de elasticitate al matricei, în timp ce testările virtuale conduc la diferențe mici. Ținând cont de cantitățile mici în care fibrele sunt prezente în compozitele studiate în prima etapă (procent minim de armare), diferențele mai mari obținute pe cale experimentală se pot datora și impreciziei metodei de determinare, deși s-a ținut cont de recomandarea literaturii de specialitate în ceea ce privește intervalul de valori și zona specifică a diagramei pentru determinarea E . Bineînțeles, aceasta se poate datora nu numai metodei de determinare, dar și mașinii și sistemului de încercare utilizate pentru testare. Înregistrarea precisă a aspectelor legate de comportarea materialelor de construcții fragile, în special la întindere, este greu de obținut, în primul rând, datorită sensibilității materialului și a energiei potențiale acumulate în sistemele de acționare care se degajă prea brusc când apar primele pierderi de capacitate portantă. Valorile E calculate la întindere pentru compozitele studiate în etapa a doua nu pot fi verificate sau comparate cu date experimentale, deoarece nu a mai fost posibilă înregistrarea curbelor caracteristice cu mașina de testare și sistemul utilizat în prima etapă.

Valorile obținute în cadrul § 4.4.8 Determinarea modului de elasticitate la compresiune, și cele determinate pe baza diagramelor specifice la compresiune sunt, de asemenea, comparate cu modulele de elasticitate calculate, folosind programul Digimat. Valorile sunt prezentate în Figura 6.5.

În cazul fibrelor de carbon, diferențele dintre rezultatele obținute pe cale experimentală și cele virtuale, pot fi explicate prin geometria fibrelor și formarea

ghemelor „locale” (unitate alcătuită din mulțime de fire mici, gheme locale). A fost demonstrat prin teste virtuale în cadrul tezei (confirmat și de literatura de specialitate), că incluziunile cu forme având raport geometric crescut determină creșterea capacității portante a matricei într-o măsură mult mai mare decât cele cu RG mic. Pe baza imaginilor close-up, fibrele de carbon au fost modelate folosind forme elipsoidale cu RG relativ mic, deși o dispersie bună ar fi putut avea loc în anumite zone (RG mare). Pentru identificarea precisă a distribuției fibrelor în matrice o analiză, folosind microscopia electronică, ar fi fost necesară. Astfel, gradul de dispersie și formarea ghemelor poate reprezenta o sursă de eroare.

Un alt aspect care poate conduce la diferențe privind testările propriu-zise și cele virtuale, sau chiar așteptările privind creșterea performanței materialelor cimentose, sunt proprietățile reale sau efective ale fibrelor. Deși determinarea rezistenței sau a modulului de elasticitate ale fibrelor scurte este foarte greu de realizat datorită dificultății de prindere, și presupune echipamente și mașini speciale, o analiză complexă necesită efectuarea acestuia. În caz contrar, diferențele dintre caracteristicile efective și cele declarate de producător, pot conduce la evaluarea incorectă a eficienței testelor virtuale.

În concluzie, diferențele constatate între rezultatele experimentale și cele virtuale pot fi determinate de proprietățile reale ale fibrelor, care nu au fost testate și verificate, dar mai mult se poate datora structurii neomogene a matricei compozitelor, adică a comportamentului micro-mecanic și a fenomenelor complexe care au loc la nivelul mortarului cimentos. Nu în ultimul rând, eficiența testelor virtuale și cheia succesului constă în alegerea adecvată a modelelor materiale, a condițiilor la limită și a construirii întregului model de către utilizator.

6.3 Evaluarea eficienței fibrelor studiate și comparația acestora

Comparația și evaluarea eficienței celor trei tipuri de fibre utilizate în acest studiu nu este ușor de realizat, ținând cont de natura diferită a acestora, și de faptul că rolul fibrelor nu se rezumă doar la obținerea creșterii performanței mecanice a compozitului conceput. În practică, oricare poate prezenta avantaje față de celălalt, în funcție de aplicație sau domeniul de utilizare și depinde de caracteristica materialului cimentos care necesită îmbunătățire.

În lucrarea de față au fost investigate performanțele mecanice și modificarea rezistențelor produse de prezența fibrelor în matricea de mortar, precum și câteva proprietăți fizice (densitate aparentă, aderența la stratul suport, consistența), dar sunt și alte aspecte generale sau caracteristici importante, bazate pe cercetări și investigații de alt tip, care trebuie menționate când se propune analiza eficienței fibrelor.

Cel mai frecvent utilizat tip de fibră în cazul compozitelor cimentoase este cel de oțel, al cărui comportament și impact asupra matricei cimentoase este cel mai bine cunoscut. Rolul principal al utilizării fibrelor de oțel este creșterea rezistențelor mecanice, folosite în special în pardoseli industriale, construcții de tuneluri, panouri etc., însă au dezavantajul că determină creșterea greutății proprii a compozitului rezultat și sunt sensibile la coroziune. Astfel, fibrele sintetice, precum cele de polipropilenă, sunt mai avantajoase când rezistența la coroziune sau densitatea aparentă mai scăzută este importantă. Chiar și deteriorarea sau fisurarea ușoară a suprafețelor realizate cu mortar sau beton armat cu fibre de oțel provoacă coroziunea fibrelor, care determină desprinderea și degradarea altor zone/suprafețe. Acoperirea și protejarea perfectă a fibrelor cu material cimentos nu poate fi asigurată, în cazul celei mai mici fisuri se poate produce degradarea datorită coroziunii. Problema este agravată și mai mult de procesul de carbonatare, adică coroziunea poate apărea fără prezența fisurilor în matricea sau suprafața compozitului.

Dezavantajele fibrelor de oțel au determinat ca macro-fibrele de polimer să fie tot mai frecvent utilizate, adesea pentru a înlocui fibrele de oțel sau pentru a reduce cantitatea de armare structurală necesară. Avantajul lor constă în faptul că greutatea specifică reprezintă aproximativ o zecime din greutatea oțelului, îmbunătățesc rezistența la foc și sunt avantajoase din punct de vedere economic, respectiv nu sunt sensibile la acțiunea apei sau la atac chimic. În ceea ce privește comparația fibrelor de oțel cu cele de polipropilenă, trebuie menționat și aspectul privind geometria fibrelor. Recomandările privind lungimea fibrelor în funcție de dimensiunea particulelor de agregat (în special în cazul betoanelor) rezultă din faptul că particulele de agregat trebuie să permită distribuția uniformă a fibrelor. Acest lucru este mai puțin important în cazul fibrelor flexibile, precum polipropilena, deoarece ele se pot îndoi în jurul particulelor în timpul amestecării, ajustând dimensiunea și umplând spațiul disponibil, adică spațiul gol. La betoane armate cu fibre de oțel se poate întâlni cu recomandarea ca lungimea fibrelor să fie chiar de 5 ori mai mare decât granulația, ceea ce ar însemna

120 mm lungime ($d_{\max} = 24$ mm). O astfel de lungime ar avea însă mai mult efecte negative asupra compozitului, așa cum a fost prezentat în § 2.4.2.

Astfel, fibrele de polipropilenă de cele mai multe ori constituie opțiunea cea mai bună, atunci când aplicația impune condiții specifice privind factorii agresivi de mediu sau vorbim de un mediu de exploatare cu temperatură ridicată, iar flexibilitatea reprezintă, de asemenea, un avantaj important. Construcțiile agricole pot fi exemple bune, unde avantajele armăturilor sintetice față de cele din oțel constituie rezistența lor la agenți chimici, iar fibrele nu pot provoca leziuni animalelor. Deși în cadrul lucrării rezistența la foc nu a fost testată, conform lucrării [115], un alt avantaj al utilizării macro-fibrelor polimerice în comparație cu fibrele de oțel, îl reprezintă comportarea materialului la temperaturi ridicate: cuprins între de 500-800 °C, datorită topirii și arderii fibrelor polimerice, nu s-a produs cedarea bruscă a compozitului cimentos, așa cum a fost constatat în cazul fibrelor de oțel. Astfel, a fost propusă utilizarea acestora în elemente prefabricate și elemente de protecție la foc, sau la elemente supuse la temperaturi ridicate.

Ținând cont de faptul că rezistența la compresiune este principala caracteristică când vine vorba de evaluarea performanței materialelor cementoase, fibrele de polipropilenă devin mai puțin eficiente în comparație cu cele de oțel. Mai mult de atât, în special în cazul betoanelor cu rezistențe la compresiune ridicate, a fost demonstrat faptul că utilizarea macro-fibrelor sintetice, datorită modulului de elasticitate mult mai scăzut decât cel al matricei și a dificultății de compactare, poate determina scăderea rezistenței la compresiune. În ciuda acestui fapt, lucrarea de față nu confirmă în totalitate cele menționate privind posibilul efect negativ al fibrelor de polipropilenă. Având în vedere proprietățile și avantajele utilizării fibrelor de polipropilenă, respectiv faptul că în cadrul lucrării doar la R2-P1 s-a constatat scăderea rezistenței la compresiune, putem confirma că utilizarea acestora în matricea de mortar în multe aplicații poate fi o alternativă mai bună și eficientă în comparație cu cele de oțel.

Cele două tipuri de fibre sau, în general, tipurile diferite de fibre îmbunătățesc deci proprietățile matricei de bază în grad și în mod diferit. Din acest motiv sunt exemple de lucrări, la care s-au utilizat deja fibrele de oțel și cele polimerice combinate, în vederea îmbunătățirii mai multor proprietăți concomitent. De exemplu, în cazul mortarului cu fibre de oțel în stare proaspătă a materialului nu apar încă îmbunătățiri

privind comportarea acestuia deoarece nu există aderență bună între faze care se datorează rigidității și naturii suprafeței fibrelor. În schimb, fibrele polimerice îmbunătățesc proprietățile mortarului deja în stare proaspătă, și așa cum a fost menționat, au avantaje în cazul temperaturilor mari. Utilizarea celor două tipuri de fibre împreună este deci una rațională. De asemenea, a fost demonstrat faptul că prezența unor micro-fibre polimerice, adăugate împreună cu macro-fibre polimerice au un efect pozitiv și măresc capacitatea fibrelor lungi la întindere, prin reducerea deformațiilor transversale. [115][138]

În cazul utilizării sistemului de fibre hibride, adică combinarea macro și micro fibrelor sau a două tipuri diferite de fibre, conceptul fundamental este că micro-fibrele sunt implicate în etapele de încărcare timpurie și cresc rezistența prin împiedicarea creșterii micro-fisurilor și transformarea acestora în macro-fisuri. Odată ce capacitatea portantă a micro-fibreii este depășită, macro-fibrele preiau o parte din încărcările transmise și măresc ductilitatea materialului compozit. Un avantaj suplimentar al sistemului hibrid este o scădere a permeabilității la apă datorită controlului crescut al fisurilor furnizat de fibrele de armare [36]. Este important de subliniat faptul că rol static au numai macro-fibrele sintetice (polipropilenă), rolul micro-fibrelor constă doar în prevenirea fisurilor foarte mici.

O altă caracteristică importantă și modificare în timp, privind comportarea acestor materiale, este îmbătrânirea materialelor de armare, care se manifestă prin reducerea capacității de disipare a energiei. Deși încercarea standard se efectuează la 28 de zile și în cazul materialelor compozite armate cu fibre, capacitatea de disipare a energiei variază în timp, și s-a constatat că poate fi redusă în cazul fibrelor de oțel și poate crește în cazul fibrelor sintetice. Acest lucru s-a constatat și în cazul testării unor panouri având matrice cimentoasă la diferite vârste și s-a observat că ductilitatea compozitului armat cu fibră de oțel scade, în timp ce în cazul fibrelor sintetice ductilitatea crește. În mod interesant, acest lucru a fost explicat prin rezistența la smulgere a fibrelor: în timp ce fibrele care se smulg absorb multă energie, fibrele cu legătură puternică nu se extrag, ci se rup, ceea ce reduce ductilitatea. Această caracteristică este atribuită legăturilor chimice care apar pe termen lung între fibrele de oțel și materialul cimentos.

Deși fibrele de carbon sunt considerate materiale performante pentru armarea tuturilor tipurilor de matrice, ținând cont de prețul mult mai ridicat în comparație cu fibrele de oțel sau polipropilenă, utilizarea acestora în cazul mortarelor nu tot timpul poate fi justificată. Astfel, în aplicații generale fibrele, precum cele de oțel sau polipropilenă, pot avea mai multe avantaje.

Totuși, gama largă de fibre de carbon (§ 2.3.2.1 Fibrele de carbon) în ceea ce privește performanțele mecanice, permite selectarea tipului optim pentru aplicația specifică. Nu numai proprietățile mecanice, ci și o serie de alte proprietăți pot fi semnificativ diferite, de exemplu, coeficientul de dilatare termică, conductivitatea termică sau electrică și anizotropia proprietăților. În cazul celorlalte fibre studiate, adică tipurile și gama de fibre de oțel, respectiv polipropilenă se disting în primul rând, prin forma și geometria lor, iar proprietățile materialelor prezintă un domeniu de variație mult mai mic.

În concluzie, proprietățile fizico-mecanice ale compozitelor indică că rețeta R3-C2 este cea optimă, adică fibrele de carbon au adus la cele mai bune îmbunătățiri în comparație cu fibrele de oțel și polipropilenă, datorită prețului ridicat a fibrelor și a faptului că avantajul armării dispersă nu se rezumă doar la caracteristicile investigate, putem afirma că fibrele de polipropilenă au un viitor promițător în domeniul materialelor de construcții. Acest lucru se datorează, în primul rând, proprietăților favorabile și rezistenței excelente la coroziune, acizi, alcalii, comportamentul la foc, greutate redusă etc. și a prețului mai avantajos în comparație cu celelalte două tipuri de fibre studiate. Folosirea acestora în matricea cimentoasă nu este o tendință nouă, însă se află și în prezent în faza de cercetare: evoluția tehnologiei a determinat îmbunătățirea proprietăților fibrelor de polipropilenă pe parcurs (modul de elasticitate, rezistența la întindere, legătura cu matricea cimentoasă), și astfel, în multe aplicații pot fi utilizate deja pentru înlocuirea fibrelor bine cunoscute de oțel.

7 CAPITOL 7

CONCLUZII, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

7.1 Concluzii

Lucrarea de față compară diferite tipuri de fibre discontinue, produse în România (oțel și polipropilenă) și străinătate (carbon), și prezintă prin intermediul încercărilor de laborator și al testelor virtuale influența acestora asupra matricei de mortar pe bază de ciment. Pe lângă rezultatele propriu-zise, conține observații și aspecte pe baza cercetării teoretice a autorului privind modificarea compoziției și optimizarea eficienței armării cu fibre și sunt date exemple pe plan național și internațional privind aplicabilitatea și avantajele mortarelor armate dispers.

Importanța compozitului ales, respectiv a cercetării, este confirmată, de asemenea, și de gama de produse prezente pe piață în momentul actual, adică a mortarelor îmbunătățite cu fibre și adaosuri de polimeri. Este important de remarcat că, deși piața materialelor de construcții oferă o gamă relativ largă de produși, datele sunt limitate, rețetele sunt confidențiale și în multe situații informațiile pot fi chiar insuficiente. De cele mai multe ori nici tipul sau natura fibrei utilizate în compoziție nu este declarată în fișa tehnică a produsului.

Mortarul armat cu fibre este o clasă de materiale compozite, în majoritatea cazurilor pe bază de ciment, proiectat să prezinte proprietăți superioare în comparație cu matricea de bază și durabilitate ridicată, inclusiv rezistențe mecanice sporite. Cercetările teoretice ale autorului pe această temă au indicat că materialele cimentoase armate cu fibre (inclusiv toate materialele de construcții pe bază de ciment) pot prezenta proprietăți mecanice la întindere mai mari decât cele așteptate de la matricea de bază convențională, respectiv că estimările empirice conduc la supraestimarea acestor valori. Deși rezistența la compresiune este o caracteristică importantă, utilizată în mod obișnuit ca mijloc de evaluare a performanței mortarelor, în cazul armării cu fibre, această proprietate nu mai este suficientă pentru determinarea performanței acestora. În acest sens, a fost realizată cu succes determinarea în mod experimental al rezistenței materialelor studiate la întindere directă.

Experimentele și testele de laborator au fost efectuate în două etape. În prima fază a fost studiat efectul procentului minim de armare, utilizând fibre de polipropilenă și oțel (R1-O1, R2-P1), iar în cea de-a doua etapă procentul de armare a fost crescut (R1-O2, R2-P2), respectiv a fost introdus al treilea tip de fibră, cel de carbon (R3-C2). În lipsa unor recomandări de către producător privind dozajul fibrelor de carbon, cantitatea de 3 kg/m^3 a fost considerată, la fel ca și în cazul polipropilenei în a doua etapă. Această cantitate exprimată în procent volumic a fost egală cu cea în cazul fibrelor de oțel din prima etapă (0.2 v%).

În cadrul încercărilor experimentale au fost examinate și rezistențele mecanice specifice în cazul materialelor cimentoase (cu sau fără fibre): rezistența la compresiune și rezistența la încovoiere. Caracteristica mai puțin obișnuită în cazul mortarelor, și anume rezistența la întindere directă, a fost pusă în evidență în lucrare și prin teste virtuale.

Rezultatele privind aceste cercetări sunt detaliate în capitolele anterioare. Pe baza acestora se pot concluziona următoarele aspecte privind comportarea sau eficiența mortarele cu fibre și aplicabilitatea testelor virtuale:

CONCLUZII GENERALE

- 💡 în ciuda faptului că mortarele sunt utilizate din cele mai vechi timpuri și cercetate de multe secole, cele armate cu fibre nu au găsit o adevărată recunoaștere și aplicare, datorită lipsei unor experimente sau date exacte;
- 💡 mortarele armate cu fibre, datorită micro-structurii și a numeroși factori care influențează caracteristicile și performanțele – atât în timpul preparării, cât și după – pot fi considerate materiale compozite complexe, al căror comportament nu este ușor de definit;
- 💡 adăugarea fibrelor discontinue în matricea cimentoasă este mai des întâlnită în cazul betoanelor, deși, dimensiunea crescută a particulelor de agregat are un efect negativ asupra eficienței fibrelor; astfel, cercetările și analizele arată că armarea dispersă este mai eficientă și indicată în cazul mortarelor;

- ✍ încercările experimentale efectuate indică că efectul fibrelor după fisurare (macro-fisuri), în majoritatea cazurilor, poate fi considerată neglijabilă: nu au fost obținute creșteri semnificative privind rezistențele mecanice – avantajul lor trebuie căutat în prevenirea formării micro-fisurilor, însă nu au fost efectuate studii în acest sens, dat fiind faptul că aceasta este dificil de cuantificat;
- ✍ cu presupunerea că toate macro-fisurile încep de la micro-fisuri, se poate considera totuși, că fibrele discontinue joacă un rol în îmbunătățirea rezistențelor mecanice, cu toate că această ipoteză teoretică nu tot timpul este susținută de rezultatele experimentale: în cadrul acestei lucrări, o scădere a rezistențelor mecanice au fost constatate doar la compresiune în cazul fibrelor de polipropilenă (R2-P1) față de materialul de referință (RS-1), cu mențiunea că în etapa doua, R2-P2 s-a înregistrat o rezistență mai mare față de RS-2, dar și față de R1-O2;
- ✍ în timp ce la compresiune și încovoiere fibrele de carbon sau cele de oțel au prezentat un comportament mai bun, la întindere fibrele de PP (R2-P1) s-au demonstrat mai eficiente – cea mai mare creștere față de matricea compozitului a fost obținută prin utilizarea PP;
- ✍ creșterea cea mai considerabilă privind rezistențele mecanice față de materialul de referință a fost obținută la compresiune (20%) și la încovoiere (16.6%) în cazul R3-C2, respectiv în cazul R2-P1 (13%) la întindere; în ceea ce privește fibrele de oțel, creșterile maxime au fost: 11% la încovoiere în prima etapă și 10% la întindere (2.02 MPa - valoarea cea mai mare înregistrată) în etapa a doua;
- ✍ cantitatea de fibre în etapa a doua a fost considerabil mărită față de primele încercări (minim 50%), însă matricea compozitului constituia în continuare factorul cel mai important și cu ponderea cea mai mare în stabilirea performanței mortarelor armate dispers;
- ✍ determinarea rezistenței la întindere directă a materialelor de construcții cimentoase nu este standardizată, însă indicațiile și metoda descrisă în standardul internațional ASTM C1273 – 15: Standard Test Method for

Tensile Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Ambient Temperatures [46] care se adresează compozitelor avansate cu matrice ceramică, au fost un punct de plecare bun în vederea efectuării încercării de întindere; având în vedere că mortarul armat cu fibre prezintă un comportament macroscopic izotrop și omogen respectă cerința acestui standard;

- ✍ epruvetele tip „dog-bone” și sistemul utilizat în vederea testării s-a dovedit eficient din punct de vedere al execuției și al timpului de încercare; sistemul de prindere cu adeziv prezintă numeroase dezavantaje: adesea conduc la eșec prematur, iar realizarea și centrarea corectă a elementelor metalice pe capătul epruvetelor conduc la creșterea semnificativă a duratei testării și implică materiale costisitoare în cantități relativ mari; deficiența sistemului de prindere utilizat constituie că permite rotirea relativă a capetelor, dând astfel posibilitatea încovoierii inițiale, în timp ce determină un răspuns și rezistență invalidă;
- ✍ comportamentul la întindere directă a materialelor cimentoase nu a prezentat alterări majore, rămânând caracteristica principală a materialelor compozite performante;
- ✍ deși înregistrarea completă a diagramelor specifice, în vederea evaluării capacității de disipare a energiei, nu s-a putut realiza, în cazul încercării la compresiune, după atingerea efortului maxim, s-a putut urmări o astfel de tendință și valori de vârf „locale” (redistribuirea eforturilor);
- ✍ astfel de valori de vârf locale pot fi identificate și în zona elastică în toate cazurile, care poate fi explicată prin faptul că după cedarea legăturii slabe dintre fibre-matrice, trebuie să aibă loc o deformare a fibrelor pentru smulgere, care determină o creștere locală a capacității portante;
- ✍ posibilitatea de a modifica și controla modulul de elasticitate este importantă nu numai la betoane, dar și la mortare; modulul de elasticitate depinde de valoarea modulului fiecărui constituent și de fracția volumică a acestora și se admite, în general, că factorii, care determină modificarea rezistenței în mod automat, exercită influență și asupra valorii modulului de elasticitate;

- ✍ prezența fibrelor a determinat modificarea nesemnificativă a consistenței: era necesară mărirea ușoară a cantității de apă care poate fi chiar neglijată;
- ✍ surplusul de apă pentru asigurarea consistenței, care de regulă determină scăderea rezistențelor mecanice, în cadrul lucrării nu a avut efecte negative asupra rezistențelor mecanice; valori mai mari sau foarte apropiate au fost înregistrate;
- ✍ în ceea ce privește celelalte proprietăți fizice determinate în laborator (în afară de consistență), s-a constatat că fibrele de carbon au condus la: densitatea aparentă cea mai mică, respectiv aderența la stratul suport cea mai mare (R3 C2); totodată, valori identice sau foarte apropiate au fost obținute și în cazul folosirii fibrelor de polipropilenă, care, datorită prețului mult mai avantajos, poate fi o soluție mult mai viabilă;
- ✍ dezavantajul acestora reprezintă posibilitatea exercitării unei influențe negative asupra rezistenței la compresiune a materialului de bază, dar putem afirma că, în general, fibrele sintetice au un viitor promițător, în primul, rând datorită proprietăților favorabile privind rezistența excelentă la coroziune, acizi și alcalii combinat cu un preț scăzut; deși folosirea acestora în matricea cimentoasă nu este o tendință nouă, se află și în prezent în faza de cercetare;
- ✍ au fost arătate diferențele semnificative între gradul de deteriorare în cazul materialului nearmat și cel armat cu fibre după încercare: deteriorarea și macro-fisurile au fost dominante în cazul mortarului tradițional, în timp ce în cazul compozitelor armate cu fibre, mai multe micro-fisuri s-au concentrat/coalizat în macro-fisuri, dar fără cedarea părților laterale: fibrele funcționând ca legături, „bridge-effect”;
- ✍ conform proprietăților fizico-mecanice determinate, rețetele pot fi utilizate atât ca mortare de zidărie, cât și mortare de tencuială;
- ✍ rețetele R2, respectiv rețeta R3-C2, pot fi recomandate și pentru reabilitarea elementelor structurale sau protejarea acestora, în special în cazul celor expuse unor condiții de mediu speciale, datorită rezistențelor excelente ale

fibrelor la diverși factori chimici ținând cont și de greutate specifică mică a acestora;

✎ în general, astfel de compozite sunt utilizate, de asemenea, pentru înlocuirea sistemului tradițional de armare cu plasă din fibră de sticlă care presupune manoperă, preț și timp mai crescut; în cazul tunelurilor de exemplu, în vederea protejării structurii de rezistență, mortarul armat cu fibre poate fi utilizat chiar și prin torcretare. Conform *www.elastoplastic.com*, în Australia, la mine se utilizează 90% armarea dispersă cu fibre sintetice pentru înlocuirea sistemului cu plasă;

✎ mortarul cimentos armat cu fibre de polipropilenă sau carbon poate fi aplicat și ca material de protecție la poduri sau alte elemente care sunt expuse permanent de acțiunea apei sau a umidității, precum piscine, bazine, rezervoare sau diferite construcții agricole cu rezistență ridicată la agenți chimici






✎ mortarele armate dispers reprezintă prin urmare o alternativă viabilă și firească a sistemului tradițional cu plasă, găsindu-și aplicabilitatea într-o gamă extinsă de aplicații, dintre care le amintim: reparații locale ale structurilor degradate de beton sau zidărie de orice fel, inclusiv reabilitarea rosturilor acestora, lucrări de subturnare și consolidarea substraturilor, îmbunătățirea ductilității, tencuieli și lucrări de finisare la construcții noi și existente cu rezistență sporită la deformări și contracții, elemente prefabricate și lucrări de artă;

TESTE VIRTUALE

🖥️ conceperea și testarea materialelor cimentoase necesită experimente destul de costisitoare și presupune cantități mari de materii prime pentru dezvoltarea sau stabilirea dozajelor care vor asigura proprietățile dorite; în acest proces, utilizarea testelor virtuale poate completa încercările experimentale;




🖥️ software-ul Digimat - MSC Software, a fost folosit pentru construirea și rularea analizei modelele compozite create la mezo-scară; acest program reprezintă un instrument util în simplificarea și reducerea timpului necesar

pentru efectuarea analizelor virtuale – lineare și ne-lineare – ale materialelor compozite;




-  modelul elastic și elasto-plastic (cu și fără deteriorare), a fost adoptat pentru reprezentarea răspunsului materialelor constituente; principalele date de intrare includ proprietăți elastice, precum modulul lui Young și coeficientul lui Poisson, iar proprietățile plastice includ rezistențele caracteristice la solicitări de întindere și compresiune;
-  marele avantaj al metodelor numerice MEF față de MFH constă în posibilitatea de modelare și reprezentare a distribuției eforturilor între faze, adică a efectului distribuției și a orientării incluziunilor, precum și ceea ce aproximațiile analitice nu pot lua în considerare, și anume, forma și dimensiunea reală al fibrelor;
-  deși construirea modelului geometric se poate simplifica prin utilizarea unui software special, precum Digimat-FE, timpul de rulare și analiza propriuzisă rămâne în continuare considerabil crescut față de aproximațiile analitice – această sarcină dacă se rulează pe un computer personal durează aproximativ 30 de secunde la o analiză semi-analitică și aproximativ 6-24 ore la o analiză MEF (fără a lua în considerare construirea modelelor numerice);
-  în timp ce libertatea deplină oferită de MEF privind conceperea modelului și analiza acestuia constituie un avantaj, aceasta adesea conduce la erori mari sau probleme de convergență, și necesită cunoștințe depline privind metoda și comportarea fazelor constituente; complexitatea metodei și numărul factorilor care influențează eficacitatea acesteia, determină dificultatea identificării sursei problemei atunci când apar erori și rezultate incerte;
-  metodele semi-analitice sunt foarte rapide (nu este necesară construirea modelului geometric – RVE imaginar), sunt necesare puține date de intrare, și folosesc calcule simple pentru a determina valoarea parametrului dorit. Dezavantajul acestora este acela că folosesc multe ipoteze simplificatoare,

astfel, fiecare metodă analitică trebuie analizată și testată temeinic privind aplicabilitatea;

- 🖥️ în ciuda ineficienței constatate în cazul determinării valorii modulelor de elasticitate, se poate considera că programul de calcul utilizat (Digimat) este util și aplicabil în conceperea unor noi materiale sau în analiza și dezvoltarea materialelor existente, împreună cu testele și încercările tradiționale – reprezintă un punct de plecare sau o referință bună în vederea analizei factorilor care determină performanța materialelor compozite cimentoase;
- 🖥️ testarea virtuală la solicitări de compresiune în cazul compozitelor cimentoase nu este eficientă (confirmată și de alte cercetări și studii), dar rezultatele obținute la întindere directă pot fi considerate satisfăcătoare; modelul cu zona de tranziție neglijată conduce nu numai la reducerea semnificativă a timpului de calcul, dar și la un rezultat mai bun;
- 🖥️ prin intermediul metodei MFH a fost arătat faptul că forma alungită a fibrelor, adică un raport geometric mare, determină un comportament mai rigid la nivel de compozit și o creștere mai mare a rezistențelor mecanice; acest aspect și modelarea fibrelor de carbon (formarea ghemelor „locale”) explică creșterea mică obținută privind modulul de elasticitate longitudinal, în ciuda valorii mare al E_{carbon} ; rezultă importanța analizei morfologiei materialului, de exemplu folosind microscopia electronică;
- 🖥️ în urma analizei eficienței armării cu fibre discontinue în funcție de orientarea acestora față de direcția solicitării (întindere) s-a ajuns la concluzia că programul conduce la valori superioare, adică la un factor de eficiență mai mare în comparație cu cele cunoscute din literatura de specialitate în cazul orientării aleatorii 3D sau 2D;
- 🖥️ pe baza celor menționate se poate concluziona că MFH și Digimat-MF pot fi folosite ca instrumente de predicție pentru estimarea proprietăților mecanice ale compozitelor pe bază de ciment într-o manieră mai eficientă din punct de vedere computațional în comparație cu FE;

-  metoda semi-analitică aplicată s-a prezentat mai eficient nu numai din punct de vedere computațional, dar și în cazul modelării zonei de tranziție (ITZ) între matricea cimentoasă și fibre: MEF aplicat prin intermediul Digimat-FE a condus la rezultate invalide;
-  caracteristicile legăturii și a naturii interfeței fazelor constituente în compozitele studiate determină în mare măsură performanța acestora, însă modelarea acestuia necesită cunoștințe extinse; deși, considerarea unui model coeziv pentru descrierea și caracterizarea legăturii între matrice-fibră în mod normal ar conduce la timp de calcul semnificativ redus în cazul MEF și la estimări mai exacte, în lipsa datelor exacte, această abordare ar fi doar o speculație;
-  literatura de specialitate oferă modele teoretice și empirice pentru estimarea proprietăților mecanice ale materialelor compozite cimentoase; în cazul rezistenței la întindere, formulele se bazează pe rezistența la compresiune sau încovoiere, însă pe baza rezultatelor experimentale, se poate constata că acestea – în special rezistența la întindere și cea la compresiune – nu sunt în directă corelație, astfel metodele de aproximație semi-analitice sau numerice pot avea rezultate mai bune în comparație cu abordările empirice;

7.2 Contribuții personale

-  conceperea și realizarea unui studiu teoretic complex privind comportarea materialelor compozite la diferite nivele (analiză multi-scalară), în special cele pe bază de ciment, evidențiind factorii și măsura în care acestea determină comportamentul și răspunsul macroscopic al acestora; stabilirea observațiilor și aspectelor celor mai importante privind modificarea compoziției și optimizarea eficienței armării cu fibre discontinue;
-  conceperea programului experimental privind determinarea proprietăților fizico-mecanice a mortarelor armate cu trei tipuri diferite de fibre în vederea analizei performanței și a caracteristicilor tehnico-economice ale acestora;
-  stabilirea determinării în mod experimental al rezistenței materialelor cimentoase la întindere directă; studierea problemei și elaborarea metodei

de determinare în lipsa unui standard exact în cazul materialelor cimentoase; realizarea tiparelor și conceperea sistemului de prindere eficient din punct de vedere al execuției și al timpului de încercare, care în același timp satisface și cerințele tehnice;

- 💡 elaborarea modelului semi-analitic și numeric pentru estimarea performanțelor și caracteristicilor materialelor studiate; lucrarea evidențiază aceste metode prin prisma colectării factorilor de influență și astfel constituie un instrument în efortul de estimare a proprietăților materialelor compozite față de solicitările exterioare; demonstrează că modele de aproximație și teste virtuale bazate pe micro-mecanica materialelor poate completa încercările experimentale, reducând astfel efortul și materiile prime necesare în favoarea dezvoltării materialului;
- 💡 efectuarea comparației rezultatelor experimentale cu cele obținute prin teste virtuale; analiza eficienței metodelor empirice, aplicate în mod general în cazul materialelor compozite și cele cimentoase, în comparație cu celelalte metode de aproximație (metode semi-analitice și numerice);
- 💡 testarea unui program special (Digimat) pentru analiza materialelor multi-fazice și evidențierea avantajelor și dezavantajelor acestuia în cazul materialelor compozite cu matricea cimentoasă;
- 💡 astfel, prin studiile teoretice, încercările experimentale și testele virtuale realizate constituie o încercare în ceea ce privește cuantificarea comportamentului și a reacției materialelor cimentoase armate cu fibre față de solicitările exterioare (statice);

7.3 Direcții viitoare de cercetare

- 🌐 în vederea îmbunătății eficienței testării virtuale și obținerea unor estimări viabile, o cercetare privind investigarea legăturii dintre matricea cimentoasă și fibre, precum și fenomenele de desprindere și inițiere a fisurilor este recomandată;

- ④ se recomandă analiza morfologiei compozitelor și identificarea distribuției fibrelor în matrice folosind microscopia electronică;
- ④ întrucât avantajul armării dispersă se manifestă și în domeniul post-elastic, înregistrarea curbelor caracteristice complete și determinarea capacității de disipare a energiei este un aspect important; deși, datorită fenomenelor de instabilitate ce apar după pierderea elasticității și datorită capacității sistemelor de testare tradiționale acest lucru este greu de realizat cu certitudine, efectuarea unor studii în acest sens este importantă;
- ④ proprietățile, precum rezistența la foc sau impermeabilitatea, sunt indispensabile în cazul analizei riguroase a performanței mortarelor pentru stabilirea domeniului de aplicare; aceste aspecte în teza de doctorat au fost analizate doar pe baza unor studii din literatura de specialitate, și nu sunt cunoscute date exacte privind cele trei tipuri de fibrele utilizate;
- ④ o altă direcție de cercetare reprezintă investigarea eficienței fibrelor naturale; neglijând sensibilitatea lor față de acțiunea apei și deteriorarea în timp, putem spune că există o gamă destul de largă de fibre naturale care au potențial ridicat în vederea utilizării ca armătură în diferite compoziții, însă, sunt cunoscute puține date privind comportarea acestora în matricea cimentoasă;
- ④ în comparație cu fibrele naturale, cele sintetice, respectiv sistemele de armare hibride, au fost analizate de mulți autori, dar cunoștințele nu sunt încă depline și reprezintă în continuare o direcție de cercetare importantă.

BIBLIOGRAFIE

- [1] C. Aciu, D. A. Varvara, D. L. Manea, Y. A. Orban, F. Babota – *Recycling of Plastic Waste Materials in the Composition of Ecological Mortars*, Procedia Manufacturing, Vol. 22: 274–279, 2018, ISSN 2351-9789.
- [2] A. T. Ahmed – *Microstructural Analysis for the Mechanical Behaviour of Granular Waste Materials*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2335: 113–120, 2013, ISSN 0361-1981.
- [3] L. Ana – *Beton armat cu fibră dispersă*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chişinău, 2014.
- [4] F. Ansari – *Stress-Strain Response of Microcracked Concrete in Direct Tension*, ACI Materials Journal, Vol. 84 (6): 481–490, 1987, ISSN 0889325X.
- [5] S. Arabab – *Research in Carbon-Carbon Composites*, Thesis, Southern Illinois University Carbondale.
- [6] E. J. Barbero – *Finite Element Analysis of Composite Materials*, CRC Press, 2011, ISBN 9781420054330.
- [7] S. H. Basha, H. B. Kaushik, M. Asce – *Evaluation of Nonlinear Material Properties of Fly Ash Brick Masonry under Compression and Shear*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 27 (8): 1–11, 2015, DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001188.
- [8] M. Basso, R. Vinciguerra – *Multi-Scale Method to Determine Cohesive Zone Model parameters of Metal/Composite Hybrid Joints for Automotive Applications*, Digimat Users' Meeting 2017 - The Material Modeling Conference.
- [9] A. Bentur, S. Mindness – *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Ed. II. CRC Press, 2007, ISBN 9780415250481.
- [10] Y. Benveniste, G. J. Dvorak, T. Chen – *On Diagonal and Elastic Symmetry of the Approximate Effective Stiffness Tensor of Heterogeneous Media*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 39: 927–946, 1991.

- [11] T. J. Bessell, S. M. Mutuli – *The Interfacial Bond Strength of Sisal-Cement Composites Using a Tensile Test*, Journal of Materials Science Letters, Vol. 1 (6): 244–246, 1982, DOI 10.1007/BF00727846.
- [12] E. M. Bezerra, A. P. Joaquim, H. S. Jr, S. Paulo – *Some Properties of Fiber-Cement Composites with Selected Fibers*, International Conference of NOCMAT - Brasil, 33–43, 2004.
- [13] D. Bistriian, Ștefan I. Maksay – *Introducere în Metoda Elementelor Finite*, Editura Tehnică, Științifică și Didactică Cermi, Iași, 2008, ISBN 9789736673245.
- [14] J. Biswajit, P. Asha – *Study on The Mechanical Properties and Microstructure of Chopped Carbon Fiber Reinforced Self Compacting Concrete*, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Vol. 7 (3): 223–232, 2016, ISSN 0976-6308.
- [15] I. Bojtár, E. Gábor – *Mechanical Modelling of the Mesostructure of Heterogeneous Materials*, Építés - Építészettudomány, Vol. 43 (3–4): 285–313, 2015, ISSN 0013-9661.
- [16] R. Borst, N. Bicanic, H. Mang, G. Meschke – *Computational Modelling of Concrete Structures*, Vol. 1, CRC Press, 2014, ISBN 9781138001459.
- [17] X. Bourrat, X. Bourrat, F. Langlais, G. Chollon, G. L. Vignoles – *Low Temperature Pyrocarbon: A Review*, Journal of the Brazilian Chemical Society, Vol. 17 (6): 1090–1095, 2006, DOI 10.1590/S0103-50532006000600005.
- [18] J. Brauer – *What Every Engineer Should Know About Finite Element Analysis*, CRC Press, 1993, ISBN 9780824789541.
- [19] J. Broda – *Application of Polypropylene Fibrillated Fibres for Reinforcement of Concrete and Cement Mortars*, in *High Performance Concrete Technology and Applications*, Intech, 190–204, 2016, ISBN 9789535126515.
- [20] I. Carcea – *Materiale compozite. Fenomene la interfață*, Editura Politehniun, Iași, 2008, ISBN 9789736212079.
- [21] R. Carla, S. Felipe, R. Nonato, B. Felipe – *Polymer Composites Reinforced with Hybrid Fiber Fabrics*, Materials Research, Vol. 20 (2): 555–567, 2017.

- [22] A. Céline, S. Fréour, F. Jacquemin, P. Casari – *The Hygroscopic Behavior of Plant Fibers: A Review*, *Frontiers in Chemistry*, Vol. 1: 1–12, 2014, ISSN 2296-2646.
- [23] K. K. Chawla – *Composite Materials: Science and Engineering*, Ed. III., Springer Science & Business Media, 2013, ISBN 9780387743653.
- [24] C. G. Chiorean, N. Chira – *Analiza neliniară a structurilor*, U.T. Press, Cluj-Napoca, 2014, ISBN 9789736629419.
- [25] A. Chira, A. Kumar, T. Vlach, L. Laiblova, P. Hajek – *Textile-Reinforced Concrete Facade Panels with Rigid Foam Core Prisms*, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 18 (2): 200–214, 2016, ISSN 1099-6362.
- [26] W. C. Choi, S. J. Jang, H. Do Yun – *Interface Bond Characterization Between Fiber and Cementitious Matrix*, *International Journal of Polymer Science*, 2015, ISSN 1687-9430.
- [27] A. Cioc, M. Badiu – *Cerințe din standardul european armonizat SR EN 14889-1 care trebuie îndeplinite de fibrele din oțel pentru armarea betonului*, *Revista Construcțiilor* (84): 34–35, București, 2012.
- [28] I. N. Constantinescu, Șt. Sorohan – *Practica modelării și analizei cu elemente finite*, Editura Politehnica Press, București, 2003.
- [29] D. J. Cook, R. P. Pama, H. L. S. D. Weerasinghe – *Coir Fibre Reinforced Cement as a Low Cost Roofing Material*, *Building and Environment*, Vol. 13 (3): 193–198, 1978, DOI 10.1016/0360-1323(78)90043-4, ISSN 0360-1323.
- [30] H. Coskun – *Construction of SIMCON Retrofitted Reinforced Concrete Columns*, Ph. D. Thesis, North Carolina State University, 2002.
- [31] D. Covatariu, I. Lungu, N. Țăranu, M. Budescu, I. O. Toma – *Influența reabilitării rosturilor asupra răspunsului structural al zidăriei cu mortare având rezistență mică*, *Romanian Journal of Materials*, Vol. 43 (3): 251–262, 2013, ISSN 1583-3186.
- [32] P. Darsana, R. Abraham, A. Joseph, A. Jasheela, P. R. Binuraj, J. Sarma – *Development of Coir-fibre Cement Composite Roofing Tiles*, *Procedia*

- Technology, Vol. 24: 169–178, 2016, DOI 10.1016/j.protcy.2016.05.024, ISSN 2212-0173.
- [33] T. Easley – *Characterization of Steel Fiber/Cementitious Matrix Interfaces Using a Combination of Fiber Pullout and Moire Interferometry Techniques*, Northwestern University, 2000.
- [34] J. Edgington – *Steel Fibre Reinforced Concrete*, Ph. D. Thesis, University of Surrey, 1973.
- [35] J. Edgington, D. J. Hannant, R. I. T. Williams – *Steel Fibre Reinforced Concrete*, Building Research Establishment, Vol. 69–74, 1974, ISSN 0305-1250.
- [36] E. Erdogmus – *Use of Fiber-Reinforced Cements in Masonry Construction and Structural Rehabilitation*, MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) - Fibers, Vol. 3 (1): 41–63, 2015, DOI 10.3390/fib3010041, ISSN 2079-6439.
- [37] E. Erdogmus, A. Catherine – *Feasibility of Fiber-Reinforced Mortar for the Reconstruction of an Ancient Roman Temple, HMC08 - Historical Mortars Conference*, 2008.
- [38] M. Ernestina, A. Fidelis, T. Vitorino, C. Pereira, R. Dias, T. Filho – *The Effect of Fiber Morphology on the Tensile Strength of Natural Fibers*, Journal of Material Research and Technology, Vol. 2 (2): 149–157, 2013, ISSN 2238-7854.
- [39] R. Esposito, M. Hendriks – *Modeling of Alkali-Silica Reaction in Concrete: A Multiscale Approach for Structural Analysis*, in *Computational Modelling of Concrete Structures - Proceedings of EURO-C 2014*, Vol. 1: 87–95, CRC Press, 2014, ISBN 9781138001459.
- [40] N. Faur – *Elemente finite: fundamente*, Politehnica, 2002, ISBN 97897382-47987.
- [41] F. Florian – *Fibre metalice și fibre din polipropilenă pentru armarea betoanelor*, *Revista Construcțiilor* (108): 20–21, București, 2014.
- [42] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, C. Bradley – *A Combination of SEM and EDX Studies on a Clay-Based Natural Composite With Animal Fibre and its Mechanical Implications*, ECCM 2012 - Composites at Venice, Proceedings of

- the 15th European Conference on Composite Materials, 2012, ISBN 9788888785332.
- [43] E. Galenne, S. Michel-Ponnelle, J. Salin, G. Moreau, J. Sanahuja, C. Toulemonde – *The Aim of Computational Methods for Managing Concrete Structures in Nuclear Power Plants*, in *Computational Modelling of Concrete Structures - Proceedings of EURO-C 2014*, Vol. 1: 51–60, CRC Press, 2014, ISBN 9781138001459.
- [44] M. L. Gambhir – *Concrete technology: Theory and Practice*, V. Tata McGraw-Hill Education, 2013, ISBN 1259062554.
- [45] Y. X. Gan – *Effect of Interface Structure on Mechanical Properties of Advanced Composite Materials*, *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 10 (12): 5115–5134, 2009, DOI 10.3390/ijms10125115, ISSN 1422-0067.
- [46] T. T. Ghebrab, P. Soroushian – *Mechanical Properties of Cement Mortar: Development of Structure-Property Relationships*, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 5 (1): 3–10, 2011, DOI 10.4334/IJCSM.2011.5.1.003, ISSN 1976-0485.
- [47] V. Gheorghe – *Structuri cu rigiditate ridicată, din materiale compozite, utilizate în construcția de autovehicule*, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2013.
- [48] E. Ghiță, G. R. Gillich, I. Bordeasu, M. Vodă, C. Troi – *Aspecte ale comportării polimerilor la sollicitări de tracțiune*, *Materiale Plastice*, Vol. 44 (2): 158–162, 2007, ISSN 0025-5289.
- [49] H. Y. Ghorab, J. Ragai, A. Antar – *Surface and Bulk Properties of Ancient Egyptian Mortars. Part I: X-ray Diffraction Studies*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 16 (6), 1986, ISSN 0008-8846.
- [50] B. Graybeal – *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*, Federal Highway Administration, Office of Research, Development and Technology, 2006, ISSN 1084-0702.
- [51] B. Graybeal, F. Baby – *Development of Direct Tension Test Method for Ultra-*

- High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*, ACI Materials Journal, (110): 177–186, DOI 10.14359/51685532, ISSN 0889-325X.
- [52] V. A. Gurieva, T. C. Belova – *Structural Features of the Cement-Sand Mortar Reinforced with a Modified Basalt Microfiber*, Procedia Engineering, Vol. 150: 2163–2167, 2016, ISSN 1877-7058.
- [53] S. Gwon, M. Shin – *Direct-Tensile and Flexural Strength and Toughness of High-Strength Fiber-Reinforced Cement Composites with Different Steel Fibers*, Journal of Asian Concrete Federation, Vol. 2 (1): 67–80, 2016, ISSN 2465-7964.
- [54] H. GangaRao, T. Narendra, P. V. Vijay – *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*, CRC Press, New York, 2006, ISBN 9781420020199.
- [55] S. Harsh, Z. Shen, D. Darwin – *Strain-Rate Sensitive Behavior of Cement Paste and Mortar in Compression*, ACI Materials Journal, Vol. 87 (5): 508–516, 1990, DOI 10.14359/1931, ISSN 0889-325X.
- [56] D. A. Hernandez, C. A. Soufen, M. O. Orlandi – *Carbon Fiber Reinforced Polymer and Epoxy Adhesive Tensile Test Failure Analysis Using Scanning Electron Microscopy*, Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, Vol. 20 (4): 951–961, 2017, DOI 10.1590/1980-5373-MR-2017-0229, ISSN 1516-1439.
- [57] K. Holschemacher, T. Mueller, Y. Ribakov – *Effect of Steel Fibres on Mechanical Properties of High-Strength Concrete*, Materials & Design, Vol. 31 (5): 2604–2615, May 2010, DOI 10.1016/J.MATDES.2009.11.025, ISSN 0261-3069.
- [58] D. Hull, T. W. Clyne – *An Introduction to Composite Materials*, in *Cambridge Solid State Science*, Ed. II., Cambridge University Press, 1996, ISBN 9780521388559.
- [59] M. Ieremia – *Sisteme de consolidare a construcțiilor cu materiale compozite*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții București, 2014.
- [60] R. A. Iernutan, F. Babota – *Autoclaved Cellular Concrete (ACC) Masonry with Vertical Hollows Confined with Disperse Reinforced Concrete*, Procedia Engineering, Vol. 181: 300–307, 2017, DOI 10.1016/j.proeng.2017.02.393,

ISSN 1877-7058.

- [61] R. A. Ieranuțan, M. N. Roman Pintican – *Experimental Determination of Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete Masonry with Vertical Hollows Confined with Disperse Reinforced Concrete*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Vol. 60, 2014.
- [62] F. Iucolano, B. Liguori, C. Colella – *Fibre-Reinforced Lime-Based Mortars: A Possible Resource for Ancient Masonry Restoration*, Construction and Building Materials, Vol. 38: 785–789, 2013, ISSN 0950-0618.
- [63] P. Jagadeesan, T. Palanisamy – *Strengthening of Brick Masonry Using Basalt Fiber Reinforced Cement Mortar*, International Journal of ChemTech Research, Vol. 8 (10): 102–108, 2015, ISSN 0974-4290.
- [64] R. S. Jalali, E. Shadafza – *The Elastic Modulus of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) with Random Distribution of Aggregate and Fiber*, Civil Engineering Infrastructures Journal, Vol. 49: 21–32, 2016, ISSN 2322-2093.
- [65] R. B. Jewell, K. C. Mahboub, T. L. Robl, A. C. Bathke – *Interfacial Bond Between Reinforcing Fibers and Calcium Sulfoaluminate Cements: Fiber Pullout Characteristics*, ACI Materials Journal, Vol. 112 (1): 39–48, 2015, ISSN 0889-325X.
- [66] E. Jumate – *Cercetări privind optimizarea compoziției mortarelor pe bază de ciment și polimeri*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2015.
- [67] T. Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, D. Jeulin – *Determination of The Size of the Representative Volume Element for Random Composites: Statistical and Numerical Approach*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 40 (13): 3647–3679, 2003, ISSN 0020-7683.
- [68] B. Kantesh, V. Verma, A. Agarwal, R. Narayan – *Physical, Thermal, and Mechanical Properties of Polymers*, in *Biosurfaces: A Materials Science and Engineering Perspective*, John Wiley & Sons, 329–344, 2015, ISBN 9781118299975.

- [69] J. Katzer, J. Domski – *Quality and Mechanical Properties of Engineered Steel Fibres Used as Reinforcement for Concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 34: 243–248, Sep. 2012, ISSN 0950-0618.
- [70] O. Keleştemur, S. Yildiz, B. Gökçer, E. Arici – *Statistical Analysis for Freeze-Thaw Resistance of Cement Mortars Containing Marble Dust and Glass Fiber*, Materials and Design, Vol. 60: 548–555, 2014, ISSN 0261-3069.
- [71] J. J. Kim, M. R. Taha – *Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens*, Advances in Civil Engineering, 2014, DOI 10.1155/2014/156926.
- [72] N. Krstulovic, M. J. Al Shannag – *Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)-Based Shear Retrofit of Reinforced Concrete Members*, ACI Structural Journal, Vol. 96 (1): 105–114, 1999.
- [73] S. Kundalwal – *Review on Modeling of Mechanical and Thermal Properties of Nano- and Micro- Composites*, Cornell University Online Library, 2017.
- [74] K. Kusmono, Z. Arifin Mohd Ishak – *Effect of Clay Addition on Mechanical Properties of Unsaturated Polyester/Glass Fiber Composites*, International Journal of Polymer Science, 10–17, 2013, ISSN 1687-9422.
- [75] S. J. Lee, I. You, G. Zi, D. Y. Yoo – *Experimental Investigation of The Piezoresistive Property of Cement Composites with Hybrid Carbon Fibers and Nanotubes*, MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) - Sensors, Vol. 17 (11), 2017, ISSN 1424-8220.
- [76] R. V. Lesovik, S. V. Klyuyev – *Fiber Concrete Containing Composite Binders and Technogenic Sands of Kursk Magnetic Anomaly for Flexural Structures*, Magazine of Civil Engineering, Vol. 3 (9): 41–47, 2012, DOI 10.5862/MCE.29.5 Fiber.
- [77] S. Li, C. Wang, Y. Gao – *Suitability of Polymer Mortars for Repairing Seismic Damaged Ancient Masonry Pagodas*, Computer Modelling and New Technologies, Vol. 18 (12D): 204–210, 2014.
- [78] Y. Li – *Wood-Polymer Composites*, in *Advances in Composite Materials* -

- Analysis of Natural and Man-Made Materials*, Intech, 230–276, 2011, ISBN 9789533074498.
- [79] P. Lima, R. Toledo Filho, J. Melo Filho – *Compressive Stress-Strain Behaviour of Cement Mortar-Composites Reinforced with Short Sisal Fibre*, *Materials Research*, Vol. 17 (1): 38–46, 2014, ISSN 1516-1439.
- [80] G. R. Liu, S. S. Quek – *Finite Element Method. A Practical Course*, I. Butterworth-Heinemann, 2003, ISBN 9780750658669.
- [81] L. Liu, Z. Huang – *A Note on Mori-Tanaka's Method*, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 27 (3): 234–244, 2014, ISSN 1860-2134.
- [82] Y. Liu, B. Zwingmann, M. Schlaich – *Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures*, MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) - *Polymers*, Vol. 7 (10): 2078–2099, 2015, ISSN 2073-4360.
- [83] D. L. Logan – *A First Course in the Finite Element Method*, V. Cengage Learning, 2011, ISBN 9780495668251.
- [84] A. T. Lucas – *Ancient Egyptian Mortars*, ASAE, Vol. 7: 4–7, 1906.
- [85] T. C. Madhavi, L. Raju Swamy, D. Mathur – *Polypropylene Fiber Reinforced Concrete*, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 4 (4): 114–119, 2014, ISSN 2250-2459.
- [86] R. R. Madke, S. Chakraborty, R. Chowdhury – *Multiscale Approach for the Nonlinear Behavior of Cementitious Composite*, *Computational Materials Science*, Vol. 93: 29–35, 2014, ISSN 0927-0256.
- [87] S. Majeed – *Effect of Specimen Size on Compressive, Modulus of Rupture and Splitting Strength of Cement Mortar*, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 11: 584–588, 2011, ISSN 1812-5654.
- [88] F. Mancarella, R. W. Style, J. S. Wettlaufer – *Surface Tension and the Mori-Tanaka Theory of Non-Dilute Soft Composite Solids*, *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 472 (2189), 2016, DOI 10.1098/rspa.2015.0853.

- [89] D. L. Manea – *Cursul disciplinei de Materiale speciale pentru reabilitarea construcțiilor, UTCN, Patologia și Reabilitarea Construcțiilor*, Cluj-Napoca, 2014.
- [90] D. L. Manea – *Materiale speciale pentru construcții*, U.T. Press, Cluj-Napoca, 2011, ISBN 9789736626753.
- [91] D. L. Manea, A. G. Netea – *Materiale de construcții și chimie aplicată*, Vol. 3, Mediamira, Cluj-Napoca, 2008, ISBN 9789737132499.
- [92] D. L. Manea, A. G. Netea – *Materiale de construcții și chimie aplicată*, Vol. 2, Mediamira, Cluj-Napoca, 2007, ISBN 9789737131959.
- [93] S. P. Mangat, K. Gurusamy – *Flexural Strength of Steel Fibre-Reinforced Cement Composites*, Journal of Materials Science, Vol. 22 (9): 3103–3110, 1987, ISSN 0022-2461.
- [94] M. A. Mansur, M. A. Aziz – *Study of Bamboo-Mesh Reinforced Cement Composites*, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 5 (3): 165–171, Aug. 1983, ISSN 0262-5075.
- [95] J. S. Marcuzzo, C. Otani, H. A. Polidoro, S. Otani – *Influence of Thermal Treatment on Porosity Formation on Carbon Fiber from Textile PAN*, Materials Research, Vol. 16 (1): 137–144, 2013, ISSN 1516-1439.
- [96] M. Mareș – *Materiale compozite. Proprietăți și modelare*, Tehnopress, Iași, 2006, ISBN 9737023579.
- [97] E. Marin – *Cercetări privind influența fibrelor de sticlă asupra proprietăților compozitelor cu matrice minerală armate dispers*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași, 2015.
- [98] J. L. Martin, D. Darwin, R. E. Terry – *Cement Paste, Mortar and Concrete Under Monotonic, Sustained and Cyclic Loading*, Report on Research Sponsored by The National Science Foundation, Kansas, 1991.
- [99] I. C. Mihai, A. D. Jefferson – *Constitutive Modelling of Fibre Reinforced Cementitious Composites Based on Micromechanics*, in *Computational Modelling of Concrete Structures - Proceedings of EURO-C 2014*, Vol. 1: 247–253, CRC Press, 2014, ISBN 9781138001459.

- [100] S. N. Monteiro, F. P. D. Lopes, A. P. Barbosa, A. B. Bevitori – *Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials - An Overview*, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, Vol. 42 (10): 2963–2974, 2011, ISSN 1073-5623.
- [101] M. Moradian, M. Shekarchi – *Durability and Dimensional Stability of Steel Fiber Reinforced Cementitious Mortar in Comparison to High Performance Concrete*, Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 17 (4): 515–535, 2016, ISSN 1563-0854.
- [102] V. Mortazavian, A. Fatemi, A. Khosrovaneh – *Effect of Water Absorption on Tensile and Fatigue Behaviors of Two Short Glass Fiber Reinforced Thermoplastics*, SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 8 (2): 435–443, 2015, ISSN 1946-3987.
- [103] W. E. Morton, J. W. S. Hearle – *Physical properties of textile fibres*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1993, ISBN 9781845692209.
- [104] R. Muntean – *Elemente eficiente din beton armat dispers cu fibre sintetice din polipropilenă*, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Braşov, 2012.
- [105] T. Nagy-György – Utilizarea materialelor compozite în construcții, in *Materiale, elemente și structuri compozite/compuse pentru construcții (Zilele Academice Timișene, Ediția a VII-a)*, 25–36, Editura Mirton, Timișoara, 2001, ISBN 9735854074.
- [106] T. Nagy-György, V. Stoian, D. Dan, J. Gergely, C. Dăescu – *Materiale compozite pentru construcții*, Editura Politehnica, 2009, ISBN 9789736259487.
- [107] K. Naito, J.-M. Yang, Y. Xu – *Enhancing the Thermal Conductivity of Polyacrylonitrile- and Pitch-Based Carbon Fibers by Grafting Carbon Nanotubes on Them*, Carbon, Vol. 48 (6): 1849–1857, May 2010, ISSN 0008-6223.
- [108] A. M. Neville – *Properties of Concrete*, V. Pearson Custom Publishing, 2011, ISBN 9780273755807.
- [109] O. Onuaguluchi, N. Banthia – *Plant-Based Natural Fibre Reinforced Cement Composites: A review*, Cement and Concrete Composites, Vol. 68: 96–108, 2016, ISSN 0958-9465.

- [110] Y. A. Orban, D. L. Manea, C. Aciu – *Study of methods for simulating multiphase construction materials*, Procedia Manufacturing, Vol. 22: 256–261, 2018, ISSN 2351-9789.
- [111] Y. A. Orban, D. L. Manea, C. Aciu, A. Mustea – *Virtual Manufacturing and Mechanical Properties of Synthetic Fiber-Reinforced Mortars*, Procedia Manufacturing, Vol. 22: 256–261, 2018, ISSN 2351-9789.
- [112] N. Ozsoy, M. Ozsoy, A. Mimaroglu – *Mechanical Properties of Chopped Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites*, Acta Physica Polonica A (2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering ICCESN 2015), Vol. 130 (1): 297–299, 2015, ISSN 0587-4246.
- [113] C. Pelissou, J. Baccou, Y. Monerie, F. Perales – *Determination of The Size of The Representative Volume Element for Random Quasi-Brittle Composites*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 46 (14–15): 2842–2855, 2009, ISSN 0020-7683.
- [114] A. C. Popa, C. Cerbu – *Introducere în Metoda Elementelor Finite*, Editura Universității Transilvania, Brașov, 2013, ISBN 9786061903320.
- [115] K. Ramóna, C. O. Attila, L. É. Eszter, B. L. György – *Makro műanyag szálak hatása a beton hőterhelését követő maradó tulajdonságaira*, Tudományos Diákköri Konferencia (Conference of Scientific Students' Associations), 2015.
- [116] M. Regourd, J. Kerisel, P. Deletie, B. Haguenaer – *Microstructure of Mortars from Three Egyptian Pyramids*, Cement and Concrete Research, Vol. 18 (1): 81–90, 1988, ISSN 0008-8846.
- [117] G. Šahmenko, A. Krasnikovs, M. Eiduks – *Ultra High Performance Concrete Reinforced with Short Steel and Carbon Fibers*, Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, Vol. I: 193–199, 2015, ISSN 1691-5402.
- [118] S. M. Sapuan – *Composite Materials: Concurrent Engineering Approach*, Butterworth-Heinemann, 2017, ISBN 9780128025079.
- [119] M. Science, W. Road – *Characteristics of Several Carbon Fibre-Reinforced*

- Aluminium Composites Prepared by a Hybridization Method*, Journal of Materials Science, Vol. 29: 4342–4350, 1994, ISSN 0022-2461.
- [120] M. J. Sewell – Rodney Hill, in *Biographical Memoirs off Fellows of The Royal Society*, Vol. 61: 161–181, 2015, ISBN 9781782521594.
- [121] C. Soranakom – *Multi Scale Modeling of Fiber and Fabric Reinforced Cement Based Composites*, Ph. D. Thesis, Arizona State University, 2008.
- [122] S. S. Suhaily, H. P. S. A. Khalil, W. O. W. Nadirah, M. Jawaid – *Bamboo Based Biocomposites Material, Design and Applications*, in *Materials Science - Advanced Topics*, Intech, 489–517, 2013, ISBN 9789535111405.
- [123] N. Sveatenco – *Determinarea parametrului schemei de interacțiune dintre subelemente ale mediului microneomogen*, Meridian Ingineresc (Moldavian Engineering Association), Vol. 2: 48–54, 2013, ISSN 1683-853X.
- [124] N. Sveatenco – *Principiile interacțiunii cinematice dintre elemente de structură ale mediului microneomogen*, Meridian Ingineresc (Moldavian Engineering Association), Vol. 1: 35–39, 2013, ISSN 1683-853X.
- [125] Y. S. Tai, S. El Tawil, T. H. Chung – *Performance of Deformed Steel Fibers Embedded in Ultra-High Performance Concrete Subjected to Various Pullout Rates*, Cement and Concrete Research, Vol. 89: 1–13, 2016, DOI 10.1016/J.CEMCONRES.2016.07.013, ISBN 0008-8846.
- [126] N. Țăranu, A. Secu, E. Decher, D. Isopescu – *Structuri din materiale compozite și asociate*, I. P. Iași, 1992.
- [127] N. Țăranu, M. Budescu, P. Mihai, I. Lungu, O. M. Banu, I. O. Toma – *Establishing the Complete Characteristic Curve of Concrete Loaded in Compression*, Romanian Journal of Materials, Vol. 45 (1): 43–54, 2015, ISSN 1583-3186.
- [128] *Teijin Company – Annual Report. Business Group Review*, 2010.
- [129] J. Tejchman, J. Kozicki – *Experimental and Theoretical Investigations of Steel-Fibrous Concrete*, Springer, 2010, ISBN 9783642146022.
- [130] U.S. Congress Office of Technology Assessment – *Polymer Matrix Composites*,

- in *Advanced Materials by Design - New Structural Materials Technologies*, 73-95, DIANE Publishing, Washington DC, 1988, ISBN 9781428922396.
- [131] U.S. The Department of the Interior – *The Preservation of Historic Architecture: The U.S. Government's Official Guidelines for Preserving Historic Homes*, Lyons Press, 2004, ISBN 1592281265.
- [132] M. F. Vaz, H. Canhão, J. E. Fonseca – Bone: A Composite Natural Material, in *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*, Intech, 195–228, 2011, ISBN 9789533074498.
- [133] I. Viejo, M. Laspalas, I. Mariner, M. A. Jiménez – *Consideration of Fibre Orientation in a Micromechanical Model for Strain Hardening Cement Composite*, in *Computational Modelling of Concrete Structures - Proceedings of EURO-C 2014*, Vol. 1: 237–246, CRC Press, 2014, ISBN 9781138001459.
- [134] I. Viejo, L. P. Esteves, M. Laspalas, J. M. Bielsa – *Numerical Modelling of Porous Cement-Based Materials by Superabsorbent Polymers*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 90: 184–193, 2016, ISSN 0008-8846.
- [135] J. R. Viso, J. R. Carmona, G. Ruiz – *Size and Shape Effects on the Compressive Strength of High Strength Concrete*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38 (3): 386–395, 2008, ISSN 0008-8846.
- [136] J. Vodicka, D. Spura, J. Kratky – *Homogeneity of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)*, PRO 39: 6th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (BEFIB), Vol. 1: 537–544, 2004, ISBN 9782912143495.
- [137] K. Wille, A. E. Naaman – *Pullout Behavior of High-Strength Steel Fibers Embedded in Ultra-High-Performance Concrete*, *ACI Materials Journal*, Vol. 109 (4): 479–488, 2012.
- [138] M. K. Yew, I. Othman, M. C. Yew, S. H. Yeo, H. B. Mahmud – *Strength Properties of Hybrid Nylon-Steel and Polypropylene-Steel Fibre-Reinforced High Strength Concrete at Low Volume Fraction*, *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6 (33): 7584–7588, 2011, ISSN 1992-1950.
- [139] I. Yoshitake, F. Rajabipour, Y. Mimura, A. Scanlon – *A Prediction Method of*

Tensile Young's Modulus of Concrete at Early Age, Advances in Civil Engineering, 2012, ISSN 1687-8086.

- [140] X. Zeng, S. J. Mooney, C. J. Sturrock – *Assessing the Effect of Fibre Extraction Processes on the Strength of Flax Fibre Reinforcement*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 70: 1–7, 2014, ISSN 1359-835X.
- [141] B. Zhang – *Digital Test of Composite Material Using X-Ray Tomography and Finite Element Simulation*, Ph. D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2007.
- [142] N. O. Zihnioğlu, L. Y. Woo, T. O. Mason, S. P. Shah – *Monitoring Fiber Dispersion in Fiber-Reinforced Cementitious Materials: Comparison of AC-Impedance Spectroscopy and Image Analysis*, Aci Materials Journal, Vol. 103 (5): 340–347, 2006, DOI 10.14359/18156.
- [143] X. Zua, Z. Huang, W. Zhai – *Performance of Kevlar Fibre-Reinforced Rubber Composite Armour Against Shaped-Charge Jet Penetration*, LAJSS Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 12 (3): 507–519, 2015, ISSN 1679-7817.
- [144] C. Zweben – Composite Materials, in *Mechanical Engineers' Handbook*, Ed. IV., Vol. 1, John Wiley & Sons, Devon, Pennsylvania , ISBN 9781118118993.

Programe și manuale de utilizare:

- [145] Digimat Linear and Non-linear Multi-Scale Modelling Software, e-Xstream Engineering, MSC Software Belgium, 2017.
- [146] *Digimat user's manual*, e-Xstream Engineering, MSC Software Company, 2016.
- [147] *Digimat user's manual*, e-Xstream Engineering, MSC Software Company, 2017.

Fișe tehnice și materiale de prezentare:

- [148] Fibre Technologies International Technical Datasheet - Alkali Resistant Glass Fibre.
- [149] Fișă tehnică și broșură Ceresit CD 26 - Mortar de reparații pentru beton, pe bază de ciment pentru aplicare în strat gros.

- [150]** Fișă tehnică și broșură Ceresit CT 190 - Mortar adeziv și masă de șpaclu pentru lipirea și șpăcluirea plăcilor din vată minerală.
- [151]** *Fișă tehnică și broșură EuroCret 20 HD - Mortar de reparații cu fibre.*
- [152]** Fișă tehnică și broșură EuroCret 20 HSF - Mortar de reparații cu fibre rezistent la atac sulfatic.
- [153]** Fișă tehnică și broșură Holcim - Cement Portland compozit Structo® Plus cu Duraditiv.
- [154]** Fișă tehnică și broșură Knauf Renti Fein - Mortar de reparații cu fibre.
- [155]** Fișă tehnică și broșură Mapei Mapegrout Colabile GF (Hi-Flow) - Mortar cu fibre anorganice, pentru repararea structurilor de beton unde se cere o fluiditate ridicată.
- [156]** Fișă tehnică și broșură Mapei Mapegrout FMR - Mortar armat cu fibre flexibile din aliaj metalic utilizat în particular la repararea structurilor de beton.
- [157]** Fișă tehnică și broșură Mapei Mapegrout SV Fiber - Mortar cu conținut de fibre rigide din oțel, pentru repararea betonului.
- [158]** Fișă tehnică și broșură Mapei Planitop - Mortar armat cu fibre sintetice de poliacrilonitril pentru repararea și nivelarea betonului.
- [159]** Fișă tehnică și broșură RomFracht - Fibre de oțel RFC.
- [160]** Fișă tehnică și broșură RomFracht - Fibre de polipropilenă Rofero.
- [161]** Fișă tehnică și declarație de conformitate Holcim Industry.
- [162]** Fișă tehnică și material de prezentare ISOMAT MEGACRET-10 - Mortar pe bază de ciment, de mare rezistență, armat cu fibre, pentru realizarea de straturi subțiri.
- [163]** Fișă tehnică și material de prezentare ISOMAT MEGACRET-40 - Mortar pentru reparații, armat cu fibre disperse.
- [164]** Fișă tehnică și material de prezentare PAGEI - Mortar de subturnare cu fibre de oțel.

- [165]** Fișă tehnică și material de prezentare Sika MonoTop-614 - Mortar de reprofilare cu aditivi sintetici și armat cu fibre sintetice.
- [166]** Fișă tehnică și material de prezentare Sika Repair 13 - Mortar de reparație modificat polimeric și armat cu fibre sintetice, rezistent la sulfați.

Normative și standarde:

- [167]** GE 039-2001 - Ghid pentru determinarea experimentală în situ și în laborator a modulului static și dinamic de elasticitate a betonului, B.C. Nr. 1/2002, Elaborator INCERC, 2001.
- [168]** SR 7055/1996: Ciment Portland alb.
- [169]** SR EN 1008/2003: Apa de preparare pentru beton. Specificații pentru prelevare, încercare și evaluare a aptitudinii de utilizare a apei, inclusiv a apelor recuperate din procese ale industriei de beton, ca apă de preparare pentru beton.
- [170]** SR EN 1015-1/2001: Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 1: Determinarea distribuției granulometrice (analiză prin cernere).
- [171]** SR EN 1015-10/2002 - Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 10: Determinarea densității aparente a mortarului întărit.
- [172]** SR EN 1015-11/2002: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- [173]** SR EN 1015-12/2001: Methods of test of mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates.
- [174]** SR EN 1015-2/2001: Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 2: Eșantionare globală a mortarelor și pregătire mortare de încercat.
- [175]** SR EN 1015-3/2005: Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 3: Determinarea consistenței mortarului proaspăt (cu masa de împrăștiere), 2005.
- [176]** SR EN 12390-1/2013: Încercare pe beton întărit. Partea 1: Formă, dimensiuni și alte condiții pentru epruvete și tipare.

- [177]** SR EN 12390-13/2013: Testing hardened concrete. Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression.
- [178]** SR EN 12390-2/2009: Încercare pe beton întărit. Partea 2: Pregătirea și păstrarea epruvetelor pentru încercări de rezistență.
- [179]** SR EN 12390-3/2009: Încercare pe beton întărit. Partea 3: Rezistența la compresiune a epruvetelor.
- [180]** SR EN 13139/2003: Agregate pentru mortare.
- [181]** SR EN 14216/2015: Ciment. Compoziție, specificații și criterii de conformitate ale cimenturilor speciale cu căldura de hidratare foarte redusă.
- [182]** SR EN 14889-1/2007 - Partea 1: Fibre de oțel. Definiții, specificații și conformitate.
- [183]** SR EN 14889-2/2008 - Partea 2: Fibre de polimer. Definiții, specificații și conformitate.
- [184]** SR EN 197-1/2011 - Partea 1: Compoziție, specificații și criterii de conformitate ale cimenturilor uzuale.
- [185]** SR EN 413-1/2011: Ciment pentru zidărie. Partea 1: Compoziție, specificații și criterii de conformitate.
- [186]** SR EN 932-1/1998: Încercări pentru determinarea caracteristicilor generale ale agregatelor. Partea 1: Metode de eșantionare.
- [187]** SR EN 932-3/1998: Încercări pentru determinarea caracteristicilor generale ale agregatelor. Partea 3: Procedură și terminologie pentru descriere petrografică simplificată.
- [188]** SR EN 932-5/2012: Încercări pentru determinarea caracteristicilor generale ale agregatelor. Partea 5: Echipament curent și etalonare.
- [189]** SR EN 933-1/2012: Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 1: Determinarea granulozității. Analiza granulometrică prin cernere.

- [190] SR EN 933-2/1998: Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 2: Analiza granulometrică. Site de control, dimensiuni nominale ale ochiurilor.
- [191] SR EN 933-4/2008: Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 4: Determinarea formei particulelor. Coeficient de formă.
- [192] SR EN 933-7/2001: Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 7: Determinarea conținutului de elemente cochiliere. Procent de cochilii în agregate.
- [193] SR EN 934-2/2012: Aditivi pentru beton, mortar și pastă. Partea 2: Aditivi pentru beton. Definiții, condiții, conformitate, marcare și etichetare.
- [194] SR EN 998-1: 2016 - Specificație a mortarelor pentru zidărie. Partea 1: Mortare pentru tencuire și gletuire.
- [195] SR EN 998-2: 2016 - Specificație a mortarelor pentru zidărie. Partea 2: Mortare pentru zidărie.
- [196] Standard ASTM C1273 – 15: Standard Test Method for Tensile Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Ambient Temperatures, ASTM International, United States, 2015.

Alte referințe:

- [197] www.carbonfiber.gr.jp – *Type of Carbon Fiber Products and their Special Features, Japan Carbon Fiber Manufacturers Association*, 2014. [Online] Available: www.carbonfiber.gr.jp.
- [198] www.christinedemerchant.com – *Comparing the Characteristics of Glass, Kevlar (Aramid) and Carbon Fiber*, 2017. [Online] Available: <http://www.christinedemerchant.com/carbon-kevlar-glass-comparison>.
- [199] www.compositessupplier.com – *Jiaxing Newtex Composites Co., Ltd.* [Online] Available: <http://www.compositessupplier.com/>.
- [200] www.stradeeautostrade.it – *La metropolitana M4 di Budapest*. [Online] Available: <http://www.stradeeautostrade.it/ferrovie-e-metropolitane/la-metropolitana-m4-di-budapest/>.