



UNIVERSITATEA TEHNICĂ
"GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII



**CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA
PERFORMANȚELOR TERMO-MECANICE
ALE BETONULUI ECOLOGIC
PE BAZĂ DE CÂNEPĂ
REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT**

Doctorand:
Ing. Laurențiu ADAM

Conducător de doctorat:
Prof.univ.dr.ing. Dorina-Nicolina ISOPESCU

IAȘI - 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către,

Vă facem cunoscut că, în ziua de 27.09.2024 la ora 09:00 în Sala 0.1 R. Corp R – Facultatea de Construcții și Instalații - Iași, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

„CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR TERMO-MECANICE ALE BETONULUI ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ”
elaborate de domnul ing. **ADAM LAURENȚIU** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Prof. univ.dr.ing. Andrei BURLAC ,
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | <i>președinte</i> |
| 2. Prof.univ.dr.ing. Dorina-Nicolina ISOPESCU ,
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | <i>conducător de doctorat</i> |
| 3. Prof. univ.dr.ing. Carmen Elena MAFTEI ,
Universitatea Transilvania din Brașov | <i>referent oficial</i> |
| 4. Prof. univ.dr.ing. Dan Paul GEORGESCU ,
Universitatea Tehnică de Construcții București | <i>referent oficial</i> |
| 5. Prof. univ.dr.ing. Nicolae ȚĂRANU ,
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | <i>referent oficial</i> |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof.univ.dr.ing. Dan Cascaval

Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagit

CUPRINS

Cuprins.....	V
1 PREZENTAREA TEZEI.....	1
1.1 INTRODUCERE GENERALĂ	1
1.2 SCOPUL ȘI OBIECTIVELE TEZEI	2
1.3 STRUCTURA TEZEI – DESCRIEREA CAPITOLELOR	3
2 NIVELUL TEHNIC ACTUAL PRIVIND CERCETĂRILE ÎN DOMENIUL DEZVOLTĂRII BETONULUI ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ.....	5
2.1 PREOCUPĂRI LA NIVEL INTERNAȚIONAL ȘI ÎN CADRUL COLECTIVULUI DE CERCETARE	5
2.2 PERFORMANȚELE BETONULUI DE CÂNEPĂ	5
2.2.1 Betonul de câneapă turnat în sistem monolit în cofraje pierdute.....	6
2.2.2 Blocuri de zidărie din beton de câneapă	6
2.2.3 Betonul de câneapă aplicat mecanizat	6
2.2.4 Panouri prefabricate din beton de câneapă	7
2.2.5 Turnare 3 D a betonului de câneapă.....	7
2.2.6 Tencuieli pe bază de mortar de var hidratat cu adaosuri de câneapă.....	7
2.2.7 Concluzii asupra variantelor de punere în operă a betonului de câneapă.....	8
3 ELEMENTE COMPONENTE ALE BETONULUI ECOLOGIC PE BAZA DE CANEPA.....	9
3.1 BETONUL ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ – MATERIAL COMPOZIT	9
3.2 CÂNEPA INDUSTRIALĂ, MATERIE PRIMĂ ECO-STRATEGICĂ	9
3.2.1 Materii prime obținute din cultura de câneapă	10
3.2.2 Cânepa - agregat vegetal. Proprietăți fizice, chimice și caracteristici dimensionale	10
3.2.3 Caracterizarea agregatului vegetal – lemnul tocat de câneapă.....	11
3.3 LIANȚI AERIEI - VARUL CALCIC HIDRATAT	12
3.3.1 Rolul varului calcic hidratat în compoziția betonului pe bază de câneapă	12
3.4 LIANȚI HIDRAULICI	13
3.4.1.1 Rolul varului hidraulic în compoziția betonului de câneapă	13
3.4.1.2 Rolul cimentului Portland în compoziția betonului de câneapă	14
3.5 ADITIVI UTILIZAȚI ÎN COMPOZIȚIA BETONULUI ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ.....	14
3.5.1 Silicatul de sodiu	14
3.5.1.1 Rolul silicatlui de sodiu în compoziția betonului de câneapă	14
3.5.2 Hidroxidul de sodiu	15
3.5.2.1 Rolul hidroxidului de sodiu în compoziția betonului de câneapă	15
3.6 CONCLUZII	15
4 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PENTRU BETONUL ECOLOGIC PE BAZA DE CANEPA...17	17
4.1 OBIECTIVE PROPUSE.....	17
4.2 TEHNOLOGIA DE AMESTEC UTILIZATĂ LA OBTINEREA COMPOZIȚILOR DE BETON ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ	17

4.3	MĂSURĂTORI PRELIMINARII ÎN VEDEREA DETERMINĂRII COMPOZIȚIEI BETONULUI ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ.....	17
4.3.1	<i>Stabilirea compozițiilor pentru betonul ecologic pe bază de cânepă.....</i>	17
4.3.2	<i>Determinarea coeficientului de conductivitate termică.....</i>	18
4.4	DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE	18
4.4.1	<i>Rezistența la întindere prin încovoiere.....</i>	18
4.4.2	<i>Rezistența la compresiune a epruvetelor prismatice obținute din beton ecologic pe bază de cânepă</i>	18
4.5	CONCLUZII	19
5	METODE DE OPTIMIZARE ALE COMPOZIȚIILOR BETONULUI ECOLOGIC PE BAZA DE CANEPA.....	21
5.1	INTRODUCERE.....	21
5.2	OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR BETONULUI ECOLOGIC – METODA MASĂ DE LIANT CONSTANTĂ <MSOLL-CST>	21
5.2.1	<i>Trasarea dreptei de variație pentru care masa soluției de liant rămâne constantă.....</i>	21
5.3	OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR BETONULUI ECOLOGIC – METODA VOLUM DE LIANT CONSTANT <VSOLL-CST>	22
5.3.1	<i>Trasarea dreptei de variație pentru care volumul soluției de liant rămâne constant.....</i>	22
5.3.2	<i>Încercări de laborator pentru determinarea coeficientului de conductivitate termică - λ.....</i>	23
5.3.3	<i>Încercări de laborator pentru determinarea rezistenței la compresiune</i>	24
5.3.4	<i>Optimizarea compozițiilor.....</i>	24
6	STUDII DE CAZ PENTRU ELEMENTE DE CONSTRUCȚII DIN BETON DE CANEPA.....	27
6.1	INTRODUCERE.....	27
6.2	PARDOSELI DIN BETON ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ.....	27
6.2.1	<i>Compoziție și tehnologie de execuție.....</i>	27
6.2.2	<i>Tehnologia de realizare a amestecului și turnarea epruvetelor.....</i>	28
6.2.3	<i>Determinarea coeficientului de conductivitate termică λ.....</i>	28
6.2.4	<i>Determinarea rezistenței la compresiune</i>	29
6.3	PEREȚI TURNAȚI MONOLIT ÎN COFRAJE PIERDUTE FOLOSIND BETON PE BAZĂ DE CÂNEPĂ.....	31
6.3.1	<i>Determinarea conductivității termice</i>	31
6.3.2	<i>Determinarea rezistenței la compresiune.....</i>	32
6.3.3	<i>Concluzii</i>	33
6.4	BLOCURI DE ZIDARIE DIN BETON ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ	34
6.4.1	<i>Turnarea blocurilor de zidarie din beton ecologic pe bază de cânepă folosind matrița experimentală</i>	34
6.4.2	<i>Determinarea coeficientului de conductivitate termică a blocurilor de zidărie din beton ecologic pe bază de cânepă</i>	34
6.4.3	<i>Încercarea la compresiune a blocurilor de zidărie din beton de cânepă.....</i>	35
6.4.4	<i>Concluzii</i>	36
7.1	INTRODUCERE.....	37
7.1.1	<i>Identificarea scenariului privind ciclul de viață al betonului de cânepă</i>	38

7.1.2	<i>Bilanțul emisie-captare</i>	38
7.1.3	<i>Concluzii asupra rezultatelor obținute cu SimaPro9</i>	38
7.2	ANALIZA CICLULUI DE VIAȚĂ REALIZAT PRIN CALCUL MANUAL	39
7.2.1	<i>Bilanțul emisie-captare</i>	39
7.3	CONCLUZII ASUPRA REZULTATELOR OBTINUTE	39
8	CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. VALORIFICAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	41
8.1	CONCLUZII GENERALE	41
8.2	CONTRIBUȚII PERSONALE	46
8.3	VALORIFICAREA REZULTATELOR	48
8.3.1	<i>Lucrări publicate în reviste cotate ISI cu factor de impact (3):</i>	48
8.3.2	<i>Lucrări publicate în reviste indexate în baze de date internaționale (2):</i>	49
8.3.3	<i>Lucrări prezentate la conferințe naționale sau internaționale (3):</i>	49
8.3.4	<i>Lucrări publicate în Buletinul Institutului Politehnic Iași (BIPI):</i>	49
8.3.5	<i>Cerere de brevet de invenție</i>	49
8.4	DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	49
9	BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	51

Capitolul 1

Prezentarea tezei

1.1 Introducere generală

De la începutul secolului 21, emisiile globale de gaze cu efect de seră (GES) au crescut constant, iar principala cauză a creșterii acestora este dezvoltarea economică. Modificările climatice, respectiv încălzirea globală, sunt rezultatul utilizării intensive, în toate activitățile care definesc societatea umană, a produselor și serviciilor cu consum energetic mare, care, prin arderea combustibililor fosili, degajă în mediul înconjurător cantități impresionante de dioxid de carbon.

Uniunea Europeană are obiective ambițioase în acest sens, iar în contextul legislației europene privind mediul înconjurător, și-a stabilit un obiectiv de reducere a emisiilor interne nete de gaze cu efect de seră (GES) cu cel puțin 55% până în 2030 față de nivelurile din 1990 și de a deveni climatic neutră până în 2050 sub aspectul emisiilor de CO₂.

Sectorul construcțiilor este de departe cel mai mare emițător de gaze cu efect de seră, reprezentând 37% din emisiile globale. Producția și utilizarea materialelor precum cimentul, oțelul și aluminiul au o amprentă semnificativă de carbon. O mare parte din progresele din sector s-au concentrat pe reducerea emisiilor de dioxid de carbon din exploatarea clădirilor, evaluate la 75% din total, care provin din încălzire, răcire și iluminat. Se estimează că aceste emisii operaționale vor scădea la 50% din emisiile totale din sectorul construcțiilor în următoarele decenii.

Pentru a scădea și mai mult contribuția la emisiile de dioxid de carbon, este necesar să se identifice soluții de atenuare a emisiilor de carbon „încorporate” în clădiri, care provin din procesele de fabricație a materialelor utilizate, sau din tehnologiile de construcție ale clădirilor.

În prezent, sunt promovate strategii privind utilizarea materialelor ecologice pentru construcții, astfel încât impactul asupra mediului și consumul de energie în timpul funcționării construcției să fie minimizat.

Un astfel de material ecologic este betonul de cânepă, un material de construcție natural, a cărui utilizare a crescut în țările europene în ultimii ani. În prezent, în Statele Unite este certificat ca material național de construcție, permițând industriei construcțiilor să îl utilizeze pe scară extinsă. În România, betonul de cânepă este cunoscut, însă utilizarea lui în

construcții este limitată de lipsa unor standarde de produs, precum și de existența unor coduri și reglementări de proiectare.

Contextul internațional conduce la necesitatea aprofundării cercetărilor pentru reglementarea utilizării în sectorul construcțiilor a acestui material compozit ecologic – betonul pe bază de cânepă.

Obiectivele programului de cercetare dezvoltat în prezenta teză se încadrează în sfera preocupărilor actuale, existente la nivel internațional, legate de creșterea emisiilor de carbon, în care se manifestă tendințe și se implementează soluții inovatoare create pentru rezolvarea problemelor de mediu, pentru a preveni manifestările catastrofale ale schimbărilor climatice și încălzirii globale. Acest lucru a condus la reînvierea materialelor de construcție din beton ecologic folosind cânepă, care au beneficiile suplimentare ale captării carbonului, pe lângă energia redusă încorporată și regenerabilitatea.

În programul de cercetare pentru obținerea probelor s-au realizat 8 planuri experimentale ce au totalizat un număr de 50 de compoziții diferite de beton de cânepă și s-au turnat aproximativ 120 de epruvete cu forme și dimensiuni diferite precum cuburi, prisme, cilindri dar și piese cu forme și mărimi impuse de obiectivele vizate. Prin cercetările întreprinse, s-au stabilit proporții optime între liant și agregatele vegetale, conducând la dezvoltarea unor compoziții diferențiate, adaptate cerințelor specifice ale diferitelor elemente de construcție, demonstrând astfel că betonul de cânepă este un material de construcție versatil utilizat pentru turnarea șapelor de egalizare, construcția pereților turnați monolit în sistem de tipul cofrajelor pierdute dar și pentru fabricarea blocuri de zidărie modulare.

Aportul semnificativ pe care betonul de cânepă îl are în domeniul absorbției de CO₂ din atmosferă atât în perioada de creștere dar și ca soluție de sechestrare de dioxid de carbon pe întreaga perioadă de viață a construcției, sunt avantaje importante și motive întemeiate care au menținut în actualitate tematica cercetărilor în domeniul betonului ecologic pe bază de cânepă aspect demonstrate și în programul de cercetare din cadrul tezei.

Optimizarea a vizat identificarea unei metodologii bazate pe de calcul matematic capabile să conducă la obținerea unui maxim de performanțe termo-mecanice cu minim de resurse alocate, cu efecte precum eficientizarea consumului și creșterea randamentului de utilizare a resursei vegetale regenerabile pentru valorificarea superioară a potențialului ecologic privind amprenta de carbon asociată produselor din construcții. Astfel, betonul de cânepă se dovedește a fi un material versatil, capabil să ofere soluții eficiente atât din punct de vedere termic, cât și mecanic, în funcție de tipul și densitatea agregatelor utilizate.

1.2 Scopul și obiectivele tezei

Scopul tezei este reprezentat de obținerea unei metode de calcul pentru optimizarea compozițiilor de beton ecologic pe bază de cânepă astfel încât materialele de construcție eco-sustenabile produse să poată fi realizate cu un consum minim de resurse dar performanțele termo-mecanice să fie maxime posibile în raport cu limita naturală a proprietăților fizico-chimice ale elementelor componente.

Obiectivele vizate sunt:

- Standardizarea tehnologiei de amestec pentru compoziția de beton de cânepă;
- Determinarea cantității optime de liant raportată la cantitatea de cânepă;

- Identificarea limitei de separație între compoziția pentru betonul de cânepă cu proprietăți termo-izolatoare și compoziția pentru betonul de cânepă cu rezistență mecanică la compresiune;
- Determinarea caracteristicilor termice și mecanice
- Optimizarea compozițiilor de beton de cânepă
- Dezvoltarea unei metode de calcul pentru optimizarea proprietăților betonului ecologic pe bază de cânepă
- Crearea unei matrițe și obținerea brevetului pentru realizarea de materiale de construcții din beton de cânepă sub formă de blocuri de zidărie

1.3 Structura tezei – descrierea capitolelor

Teza este organizată în 2 părți și cuprinde 8 capitole:

- **Partea I** – Introducere generală în tematica cercetării efectuate și studiu privind nivelul actual al cunoașterii în domeniul performanțelor betonului ecologic pe bază de cânepă (Capitolul 1 și 2).
- **Partea II** – Programul de cercetare dezvoltat în cadrul tezei (Capitolele 3, 4, 5, 6, 7 și 8).

Capitolul 1. – conține informații referitoare la prezentarea temei de cercetare, scopul și obiectivele care au stat la baza cercetărilor efectuate și descrierea capitolelor.

Capitolul 2. – prezintă nivelul tehnic actual privind cercetările în domeniul dezvoltării betonului ecologic pe bază de cânepă, performanțele termo-mecanice, tipurile de materiale obținute din betonul de cânepă, tehnologiile disponibile și importanța cercetării cu referire la rolul betonului de cânepă în obținerea sustenabilității în domeniul materialelor de construcții obținute din materii prime ecologice. Tot în acest capitol se aduc contribuții cu privire la prezentarea unui sistem sustenabil ce are ca scop dezvoltarea unei economii circular capabile să genereze redresare și reziliență la nivel local prin identificarea resurselor naturale specifice și utilizarea lor în industria construcțiilor. Scopul este obținerea neutralității climatice prin utilizarea resurselor regenerabile capabile să absoarbă și să sechestreze CO₂.

Capitolul 3. – descrie elementele componente ale betonului ecologic pe bază de cânepă prin caracterizarea fizică și chimică a tuturor materiilor prime ce compun betonul ecologic pe bază de cânepă. Identificarea surselor de extracție, disponibilitatea și asigurarea continuității în aprovizionare precum și obținerea unui nivel ridicat de calitate și performanță energetică depinde de cunoașterea proprietăților native ale componentelor primare. Agregatul vegetal sub formă de tocătură obținută din partea lemnoasă a tulpinilor de cânepă, liantul aerian precum oxidul de calciu sau liantul hidraulic sub forma cimentului Portland și aditivi precum silicatul de sodiu sau hidroxidul de sodiu sunt descrise în acest capitol împreună cu rolul și influența pe care o aduc în obținerea performanțelor termo-mecanice ale betonului ecologic pe bază de cânepă.

Capitolul 4. – cuprinde cercetările experimentale realizate în laborator pe probe și epruvete obținute din turnarea în forme standardizate a betonului proaspăt pe bază de cânepă. Testele realizate au avut ca obiective: standardizarea tehnologiei de amestec pentru compoziția de beton de cânepă; determinarea cantității optime de liant raportată la cantitatea de cânepă; identificarea limitei de separație între compoziția pentru betonul de cânepă cu proprietăți termo-izolatoare și compoziția pentru betonul de cânepă cu rezistență mecanică la

compresiune; determinarea caracteristicilor termice; determinarea caracteristicilor mecanice. Atingerea acestor obiective s-a realizat prin variații ale compozițiilor de beton de cânepă, adoptarea de tehnologii diferite de obținerea a amestecului sau prin utilizarea aditivilor. În acest capitol se obțin informații preliminare, cu importanță în determinarea unei metode de optimizare a performanțelor betonului de cânepă.

Capitolul 5. – evidențiază rezultatele obținute prin aplicarea metodelor de optimizare a compozițiilor de beton de cânepă cu scopul de a obține performanțe termo-mecanice superioare concomitent cu reducerea consumurilor de materii prime astfel încât materialele obținute să fie nu doar performante energetic, ecologice și reciclabile dar și sustenabile din punct de vedere al consumului primar de materii prime. Provocarea a fost aceea de a optimiza la maxim performanțele prin utilizarea unei cantități minime de resurse și de a obține astfel atât rentabilizare lanțului de producție cât și asigurarea în viitor a disponibilității resurselor naturale. În acest capitol sunt prezentate 3 metode de optimizare:

- Optimizarea la masă totală constantă de liant;
- Optimizare la volum constant al soluției de liant;
- Optimizare prin utilizarea unei metode statistice bazate pe interpretarea unui set de încercări minime și identificarea răspunsurilor obținute pentru generarea unui model matematic.

Capitolul 6. – inventariază elementele de construcții obținute din beton pe bază de cânepă prin prezentarea compozițiilor, a tehnologiilor de execuție și a proprietăților termo-mecanice ale:

- șapelor de egalizare pentru pardoseală;
- pereților turnați monolit cu rol de umplutură și termo-izolație în structura pereților de închidere și anvelopare;
- blocurilor de zidărie prefabricate cu rol de umplutură și izolație termică, sau ca elemente autoportante.

Capitolul 7. – analizează ciclul de viață pentru betonul de cânepă pentru identificarea impactului amprente de carbon generate pentru scenariul de la obținerea materiilor prime și până la dezafectarea, reciclarea și reutilizarea elementelor de construcție reprezentate de blocurile de zidărie din beton ecologic pe bază de cânepă.

Capitolul 8. – cumulează informații cu privire la concluziile generale obținute pe parcursul programului doctoral referitor la optimizarea performanțelor termo-mecanice ale betonului de cânepă, enumeră contribuțiile personale cu privire la cercetările desfășurate cu prezentarea elementelor de noutate asociate domeniului de cercetare. Valorificarea rezultatelor cu diseminarea informațiilor prin participări la conferințe internaționale din sfera temei de cercetare, publicarea de articole în reviste cu factor de impact. Obținerea unui brevet de invenție pentru matrița utilizată la obținerea blocurilor de zidărie autoportante, eficiente energetic din beton ecologic pe bază de cânepă. Propunerea de noi direcții de cercetare prin care să se obțină noutatea informațiilor, fezabilitatea implementării și progresul tehnologic în domeniul materialelor de construcție eco-sustenabile.

Capitolul 2

Nivelul tehnic actual privind cercetările în domeniul dezvoltării betonului ecologic pe bază de cânepă

2.1 Preocupări la nivel internațional și în cadrul colectivului de cercetare

La nivel național cercetări numeroase se identifică în domeniu [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], precum și la nivel internațional [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39]. Utilizarea cânepii ca material de construcție a captat tot mai mult atenția cercetătorilor pentru inovarea de materiale de construcție eficiente energetic care să fie în același timp și prietenoase cu mediul. Scopul central este acela de a înlocui materialele convenționale cu variante care sunt realizate folosind ca materie primă deșeuri vegetale lemnoase provenite în urma activităților agricole sustenabile, cum este cazul betonului ecologic pe bază de cânepă.

Cele mai importante cauze care au dus însă la slaba promovare și utilizare este însăși lipsa materiei prime și variabilitatea proprietăților termo-mecanice finale obținute după perioada de maturare a materialului. Optimizarea în acest caz vizează nu doar obținerea performanțelor minime limită admisibile obținute prin variația ponderii de liant în amestec, dar mai cu seamă identificarea acelor variante, procedee, aditivi, materiale de adaos care contribuie la caracteristicile liantului de bază în scopul obținerii performanței în material cu posibilitatea reducerii consumului de liant. De aceea studiile în domeniu, realizate la nivel internațional dar și în cadrul colectivului de cercetare au evidențiat concluziile la care au ajuns diferiți cercetători care au identificat și analizat diferențele de performanță ale materialelor de construcție din beton de cânepă plecând de la ipoteze care au vizat :

- variația raportului între masa de cânepă folosită în amestec și liant, mărirea granulelor/particulelor de cânepă folosite cu pastrarea raportului masic cânepă-liant;
- variația raportului apa-liant, gradul de compactare, folosirea de aditivi superplastifianți pentru realizarea amestecului sau a aditivilor pentru reducerea timpului de întărire;
- utilizarea amestecurilor de lianți minerali hidratați și hidraulici în proporții variate;
- utilizarea de lianți organici ca amidonul, glutenul, cazeina sau cleiul de oase.

2.2 Performanțele betonului de cânepă

Betonul de cânepă este un material compozit, pentru producerea căruia se folosesc așchii de cânepă, un amestec de liant mineral pe bază de var hidratat și apă. Interesul pentru acest material compozit obținut din agregate vegetale, crește odată cu preocuparea oamenilor de știință față de descoperirea unor soluții care să reducă generarea de dioxid de carbon sau găsirea unor modalități de absorbție a gazele cu efect de seră din atmosferă pentru a diminua

efectele schimbările climatice globale. Acest material are proprietăți portante reduse, rezistența la compresiune atingând valori sub 1 MPa [45], [46], [47], [48], . Betonul de cânepă este în prezent analizat datorită performanțelor pe care le înregistrează ca material fonoabsorbant, izolator termic și capacitatea sa de a regla parametrii higrotermici ai aerului interior [49]. Astfel, având un coeficient scăzut de transfer termic [50] și reușind să atenueze vibrațiile sonore [50], [51], [52], [53], [54], [55], se califică pe lista materialelor sustenabile ca aliat în lupta împotriva încălzirii climatice și ca soluție la criza energetică din domeniul construcțiilor, fiind în același timp un material ecologic care rezolvă și nevoia de menținere a unui mediu interior sănătos și confortabil în spațiile de locuit [56], [57], [58], [59], [60].

Pentru sectorul construcțiilor pot fi realizate diferite materiale [60], [72] pe bază de cânepă, prezentate sub forme precum:

- Betonul de cânepă turnat în sistem monolit în cofraje pierdute;
- Blocuri de zidărie din beton de cânepă;
- Beton de cânepă aplicat mecanizat;
- Panouri prefabricate din beton de cânepă;
- Turnarea 3 D a betonului de cânepă;
- Mortar de tencuială pe bază de cânepă.

2.2.1 Betonul de cânepă turnat în sistem monolit în cofraje pierdute

Este un amestec obținut din partea lemnoasă a tulpinii de cânepă și varul hidratat ca bază a mixului de liant (raport masic 1:2), care se introduce direct în interiorul unui cofraj, (figura 2.1), realizat pe șantier, asemeni cofrajelor pentru turnarea betonului clasic. Dimensiunea granulelor de cânepă variază între 6 și 15 mm.



Figura 2.1 Beton de cânepă turnat în sistem monolit [78], [79]

2.2.2 Blocuri de zidărie din beton de cânepă

În figura 2.2, sunt prezentate blocurile de zidărie prefabricate formate din var și puzderie de cânepă naturală sau mineralizată [80], cu granulația cuprinsă între 6 și 15 mm. Sunt folosite pentru realizarea de pereți autoportanți pentru anveloparea clădirilor. Dimensiunile constructive sunt: grosime între 6-35 cm, lungime între 400-600 cm și înălțimea între 250-300 cm.



Figura 2.2 Blocuri de zidărie din beton de cânepă [81]

2.2.3 Betonul de cânepă aplicat mecanizat

Betonul de cânepă se aplică mecanizat cu pompe automatizate care prepara amestecul și îl pulverizează cu presiune pentru umplerea casetelor formate de structura de rezistență a

peretelui. Se folosește pentru izolarea structurilor verticale, prezentate în figura 2.3, cu performanțe de izolare termică date de valori reduse ale coeficientului de conductivitate termică cu valori situate între 0,0652 și 0,0753 W/mK [15]. Varul folosit este cel hidratat (aerian), la care se mai adaugă varul hidraulic în funcție de tipul elementului de construcție realizat și umiditatea mediului.



Figura 2.3 Aplicarea mecanizată a betonului de cânepă [82]

2.2.4 Panouri prefabricate din beton de cânepă

Panouri prefabricate prezentate în figura 2.4 varianta 1, se utilizează la placări termo și fonoabsorbante, prezintă elemente de îmbinare tip nut și feder (lambă și uluc); se montează utilizându-se sisteme de prindere prin înfiletare cu diblu și holtzșurub.

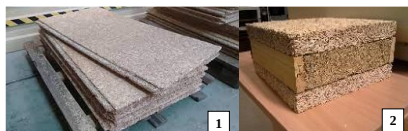


Figura 2.4 Panouri prefabricate din beton de cânepă [83], [84]

2.2.5 Turnare 3 D a betonului de cânepă

Betonul de cânepă se poate pune în operă și prin folosirea unei instalații speciale numite imprimantă 3D formată dintr-un braț mobil comandat electronic la capătul căruia se află o duză prin care materialul preparat este turnat respectând comenzile calculatorului care urmărește planurile de execuție ale clădirii. În figura 2.5 se prezintă varianta de realizare a pereților construcției utilizând o imprimantă industrială 3D. Se observă cum pereții sunt realizați prin treceri succesive peste conturul ce delimitează încăperile construcției.

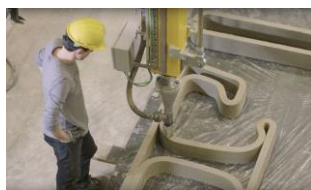


Figura 2.5 Turnarea betonului de cânepă cu ajutorul unei imprimante 3D [85]

2.2.6 Tencuieli pe bază de mortar de var hidratat cu adaosuri de cânepă

În figura 2.6 este prezentat un strat de finisaj (tencuială) aplicată peste stratul support reprezentat de un element de construcție (perete autoportant) din beton de cânepă.



Figura 2.6 Tencuială pe bază de var, cânepă și nisip [86]

2.2.7 Concluzii asupra variantelor de punere în operă a betonului de cânepă

Deși ar putea exista diferențe în cadrul fiecărei metode (de exemplu, ordinea amestecării componentelor individuale, densitatea, dimensiunea puzderiei de cânepă etc.) între diferiți producători și cercetători, toți au în comun folosirea cânepii, varului și apei. Proprietățile betonului de cânepă și natura monolitică a construcției simplifică procesul de construcție și oferă clădiri sănătoase cu energie încorporată scăzută și cu o diminuare a costurilor energetice pe durata de exploatare [70]. Utilizarea cânepii în construcții a fost justificată de proprietățile fizice înregistrate de beton de cânepă și anume:

- izolație și inerție termică;
- permeabilitate la vaporii de apă;
- absorbția de carbon din atmosferă;
- izolarea fonică;
- rezistență la foc;
- protecția împotriva infestării cu dăunători;
- biodegradabil și ecosustenbil.

Capitolul 3

Elemente componente ale betonului ecologic pe bază de cânepă

3.1 Betonul ecologic pe bază de cânepă – material compozit

Betonul ecologic pe bază de cânepă este compus din: agregatele sub formă de tulpină lignificată de cânepă industrială tocată și matricea de liant obținut ca amestec între doi lianți minerali și apa pentru hidratare și amestecare. În ordinea descrescătoare a volumului și a tipului de materie primă utilizată pentru obținerea acestui material compozit, se disting următoarele elemente: tocătura lemnoasă din așchii de cânepă industrială - cunoscută în tradiție și sub denumirea de puzderie, liantul mineral - var calcic hidratat, liantul mineral hidraulic - ciment Portland, apa pentru hidratare și amestecare, aditivi și materiale de adaos de origine minerală sau vegetală, după caz, în funcție de proprietățile fizico-mecanice pe care trebuie să le îndeplinească compozitul. Ca aditivi se utilizează hidroxidul de sodiu [14], silicatul de sodiu [90], iar ca adaosuri se identifică nisipul de cuarț și deșeurile de lemn sub formă de pulbere de lemn (rumeguș) cu o dimensiune a particulelor cuprinsă între 0 și 2 mm.

3.2 Cânepa industrială, materie primă eco-strategică

Tocătura de cânepă utilizată ca materie primă de bază pentru obținerea betonului ecologic de cânepă este produsă prin conversia fotosintetică a carbonului atmosferic, iar următoarele estimări privind absorbția de carbon sunt calculate prin examinarea conținutului de carbon al moleculelor care alcătuiesc fibrele tulpinii de cânepă. Tulpina de cânepă industrială este alcătuită în principal din celuloză, hemiceluloză și lignină. Celuloza reprezintă 70% din greutatea uscată a tulpinii. Celuloza este un polimer liniar omogen construit din unități repetate de glucoză. Conținutul de carbon al celulozei reprezintă 45% din masa sa moleculară. Hemiceluloza reprezintă 22% din greutatea uscată a tulpinii. Hemiceluloza asigură o legătură între celuloză și lignină. Are o structură ramificată, formată din diverse zaharuri pentozice. Lignina reprezintă 6% din greutatea uscată a tulpinii. Lignina este un material de întărire situat de obicei între microfibrile de celuloză.

Potrivit Limetechnology Ltd [92], betonul de cânepă reține și sechestrează aproximativ 110 kg de CO₂ pentru fiecare metru cub de perete construit, în comparație cu cele 200 kg de CO₂ emise de betonul standard. De asemenea, nu se iau în considerare economiile de carbon

realizate prin înlocuirea produselor derivate din exploatarea pădurilor și faptul că aceste păduri pot fi salvate de la exploatare și astfel continuă să absoarbă CO₂.

3.2.1 Materii prime obținute din cultura de cânepă

Cultivarea soiurilor de cânepă industrială *Canabis Sativa* oferă avantajul obținerii a 3 produse de bază precum semintele, fibra textilă și puzderia de cânepă (figura 3.1). Acestea reprezintă materia primă pentru domenii precum: industria alimentară, industria textilă, industria construcțiilor și industria bio-combustibililor.



Figura 3.1 Materii prime obținute din cultura de cânepă: 1-semințe, 2-fibră textilă, 3-lemn tocat (puzderia de cânepă)

Puzderia de cânepă se referă la tocătura lemnoasă rezultată în urma decortificării tijelor/tulpinilor de cânepă.

Comportarea mecanică diferită dată de proprietățile și compoziția specifică a fiecărei părți constitutive ale plantei determină detașarea fibrei de partea lemnoasă. Mișcarea de îndoire alternantă se realizează sub un unghi de minim 90 de grade, astfel la o singură trecere prin dispozitivul de decortificare se obțin două produse distincte unul dintre ele fiind puzderia de cânepă așa cum este prezentată în figura 3.2.



Figura 3.2 Puzderia de cânepă – tocătura lemnoasă

În urma recoltării și prelucrării unei culturi de cânepă industrială, soiul Ratza Secuieni specific obținerii de biomasă, de pe o suprafață de 1000 m² recoltată în zona de sud-est a României, în luna septembrie 2021, cantitățile de produse obținute au fost:

- 70 kg - seminte utilizate pentru suplimente alimentare, creșterea animalelor;
- 243 kg - fibre ce pot fi utilizate în industria textilă, auto, construcții, materiale compozite;
- 650 kg – tocătură lemnoasă folosită la obținerea betonului ecologic pe bază de cânepă.

3.2.2 Cânepa - agregat vegetal. Proprietăți fizice, chimice și caracteristici dimensionale

Betonul ecologic pe bază de cânepă este un sistem dispers, eterogen format din faza majoritară dispersantă (mediul de dispersie) reprezentată de matricea de liant mineral aerian și hidraulic și apă și faza minoritară dispersă (particulele solide de cânepă). Partea lemnoasă a

tijelor reprezintă agregatul vegetal din componența betonului ecologic. Caracteristicile materiei prime de bază sunt date de compoziția specifică plantelor tehnice caracterizate de un conținut mare în celuloză, fibre textile lungi, densitate aparentă redusă și porozitate ridicată. Studiile [51] au evidențiat că valoarea coeficientului de conductivitate termică al acestui agregat vegetal este de aproximativ 0,04 W/mK, iar densitatea aparentă medie este de 100-110 kg/m³ cu variații date de fracțiile granulometrice din masa totală. Porozitatea se ridică la un procent de 95% de unde și caracterul de izolator natural dar în același timp puternic higrofil, care determină capacități de absorbție de până la de 4-4,5 ori masa inițială uscată a cânepii.

3.2.3 Caracterizarea agregatului vegetal – lemnul tocat de cânepă

Dimensiunea și forma particulelor influențează proprietățile fizice și mecanice ale materialelor de construcție obținute. Agregatul vegetal prezentat în figura 3.3 reprezintă faza dispersă a betonului de cânepă. Se identifică dimensiuni medii și mari cu aspect exterior alungit și aplatizat cu forma conturului cu muchii teșite și ascuțite și suprafețe rugoase.



Figura 3.3 Agregate vegetale din lemn de cânepă tocat

În figura 3.4 sunt prezentate segmente din tulpini de cânepă preluate de la baza solului unde tulpina este plină la interior până la o înălțime de aproximativ 1/3 din înălțimea totală a tijei. Segmentele de tulpină cu gol interior se regăsesc la partea superioară a tijelor pe o înălțime de două treimi din lungimea totală a tulpinilor. Se prezintă asemeni unor tuburi la care se evidențiază variații ale grosimii pereților. Grosimea peretelui scade pe măsură ce segmentele extrase se apropie de vârful tulpinilor



Figura 3.4 Segmente de tijă de cânepă: 1-tulpină plină, 2- tulpină cu gol interior

În figura 3.5, este evidențiată secțiunea transversală a unui segment de tulpină cu gol interior longitudinal. Se observă o suprafață inelară, neregulată, cu variații dimensionale ale grosimii inelului, cu rugozitate pronunțată. De asemenea se observă pe circumferința secțiunii 4 caneluri opuse diametral în zona cărora grosimea inelului scade cu aproximativ 30%. Luând

În calcul abaterile dimensionale de la circularitate se poate aproxima ca formă echivalentă un pătrat.

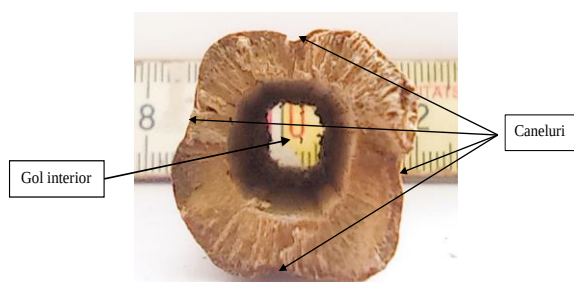


Figura 3.5 Secțiune transversală a unei tulpini de cânepă cu gol interior

În figura 3.6 se prezintă forma geometrică echivalentă a secțiunii și forțele care acționează asupra tulpinii producând ruperea secțiunii inelare în patru sferturi. Datorită formei naturale a tulpinilor și a utilizării dispozitivelor de decortificare cu valțuri cu profil variabil se obține creșterea suprafeței de contact între agregat și matricea de liant. Se observă că axele de desplicare sunt generate de poziția canelurilor pe circumferința secțiunii inelare.

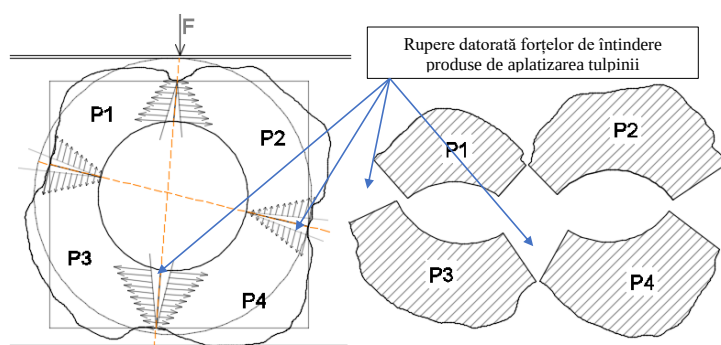


Figura 3.6 Secțiune transversală – desplicarea tulpinii

În urma procesului mecanic de înlăturare a fibrei textile de pe tulpina de cânepă se diferențiază particule care prezintă trei tipuri de suprafețe:

- o suprafață mare, mai puțin rugoasă;
- o suprafață mai mică transversală caracterizată de un grad mare de rugozitate și
- o suprafață convexă dată de golul interior al tulpinii echivalent unui sfert de cilindru a cărui rugozitate este în funcție de creșterea și dezvoltarea naturală a plantei.

3.3 Lianți aerieni - varul calcic hidratat

Oxidul de calciu sau varul nestins, este elementul component al matricei de liant și reprezintă faza disperantă a betonului de cânepă. Acest liant aerian se obține prin procesul de descompunere termică sau calcinare, în timpul căruia calcarul, (calcitul), este încălzit până la o temperatură de cel puțin 750°C, de unde începe eliberarea de dioxid de carbon. Temperatura în cuptor este menținută în jurul valorii de 930°C care favorizează descompunerea termică și eliberarea de dioxid de carbon. Calcarul este o rocă naturală sedimentară, o formă a carbonatului de calciu, compusă din minerale calcaroase.

3.3.1 Rolul varului calcic hidratat în compoziția betonului pe bază de cânepă

Utilizarea varului calcic hidratat sub formă de pasta de var (hidroxid de calciu) în compoziția betonului ecologic pe bază de cânepă este impusă și condiționată din punct de

vedere tehnologic, economic și sustenabil. Astfel, utilizarea varului asigură mineralizarea agregatelor vegetale (tocătura lemnoasă de cânepă) evitând riscul apariției fungilor și a mucegaiurilor prin eliminarea riscului de stagnare a umidității în structura peretelui. În acest caz mortarul de var și apă introdus în procesul de construcție a elementului din beton de cânepă funcționează ca un transportor de umiditate între granulele de cânepă. Fără acest liant mineral aerian umiditatea stagnează în interiorul porilor din cânepă.

Utilizarea varului în structura betonului de cânepă asigură protecție la foc, astfel nefiind necesară utilizarea unor soluții complementare. Este un desicant mai eficient decât silicagelul, un antifungic natural și o barieră sigură în calea insectelor.

3.4 Lianți hidraulici

Lianții anorganici care în urma hidratării particulelor cu apă produc o reacție ireversibilă se numesc lianți hidraulici. Spre deosebire de lianții minerali aerieni, cum este cazul varului calcic hidratat, lianții hidraulici formează legături chimice și se întăresc în prezența apei. Această caracteristică recomandă utilizarea lor în medii susceptibile la umezeală. Din punct de vedere al materiei prime utilizate și a tehnologiei de producere se diferențiază: lianți hidraulici naturali și lianți hidraulici care dobândesc proprietăți hidraulice în urma unor activatori adăugați în procent de 5-85 % din masa lăntului precum zgura granulată de furnal, cenușa de termocentrală și tuful vulcanic măcinat. Diferențierea majoră între tipurile de lianți hidraulici este dată de rezistența la compresiune la 28 de zile. În cazul varului hidraulic natural clasa maximă de rezistență este de 5 N/mm² în timp ce, pentru cimentul Portland, rezistența la compresiune ajunge să depășească valoarea de 52,5 N/mm².

3.4.1.1 Rolul varului hidraulic în compoziția betonului de cânepă

Utilizarea varului hidraulic natural pentru obținerea betonului ecologic pe bază de cânepă prezintă următoarele avantaje:

- caracterul hidraulic al liantului conferă stabilitate la umiditate;
- rezistența la compresiune permite obținerea de materiale de construcție autoportante cum este cazul blocurilor de zidărie sau a pereților turnați monolit;
- poate fi utilizat ca liant doar varul hidraulic fără a mai fi necesară adăugarea de var hidratat;
- utilizarea varului hidraulic și a varului hidratat în părți de masă egale permite optimizarea proprietăților termo-mecanice ale betonului de cânepă și, în același timp, economie de materie primă și reducerea degajărilor de CO₂;
- culoarea naturală permite obținerea de finisaje cu aspect natural și elimină necesitatea utilizării de coloranți;
- timpul de priză permite efectuarea lucrărilor și gestionarea etapelor de lucru astfel încât materialul să poată fi pus în operă fără pierderi de material proaspăt;
- densitatea redusă facilitează utilizarea materialului pentru elemente de construcții ușoare;
- porozitatea ridicată asigură obținerea de coeficienți de conductivitate redusă ceea ce reprezintă un element de asigurare a eficienței energetice;

- faptul că este produs în cuptoare la temperaturi mai reduse decât cele pentru obținerea cimentului, contribuie la reducerea consumurilor de energie iar în combinație cu cânepa la asigurarea absorbției de CO₂ din atmosferă prin procesul de recarbonatare.

3.4.1.2 Rolul cimentului Portland în compoziția betonului de cânepă

Utilizarea cimentului Portland în compoziția betonului ecologic pe bază de cânepă [99] permite obținerea de rezistențe la compresiune și rezistențe la întindere cu valori superioare față de elementele la care au fost utilizate doar lianți aerieni sau lianți hidraulici naturali. Datorită rezistențelor minime inițiale ridicate se pot realiza turnări monolite ale compoziției de beton de cânepă cu rol de umplutură în structuri de pereți de tipul cofrajelor pierdute.

Amestecul de var hidratat și ciment conduce la reducerea coeficientului de conductivitate termică, ca urmare a reducerii volumului de liant doar la cantitatea necesară obținerii acoperirii agregatelor, spațiul dintre agregate fiind ocupat de un volum de aer mai mare sau mai mic funcție de gradul de compactare al piesei turnate. Utilizarea cimentului permite reducerea cantității de apă necesară la hidratarea liantului ce are ca efect îmbunătățirea valorilor pentru rezistența la compresiune. În același timp reducerea cantității de apă de amestec reduce și gradul de compactare, elementele turnate având proprietăți termice și fono-absorbante ridicate. Utilizarea cimentului Portland permite reducerea consumului de var hidratat contribuind la creșterea eficienței energetice a construcțiilor ca urmare a creșterii gradului de izolare termică a materialelor de construcție.

3.5 Aditivi utilizați în compoziția betonului ecologic pe bază de cânepă

3.5.1 Silicatul de sodiu

Metasilicatul de sodiu Na₂SiO₃ este o substanță anorganică. Se regăsește și sub denumirea de apă de sticlă. Materia primă utilizată pentru obținerea silicatlui de sodiu este dioxidul de siliciu prezent în minerale ca nisipul sau cuarțul. Prin topirea siliciului prezent în materia primă amestecată cu carbonat de sodiu se obține o soluție apoasă în care sunt prezente diferite tipuri de silicați, având compoziția chimică variabilă funcție de proporția între sodiu și silice.

Se utilizează cu rol de aditiv pentru impermeabilizarea betonului prin adăugarea în apa de amestec în proporție de 3-5%, la hidroizolația elementelor de beton aflate în medii umede, tratarea suprafețelor de beton și a mortarelor ce necesită protecție la foc, este liant pentru mortare refractare, aditiv pentru mortare rezistente la acizi. Mai poate fi utilizat ca soluție pentru desprăfuire suprafețelor din beton pentru facilitarea aderenței, ca impregnant pentru lemn cu rol în creșterea rezistenței la foc, insecte, fungi prin imersarea, pulverizarea sau aplicarea cu pensula a unei soluții de silicat de sodiu și apă de concentrație 40%.

După aplicarea unei strat de silicat de sodiu acesta se deshidratează formând o peliculă opacă întărită, cu rezistență moderată la acțiunea apei. În construcții, apa de sticlă este folosită pentru sigilarea porilor din elementele de construcții, pentru reparații și restaurări de patrimoniu.

3.5.1.1 Rolul silicatlui de sodiu în compoziția betonului de cânepă

Utilizarea silicatlui de sodiu în compozițiile de beton [90] ecologic pe bază de cânepă prezintă următoarele avantaje:

- facilitează întărirea betonului și obținerea de rezistențe inițiale mai mari la vârste timpurii;
- acționează ca un plastifiant reducând necesarul de apă de amestec;
- impermeabilizează matricea de liant cu efect în creșterea gradului de izolare termică și de rezistență la umezeală, a elementelor de construcție;
- poate fi utilizat ca agent de curățare pentru agregatele vegetale de cânepă realizând desprăfuirea și asigurând aderența liantului la suprafața agregatelor de cânepă;
- reduce consumul de ciment Portland, var hidraulic natural sau var calcic hidratat;
- se utilizează ca tratament pentru mineralizarea agregatelor vegetale de cânepă.

3.5.2 Hidroxidul de sodiu

Hidroxidul de sodiu este o bază anorganică cu formula chimică NaOH. Se mai numește și sodă caustică sau leșie. Este format dintr-un anion hidroxid și un cation de sodiu având forma de agregare solidă. Este puternic higroscopic, are culoare albă translucidă și se comercializează sub formă de fulgi sau peleți. Este utilizat frecvent în soluții pentru curățare și la prepararea săpunului.

3.5.2.1 Rolul hidroxidului de sodiu în compoziția betonului de cânepă

Tratarea agregatelor de cânepă cu soluție de hidroxid de sodiu și apă în concentrație de 5, 10 și 15% [14] a determinat modificarea dimensiunilor, a aspectului și a proprietăților mecanice ale particulelor de cânepă. Acestea au devenit mai elastice și au permis o mai bună compactare a betonului proaspăt, ceea ce a determinat creșterea valorilor rezistenței la compresiune pentru probele analizate, direct proporțional cu creșterea concentrației de NaOH folosite la tratarea agregatelor. Astfel utilizarea hidroxidului de sodiu pentru pretratarea cânepii asigură creșterea densității de la 370 kg/m^3 (în cazul probelor martor netratate) la 810 kg/m^3 (în cazul agregatelor tratate folosind soluție de concentrație 15%). Ca efect a fost observată o îmbunătățire a modului de elasticitate a probelor de la 24 MPa la 135 MPa. Ca efect negativ se remarcă creșterea valorilor pentru coeficientul de conductivitate termică de la $0,0699 \text{ W/mK}$ la $0,2642 \text{ W/mK}$. Importanța utilizării hidroxidului de sodiu ca tratament al agregatului de cânepă, (procedeu tehnologic anterior realizării compoziției și turnării elementelor de construcție), este dată de posibilitatea obținerii unor elemente cu rezistențe mecanice superioare pentru aceeași compoziție de beton. Aceasta înseamnă reduceri de consum pentru cantitățile de liant utilizat și implicit reduceri ale consumurilor de energie și poluare asociată.

Astfel se poate concluziona că utilizarea aditivilor precum silicatul de sodiu și hidroxidul de sodiu la producerea betonului ecologic pe bază de cânepă contribuie la decarbonatarea mediului prin economii de resurse, energie și creșterea performanțelor materialelor de construcție.

3.6 Concluzii

Pentru a identifica resursele locale, este important să se analizeze posibilitățile de obținere a materiilor prime de pe un teritoriu cât mai mic posibil. Reducerea costurilor de transport și a emisiilor de CO_2 trebuie să fie o prioritate și un criteriu de bază în

achiziționarea durabilă a elementelor utilizate în compoziția betonului ecologic pe bază de cânepă.

Valorificarea resurselor locale presupune obținerea de materiale de construcții ale căror proprietăți termo-mecanice sunt optimizate plecând de la proprietățile de bază ale elementelor componente.

Utilizarea aditivilor pentru îmbunătățirea și optimizarea performanțelor materialelor de construcție trebuie să aibă ca scop identificarea acelor compuși chimici care nu afectează mediul. Analiza tehnicilor tradiționale de obținere a lianților minerali aerieni și hidraulici și optimizarea acelor procese prin intervenție minimă susținută de organisme abilitate științific pot eficientiza activitatea mestesugărească având ca rezultat reducerea consumului de materie primă și obținerea de materiale cu performanță superioară.

Colaborarea între știință și tradiție, între specialiști și meșteșugari native din zone bogate în resurse locale pot genera modele funcționale de economie circulară și dezvoltarea de materiale unice calibrate necesităților consumatorilor dintr-un areal cu microclimate specific. Astfel dezvoltarea materialelor de construcție capătă un pronunțat caracter ecologic și natural aliniându-se pe axa sustenabilității dorite de organismele europene asigurând în același timp redresarea și reziliența comunităților locale pentru păstrarea identității naționale și a unității prin diversitate a Uniunii Europene.

Capitolul 4

Cercetări experimentale pentru betonul ecologic pe bază de cânepă

4.1 Obiective propuse

Cercetările prezentate în acest capitol au avut următoarele obiective:

1. Standardizarea tehnologiei de amestec pentru compoziția de beton de cânepă;
2. Determinarea cantității optime de liant raportată la cantitatea de cânepă;
3. Identificarea limitei de separație între compoziția pentru betonul de cânepă cu proprietăți termo-izolatoare și compoziția pentru betonul de cânepă cu rezistență mecanică la compresiune;
4. Determinarea caracteristicilor termice;
5. Determinarea caracteristicilor mecanice.

4.2 Tehnologia de amestec utilizată la obținerea compozițiilor de beton ecologic pe bază de cânepă

Tehnologia de realizare a amestecului [100] recomandată de producătorii de materiale de construcții de beton ecologic pe bază de cânepă este următoarea: peste cânepă se adaugă 1/3 din cantitatea de apă necesară în amestec și se amestecă între 5 și 7 minute până la umezirea și schimbarea culorii cânepii. Se adaugă liantul pe bază de var și se continuă amestecarea aproximativ 2-3 minute. Se adaugă treptat restul de 2/3 din apă și se continuă omogenizarea pentru 3-5 minute. Timpul de pregătire a unei compoziții de beton de cânepă este de aproximativ 10-15 minute. Timpul de punere în operă este de maxim 30 minute de la prepararea amestecului. Pentru determinarea tehnologiei optime de realizare a amestecului astfel încât cantitățile de materiale intrate în compoziție să ofere proprietăți finale superioare s-au identificat 4 variante tehnologice de amestec, care vor fi descrise în continuare.

4.3 Măsurători preliminare în vederea determinării compoziției betonului ecologic pe bază de cânepă

4.3.1 Stabilirea compozițiilor pentru betonul ecologic pe bază de cânepă

Dacă pentru amestecul de liant se folosește var hidratat praf cu densitatea, $\rho = 625 \text{ kg/m}^3$, var hidraulic cu densitatea $\rho = 875 \text{ kg/m}^3$ în proporții volumice 0,6 var hidratat și 0,4 var hidraulic, rezultă că pentru volumul de 200 cm^3 vor fi necesare 75 g var hidratat și 70 g var hidraulic. Rezultă o cantitate de liant de 145 g, iar raportul A/L dintre apă și liant poate varia între 0,45 și 0,7. Dacă se consideră un raport A/L = 0,55 rezultă din calcul că pentru obținerea unui volum de 200 cm^3 de soluție de liant hidratat, pentru amestecul a 55 g de

cânepă, sunt necesare 80 ml apă și 145 g liant. De menționat că la cantitatea de apă folosită pentru hidratarea liantului se mai adaugă și apa necesară pentru preumezirea granulelor de cânepă care este egală cu masa de cânepă din compoziție. Determinarea caracteristicilor termice

4.3.2 Determinarea coeficientului de conductivitate termică

În figura 4.1 este prezentată determinarea prin măsurare a coeficientului de conductivitate termică, realizată după 28 de zile de la turnarea epruvetelor cu ajutorul aparatului ISOMET 2114 [101], care este un sistem portabil pentru măsurarea transferului de căldură.



Figura 4.1 Măsurarea coeficientului de conductivitate termică [17]

4.4 Determinarea caracteristicilor mecanice

4.4.1 Rezistența la întindere prin încovoiere

În figura 4.2 este prezentată încercarea la întindere efectuată după 28 de zile de la turnare conform standardului SR EN 12390-5 [102].

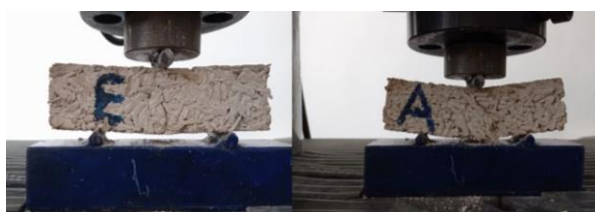


Figura 4.2 Încercarea la întindere prin încovoiere a epruvetelor prismatice [17]

4.4.2 Rezistența la compresiune a epruvetelor prismatice obținute din beton ecologic pe bază de cânepă

Încercarea la compresiune a capetelor epruvetelor prismatice este prezentată în figura 4.3 efectuată conform SR EN 12390-3 [103].



Figura 4.3 Încercarea la compresiune a capetelor de prismă [17]

4.5 Concluzii

Standardizarea tehnologiei de amestec pentru obținerea betonului proaspăt de cânepă depinde de caracteristicile dimensionale ale agregatelor utilizate, de tipul liantului utilizat și de proporția între liant și agregate. Pentru obținerea betoanelor de cânepă cu rol de izolare termică se vor folosi agregate mari în timp ce pentru betoane de șapă, tencuială sau finisaj se vor utiliza agregate de granulozitate mică. Ordinea de introducere în amestec se diferențiază în funcție de raportul între liant și agregate astfel, pentru compozițiile pentru care raportul între masa de cânepă și masa de liant este ≥ 1 , liantul se adaugă în stare prăfoasă, se amestecă după care se adugă prin pulverizare apă. Pentru compozițiile la care raportul între masa de cânepă și masa de liant este < 1 , cantitatea de liant se adaugă preumezită sub formă de soluție de liant și apă necesară în amestec conform raportului optim apă: liant.

Tipul de liant utilizat influențează tehnologia de obținere a amestecului proaspăt după cum urmează: utilizarea oxidului de calciu presupune stingerea în prealabil a masei de var bulgări cu cantitatea de apă necesară, după care se adaugă pasta de liant peste agregatele de cânepă preumezite cu soluție de apă și silicat de sodiu în concentrație de 5%.

În urma încercărilor de laborator s-a constatat că există un prag al raportului între masa de cânepă și masa de liant față de care probele realizate au prezentat unele performanțe mecanice superioare și altele performanțe termo-izolatoare. Acest prag este direct proporțional cu cantitatea de liant necesară pentru acoperirea volumului de aer specific conținut de un volum de cânepă. Aceasta înseamnă că pentru fiecare tip de agregat de cânepă există un volum minim față de care se pot clasifica betoanele de cânepă cu proprietăți mecanice sau cu proprietăți izolatoare, pentru aceasta se determină în prealabil volumul de aer conținut de masa de agregate. Nu doar volumul minim este important dar și proporția masică dintre lianții utilizați deoarece rezistența minimă standard a liantului hidraulic determină utilizarea unei cantități totale de liant mai reduse.

Capitolul 5

Metode de optimizare ale compozițiilor betonului ecologic pe bază de cânepă

5.1 Introducere

Selectarea, din mulțimea de soluții, a acelor soluții pentru care se verifică îndeplinirea criteriului maxim predefinit reprezintă optimizarea performanțelor termo-mecanice ale betonului ecologic pe bază de cânepă. Scopul este reprezentat de obținerea unei metode de calcul prin care să se dimensioneze compozițiile plecând de la performanțele finale pe care trebuie să le aibă materialului compozit conform cerințelor de proiectare. Alegerea valorilor minime sau maxime nu se poate face aleatoriu. Trebuie să existe o condiționare dată de limitele proprietăților fizico-chimice ale elementelor componente intrate în amestec.

Pentru optimizarea performanțelor termo-mecanice ale betonului ecologic pe bază de cânepă, vor fi descrise în acest capitol 3 variante de calcul :

1. Optimizarea compozițiilor cu menținerea constanță a masei totale de liant, $M_{solL-cst}$;
2. Optimizarea compozițiilor la volum constant al soluției de liant, $V_{solL-cst}$;
3. Optimizarea compozițiilor prin metoda proiectării experimentelor DoE [104].

Toate cele 3 metode de calcul al compozițiilor au ca scop obținerea betonului de cânepă cu performanțe termice și mecanice superioare realizând totodată și o economie de resurse materiale, energetice și de timp.

5.2 Optimizarea performanțelor betonului ecologic – metoda masă de liant constantă < $M_{solL-cst}$ >

5.2.1 Trasarea dreptei de variație pentru care masa soluției de liant rămâne constantă

Punctele caracteristice care determină domeniul sunt: $V(159,075;0)$, $V_{min}(0;159,075)$ și $M_{min}(79,54;79,54)$. Pe abscisă vom avea cantitatea de var în kg iar pe ordonată vom avea cantitatea de ciment în kg. Se va trasa pe grafic dreapta determinată de punctele V și M. Prin prelungirea dreptei $[V;M]$ din punctul M până la intersecția ei cu axa Oy se evidențiază pe grafic punctul V_{min} , care reprezintă valoarea minimă a volumului soluției de liant în cazul în care betonul de cânepă ar avea utilizat în compoziție doar liant sub formă de soluție de ciment și apă. Deoarece asta ar însemna înlocuirea totală a masei de var cu 159,075 kg de ciment, iar prin acest lucru, cantitățile și tipurile de lianți utilizați nu ar mai respecta condiția limită de sustenabilitate, punctul V_{min} este trasat pe grafic doar ca referință. În figura 5.1 este prezentat graficul ce descrie legea de variație a proporțiilor de lianți pentru determinarea compozițiilor de beton de cânepă optimizate, cu menținerea constantă a masei soluției de liant.

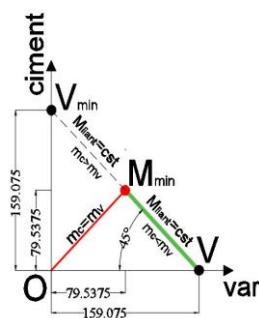


Figura 5.1 Limitele domeniului de optimizare la masa constantă a matricei de liant – trasare dreaptă de optimizare la masă constantă

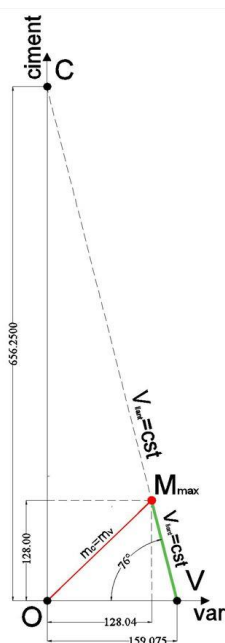
O consecință a metodei de optimizare la masă constantă este variația volumului de liant de la valoarea maximă înregistrată în punctul **V** de 0,525 m³ la o valoare minimă de 0,326114 m³ înregistrată în punctul **M_{min}**. Această consecință determină obținerea de compoziții cu densități care variază de la o valoare maximă în punctul **V** la o valoare minimă în punctul **V_{min}**. În același timp variația proporțiilor dintre lianții utilizați duce la obținerea unor matrice de liant a căror caracteristică hidraulică prezintă tendință de creștere, rezultatul fiind obținerea de compoziții pentru care rezistența la compresiune poate să înregistreze o îmbunătățire a valorilor, pornind din punctul **V** către punctul **V_{min}**. Reducerea volumului de liant are ca efect înregistrarea de valori din ce în ce mai reduse pentru coeficientul de conductivitate termică în sensul de deplasare către punctul **V_{min}** deoarece volumul de aer oclus crește, determinând îmbunătățirea gradului de izolare termică. De remarcat faptul că între dreapta de optimizare la masă constantă, descrisă de punctele **V** și **V_{min}** și axa absciselor va exista un unghi de 45° indiferent de densitatea cânepii, de volumul de aer conținut de agregatele vegetale, sau de masa de oxid de calciu calculată pentru asigurarea volumului maxim al soluției de liant.

5.3 Optimizarea performanțelor betonului ecologic – metoda volum de liant constant <VsolL-cst>

5.3.1 Trasarea dreptei de variație pentru care volumul soluției de liant rămâne constant

Prin unirea punctului **V** cu punctul **M_{max}** se obține dreapta de variație [**V**; **M_{max}**] cu proprietatea că pentru orice punct luat între punctele **V** și **M_{max}** volumul soluției de liant rămâne constant. O consecință a metodei de optimizare la volum constant este variația masei liantului de la valoarea minimă înregistrată în punctul **V** la valoarea maximă înregistrată în punctul **M_{max}**. Această consecință determină obținerea de probe cu densități mai mari în sensul de deplasare de la punctul **V** spre punctul **M_{max}**, determinând valori mai mari pentru rezistența la compresiune, iar ca efect secundar creșterea valorilor pentru coeficientul de conductivitate termică. Punctele caracteristice care determină domeniul de optimizare la volum constant al soluției de liant sunt: **O (0;0)**, **V (159,075;0)** și **C (0;159,07)**. Pe abscisă vom avea cantitatea de var în kg iar pe ordonată vom avea cantitatea de ciment în kg. Se va trasa pe grafic dreapta determinată de punctele **V** și **C**.

În figura 5.2 este prezentat graficul ce descrie legea de variație a proporțiilor de lianți pentru determinarea compozițiilor de beton de cânepă optimizate cu menținerea constantă a volumului soluției de liant.



**Figura 5.2 Limitele domeniului de optimizare la volum constant al matricei de liant – trasare
dreaptă de optimizare la volum constant al soluției de liant**

5.3.2 Încercări de laborator pentru determinarea coeficientului de conductivitate termică - λ

După perioada de întărire, când masa probelor a devenit constantă, s-au realizat măsurători pentru determinarea coeficientului de conductivitate termică al celor 7 tipuri diferite de compoziții. Măsurătorile au fost realizate în condiții de laborator utilizând un dispozitiv portabil (ISOMET 2114). În tabelul 5.1 sunt centralizate rezultatele obținute pentru coeficientul de conductivitate termică. Pentru fiecare probă a fost determinată valoarea medie a coeficientului de conductivitate termică calculat pe baza măsurători efectuate pe cele 4 fețe ale cuburilor, pe direcție paralelă cu direcția de turnare.

**Tabelul 5.1 Valorile coeficientului de conductivitate termică pentru probele optimizate cu
metoda masei constante și a volumului constant**

Metodă optimizare	Compoziție	Coeficient conductivitate termică λ				λ_{mediu}
		m1	m2	m3	m4	
MsolL-cst	V	0,1733	0,1385	0,1639	0,1620	0,1594
	B	0,1352	0,1409	0,1200	0,1547	0,1377
	M _{min}	0,1070	0,1092	0,1256	0,1125	0,1136
	V _{min}	0,1233	0,1146	0,0989	0,0968	0,1084
VsolL-cst	A	0,2327	0,1707	0,1740	0,1733	0,1877
	M _{max}	0,2353	0,1734	0,2064	0,1809	0,1990
	X	0,1548	0,1303	0,1440	0,1351	0,1411

Analizând rezultatele prezentate în tabelul 5.5 se observă că în cazul optimizării la masă constantă a soluției de liant (MsolL-cst) pentru compozițiile V, B, M_{min} și V_{min} variația coeficientului de conductivitate termică se situează ca valoare între 0,1594 și 0,1084 W/mK, în timp ce pentru compozițiile V, A și M_{max} optimizate prin metoda menținerii constante a volumului soluției de liant (VsolL-cst) intervalul limită este între 0,1594 și 0,1990 W/mK.

5.3.3 Încercări de laborator pentru determinarea rezistenței la compresiune

Determinarea rezistenței la compresiune pentru betonul de cânepă întărit s-a realizat pe epruvete cubice conform standardului SR EN 12390-3:2009. Epruvetele cubice cu dimensiunea laturii de 150 mm au fost testate la presa hidraulică după 28 de zile de la turnare. Rezultatele obținute sunt centralizate în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2 Rezistențele la compresiune pentru probele ale căror compoziții au fost optimizate utilizând metoda masă și volum constant

Metodă optimizare	Compoziție	Densitate (kg/m ³)	Forță maximă (kN)	Rezistență la compresiune (MPa)
MsolL-cst	V	494,24	3,12	0,139
	B	466,48	5,48	0,244
	M _{min}	430,32	6,53	0,290
	V _{min}	404,67	7,28	0,324
VsolL-cst	M _{max}	629,88	16,46	0,732
	A	624,40	12,84	0,571
	X	572,70	11,16	0,496
	V	494,24	3,12	0,139

În tabelul 5.2 se observă că variația valorilor rezistenței la compresiune sunt direct proporționale cu densitatea pentru compozițiile **V**, **X**, **A** și **M_{max}** optimizate cu metoda **VsolL-cst**, în timp ce pentru compozițiile **V**, **B**, **M_{min}** și **V_{min}**, optimizate cu metoda **MsolL-cst**, rezistența la compresiune variază invers proporțional cu densitatea. Compozițiile optimizate prin menținerea constantă a masei de liant au beneficiat de îmbunătățirea performanțelor hidraulice ale liantului având în vedere că pe dreapta de variație masa de var a fost redusă treptat și înlocuită cu o masă egală de ciment. Optimizarea performanțelor betonului ecologic pe bază de cânepă – metoda DoE

5.3.4 Optimizarea compozițiilor

După efectuarea analizei statistice a influenței factorilor variabili de intrare asupra proprietăților termo-mecanice ale betonului ecologic pe bază de cânepă urmează determinarea ecuației care descrie legea de variația a proprietăților termo-mecanice finale ale betonului întărit funcție de parametrii de intrare. Validarea rezultatelor experimentale

Validarea rezultatelor experimentale pentru coeficientul de transfer termic (Y_1) și rezistența la compresiune (Y_2) este prezentată în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3 Valorile experimentale obținute pentru Y_1 și Y_2

Compoziția	Var calcic hidratat (g)	Ciment Portland (g)	Apă (g)	Silicat de sodiu (g)	Y_1 (W/mK)	Y_2 (MPa)
1	238	63.35	408	21	0.1131	0.115
2	238	122.31	408	21	0.1121	0.405
3	164	123	219	21	0.1077	0.494
4	164	170	295	11	0.1021	0.635

În tabelul 5.22, valorile previzionate au fost obținute folosind ecuațiile matematice (5.13) și (5.14) obținute prin regresie și validate experimental. Acestea sunt valorile maxime ale caracteristicilor fizico-mecanice cu variații ale parametrilor de la X_1 la X_4 pe suprafețele

CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR TERMO-MECANICE ALE BETONULUI ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ

studiate. Aceste mărimi fac parte din etapa de validare a valorilor prezise numeric prin teste experimentale reale.

Din valorile prezentate în tabelul 5.22 se poate observa că optimizarea performanțelor termo-mecanice ale betonului de cânepă a vizat îmbunătățirea rezistenței mecanice la compresiune și reducerea coeficientului de transfer termic. Proba numărul 4 îndeplinește ambele condiții, având în vedere că pentru o rezistență maximă înregistrată la compresiune de 0,635 MPa, coeficientul de transfer termic obținut este de 0,1021 W/m*K.

Comparând cantitățile de ciment Portland utilizate în cele patru compoziții, se poate observa că acestea cresc de la proba 1 la proba 4, în același timp, cantitatea de var hidratat scade de la proba 1 la proba 4, iar cantitatea de apă utilizată pentru hidratare scade și ea.

Această variație a parametrilor, impusă de metoda DoE, a avut ca rezultat o matrice de liant formată din var hidratat, ciment Portland și soluție de silicat de sodiu, care a legat agregatele de cânepă în punctele de contact, rezultând un beton de cânepă asemănător unei rețele tridimensionale.

În timp ce cantitatea de aer antrenată între particulele de cânepă învelite de matricea de liant a dus la o reducere a coeficientului de transfer termic, compoziția matricei de liant a dezvoltat rezistențe la compresiune crescute. Porozitatea matricei de liant a fost redusă, în schimb, este vorba despre un volum de aer antrenat la nivelul macrosistemului. Astfel, proba obținută cu ajutorul compoziției 4 a dobândit atât proprietăți izolatoare superioare, cât și o rezistență sporită la compresiune.

Utilizarea metodei de proiectare a experimentelor a permis o optimizare parametrică pe un singur criteriu a caracteristicilor fizico-mecanice ale betonului de cânepă, prin obținerea combinației care să satisfacă nevoile utilizatorului pentru fiecare răspuns dorit. Acest lucru nu a putut fi realizat cu metodele clasice prin încercări repetitive pas cu pas. Astfel, proprietățile matematice ale proiectului experimental inițial au pus la dispoziția utilizatorului un instrument de planificare, analiză și optimizare care, printr-un număr relativ mic de încercări experimentale, a oferit informații maxime despre caracteristicile fizico-mecanice ale materialului compozit pe bază de cânepă.

Capitolul 6

Studii de caz pentru elemente de construcții din beton de cânepă

6.1 Introducere

În acest capitol sunt analizate variantele de realizare a diferitelor elemente de construcție precum șapele de egalizare pentru pardoseală, pereții turnați monolit cu rol în compartimentare și anvelopare a clădirilor și obținerea blocurilor de zidărie din beton ecologic pe bază de cânepă. Determinările experimentale au avut ca scop măsurarea densității, a coeficientului de conductivitate termică și rezistența la compresie pentru epruvetele realizate din compoziții specializate pentru fiecare dintre elementele de construcție studiat. Astfel, utilizând ca materie primă partea lemnoasă a tijelor de cânepă, ca liant un mix de var hidratat și ciment Portland, aditivi și apă pentru hidratare și amestec, se obțin prin variația maselor și a proporțiilor elementelor componente, materiale de construcție cu proprietăți termo-izolatoare capabile să răspundă cerintelor de eficiență energetică.

Prin diferențierea compozițiilor s-a avut în vedere optimizarea parametrilor termo-mecanici funcție de rolul materialelor în elementele de construcție. Pentru șapele de egalizare s-au efectuat comparații între variante de șape din beton de cânepă și alte două soluții de șape de egalizare ușoare, termoizolatoare precum șapele din perlit și șapele din argilă expandată.

Pentru realizarea pereților de compartimentare și a anvelopelor clădirilor s-a analizat compoziția de beton de cânepă pentru turnarea în sistem monolit a umpluturii de beton de cânepă neportantă susținută de structura de rezistență sub formă de cofraje pierdute. În ultimul caz s-au determinat proprietățile termo-mecanice ale compoziției de beton de cânepă utilizate pentru obținerea blocurilor de zidărie cu goluri verticale, destinate realizării pereților autoportanți.

6.2 Pardoseli din beton ecologic pe bază de cânepă

6.2.1 Compoziție și tehnologie de execuție

În contextul actualei crize energetice, accentul pe identificarea de soluții eco-sustenabile pentru industria construcțiilor crește semnificativ. Materialele utilizate, tehnologiile de asamblare și forța de muncă sunt principalele costuri care se regăsesc în prețul final al unei construcții noi sau în cazul reabilitării clădirilor vechi. Interesul pentru reducerea costurilor trebuie să fie însoțit în egală măsură de preocuparea pentru reducerea impactului activităților umane asupra ecosistemelor naturale.

O posibilă soluție tehnică pentru realizarea șapelor de egalizare din materiale sustenabile este reprezentată de betonul ecologic pe bază de cânepă. Această soluție prezintă două avantaje principale:

- valorificarea unui produs secundar, residual, catalogat ca deșeu rezultat din activitățile agricole, care imprimă un puternic caracter de economie circulară procesului tehnologic care utilizează materia primă de bază sub formă de tocatură de cânepă;
- posibilitatea eliminării de realizarea a stratului finit al pardoselii, deoarece șapa turnată poate fi șlefuită și tratată corespunzător astfel, încât să poată fi considerată o suprafață finită.

6.2.2 Tehnologia de realizare a amestecului și turnarea epruvetelor

În prima etapă s-a realizat amestecul uscat între nisip, ciment, rumeguș, var hidratat și varul hidraulic după care s-a adăugat cânepa. Se adaugă soluția de apă și silicat de sodiu în concentrație de 5% și se continuă amestecarea până la omogenizarea compoziției. Urmează turnarea în cofraje, nivelarea, compactarea și sclivisirea suprafețelor. Au fost obținute la final, patru mostre de șapă de egalizare cu lungimea de 0,685 m, lățimea de 0,425 m și grosimea de 0,095 m. Volumul fiecărei piese turnate este de 0,0262 m³ iar suprafața de 0,2913 m². Plăcile de șapă astfel realizate sunt prezentate în figura 6.1.

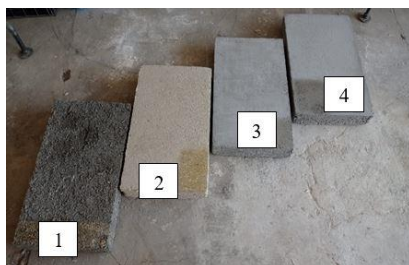


Figura 6.1 Probe de șapă pentru pardoseală : 1 - SBC, 2 - SBC-VHR, 3 - SP, 4 - SAE

Pentru toate probele, s-a efectuat o rectificare mecanică a suprafeței brute cu un disc de hârtie abrazivă de granulație G120 pentru observarea gradul de finisare care poate fi obținut după 6-7 zile de la turnare. Probele au fost cântărite pentru determinarea variației masei. În tabelul 6.1 valorile masei au fost centralizate după 7, 21 și 40 de zile de la turnare.

Tabelul 6.1 Variația masei pe durata maturării

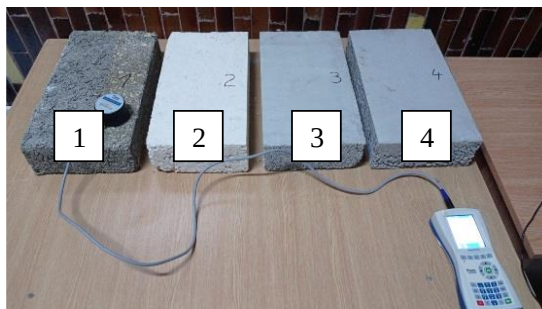
Tipul șapei	U.M.	Masa la turnare	Masa probelor la 7 zile	Masă probelor la 21 zile	Masă probelor după 40 zile	Variația masei %
SP	kg	31,25	29,9	29,4	29,2	6,56 %
SAE	kg	44,74	37,7	37,2	37,0	17,29 %
SBC	kg	31,48	27,7	26,5	26,0	17,41 %
SBC-VHR	kg	34,56	32,5	28,7	27,4	20,72 %

În conformitate cu măsurătorile prezentate în tabelul 6.3, se poate observa că cea mai mare variație de masă a fost înregistrată în cazul epruvetei SBC-VHR. Astfel, după 40 de zile de la turnarea mostrelor de șapă, masa s-a redus cu 20,72%, cantitatea de apă evaporată în timpul procesului de întărire fiind de aproximativ 7,16 litri. Așadar, pentru 1 m³ de material turnat cantitatea de apă evaporată este de aproximativ 273 litri. Diferența până la 330 litri este apă legată chimic la hidratarea cimentului Portland și a varului hidraulic NHL 3,5.

6.2.3 Determinarea coeficientului de conductivitate termică λ

Pentru a determina coeficientul de conductivitate termică, s-au efectuat câte trei măsurători pentru fiecare dintre cele patru epruvete. Măsurătorile au fost efectuate, așa cum

se arată în figura 6.2, cu ajutorul ISOMET 2114 - un dispozitiv portabil pentru măsurarea coeficientului de conductivitate termică a materialelor, fabricat de Applied Precision Ltd, prezentat în figura 6.3.



**Figura 6.2 Măsurarea coeficientului de conductivitate termică
1-SBC, 2-SBC-VHR, 3 -SP și 4 – SAE**



Figura 6.3 Dispozitiv portabil pentru determinarea proprietăților de transfer termic

Cea mai mică valoare pentru coeficientul de conductivitate termică a fost obținută de proba SBC cu o medie de 0,2853 W/mK la o densitate de 992,37 kg/m³. Valori apropiate au fost obținute în cazul probei SBC-VHR cu o medie de 0,3308 W/mK și o densitate de 1030,53 kg/m³. Valori mai mult decât duble au fost măsurate în cazul SAE cu o medie pentru λ de 0,7161 W/mK la o densitate de 1412,21 kg/m³ comparabil cu valorile înregistrate în cazul SP cu o medie pentru λ de 0,6891 W/mK la o densitate de 1114,50 kg/m³. Valorile sunt prezentate în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2 Valori măsurate pentru coeficientul de conductivitate termică

Proba analizată	λ_1	λ_2	λ_3	λ_{mediu}	Densitatea
	(W/mK)				(kg/m ³)
SBC	0,2857	0,2854	0,2848	0,2853	992,37
SBC-VHR	0,3304	0,3309	0,3310	0,3308	1030,53
SP	0,6892	0,6884	0,6897	0,6891	1114,50
SAE	0,7129	0,7181	0,7173	0,7161	1412,21

6.2.4 Determinarea rezistenței la compresiune

Având în vedere că pentru placa experimentală cu compoziția SAE (șapă cu argilă expandată) s-au obținut cele mai mari valori atât pentru densitate cât și pentru coeficientul de conductivitate termică - valori evidențiate în tabelul 6.5 - nu se justifică continuare testelor pentru determinarea rezistenței la compresiune. Densitățile reduse obținute în cazul plăcilor turnate folosind compozițiile SBC și SBC-VHR precum și măsurătorile înregistrate la determinarea coeficientului de conductivitate termică justifică confirmarea încercărilor experimentale pentru determinarea rezistenței la compresiune, pentru a compara și din punct de vedere al proprietăților mecanice cele două compoziții din beton de cânepă cu proba din

șapă perlitică. În figura 6.4 sunt prezentate epruvetele pentru care se vor determina rezistențele la compresiune.



Figura 6.4 Epruvetele testate la compresiune : 1-SBC, 2-SBC-VHR și 3-SP

După măsurarea și determinarea suprafeței de distribuție a efortului, epruvetele au fost testate la presa hidraulică WAW-600E pentru determinarea rezistenței la compresiune. În figura 6.5 sunt prezentată epruvetele SBC, SBC-VHR și SP după finalizarea încercării.

Se observă în cazul epruvetelor cubice turnate din compoziția SBC, apariția deplasării fețelor laterale aflate pe direcție perpendiculară față de direcția de încercare, prin evidențierea detașării de straturi succesive, paralele, care coincid cu straturile adăugate succesiv în timpul turnării. În cazul epruvetelor cubice turnate din compoziția SBC-VHR se observă deplasarea muchiilor verticale în timp ce fețele aflate în contact cu platanele presei hidraulice rămân relativ în perimetrul inițial al epruvetei. Prin comparație, deformările epruvetei SP sunt vizibil mai accentuate, apare dezintegrarea pronunțată a muchiilor laterale și prezența fisurilor continue ce străbat toată grosimea epruvetelor.

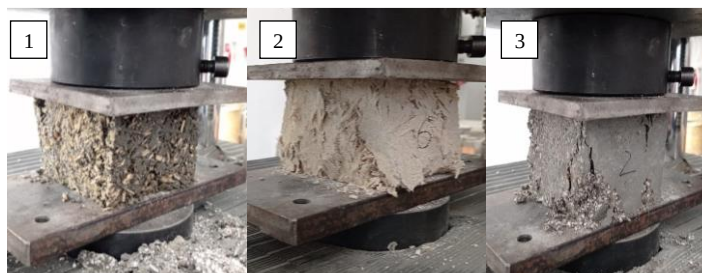


Figura 6.5 Epruvete cubice în timpul testului la compresiune 1-SBC, 2-SBC-VHR și 3-SP

În cazul epruvetelor având compoziția SP (perlit, nisip, ciment), deformarea apare asemeni unor trunchiuri de piramidă cu laturile descrise de înălțimea probei testate și baza formată pe fața platanului superior al presei pe care s-a realizat testarea. Deformarea este pronunțată în zona bazei cu fracturi adânci localizate la o tremie față de colțurile probelor, în timp ce la partea superioară se constată dezintegrarea haotică a cuburilor. În ceea ce privește deformarea epruvetelor SBC-VHR se constată transformarea epruvetei spre forma de clepsidră specifică betoanelor. În figura 6.6 se pot observa epruvetele și diferențele în deformarea lor după realizarea încercării la compresiune.

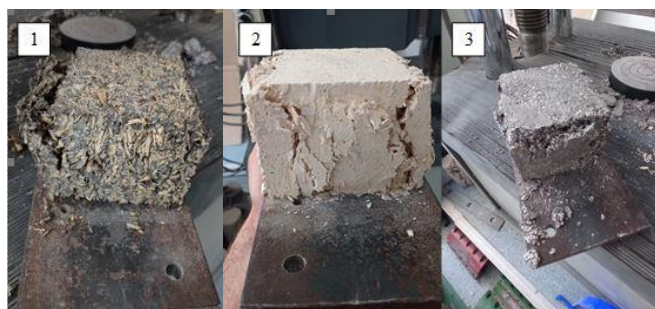


Figura 6.6 Epruvetele cubice după testul de compresiune : 1-SBC, 2-SBC-VHR și 3-SP

CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR TERMO-MECANICE ALE BETONULUI ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ

Epruvetele SP au valori ale rezistenței la compresiune cu 15% mai mici decât epruvetele SBC-VHR deși densitatea epruvetelor SP este cu 7,5% mai mare. Influența agregatelor vegetale din cânepă este favorabilă reducerii densității și îmbunătățirii rezistenței la compresiune.

În figura 6.7 sunt prezentate curbele caracteristice forță deplasare pentru probele SBC, SBC-VHR și SP pentru a evidenția grafic comportarea epruvetelor la solicitarea de compresiune.

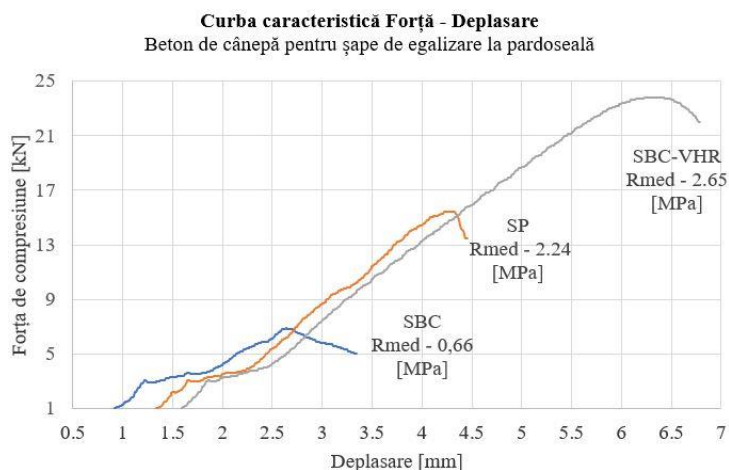


Figura 6.7 Curbe caracteristice pentru SBC, SP și SBC-VHR

Comportamentul mecanic al probelor SBC-VHR supuse solicitării de compresiune, prezintă valori maxime pentru rezistența la compresiune chiar dacă amestecul de liant are o cantitate mai mică de ciment. Acest lucru se poate datora unei omogenități și compactități mai bune a epruvetelor. Reducerea consumului de ciment cu 50 % și înlocuirea a 66,7 % din masa de nisip folosind în schimb același volum de praf de lemn (rumeguș 0 – 4 mm) este importantă ca efect în reducerea consumurilor de energie și a degajărilor de dioxid de carbon în atmosferă.

6.3 Pereți turnați monolit în cofraje pierdute folosind beton pe bază de cânepă

Studiul de caz își propune să justifice necesitatea și oportunitatea cercetării caracteristicilor mecanice și termice pe care le poate avea un material de construcție realizat cu materii prime cum ar fi deșeuri vegetale pentru realizarea elementelor de închidere de tipul pereților exteriori pentru construcții.

6.3.1 Determinarea conductivității termice

Determinarea coeficientului de conductivitate termică a fost realizată prin măsurarea a trei cuburi după 28 de zile de la turnare. Pentru fiecare probă C 1.28, C 2.28 și C 3.28 au fost obținute câte 3 valori ale coeficientului de transfer termic. În figura 6.8 sunt prezentate probele pentru care s-a determinat coeficientul de conductivitate termică la 28 de zile de la turnare.



Figura 6.8 Determinarea experimentală a coeficientului de conductivitate termică [15]

În tabelul 6.3 sunt centralizate valorile obținute pentru conductivitate termică. Se observă dependența între densitate și coeficientul de conductivitate termică. Creșterea densității determină înregistrarea de valori ridicate ale conductivității termice. Valoarea medie obținută se situează sub valoarea de 0,07 W/mK. Conform literaturii de specialitate, în cazul BCA-ului această valoare este de aproximativ 0,12 W/mK. Așadar, folosirea betonului vegetal pe bază de câneapă asigură obținerea unei performanțe termice superioare materialului de construcție din beton celular autoclavizat, pierderea de căldură prin anvelopa construcției putând fi redusă cu aproape 40% pentru aceeași grosime a peretelui.

Tabelul 6.3 Determinarea conductivității termice pentru betonul de câneapă turnat monolit

Proba	Coondutivitatea termică λ (W/mK)	λ_{med} (W/mK)	Masă uscată (kg)	Densitatea (kg/m ³)
C 1.28	0,0728	0,0733	1,053	312
	0,0733			
	0,0739			
C 2.28	0,0690	0,0694	1,009	299
	0,0696			
	0,0697			
C 3.28	0,0647	0,0652	1,000	296
	0,0654			
	0,0655			

6.3.2 Determinarea rezistenței la compresiune

Determinarea rezistenței la compresiune (Fig. 6.9) pentru epruvetelor cubice cu dimensiunea laturii 150 mm a fost efectuată conform standardului SR EN 12390-3 [106] folosind presa hidraulică WAW-600E. Piesele cubice au fost eșantionate în seturi de câte trei bucăți care au fost testate la intervale de 3, 7 și 28 de zile de la turnare. Încercarea experimentală a avut drept scop determinarea rezistenței la compresiune pentru diferite intervale de întărire ale betonului, astfel încât turnarea în cofraje pierdute și ritmul de lucru să fie susținut de capacitate autoportantă pe care o acumulează materialul din momentul turnării și până la decofrare.



Figura 6.9 Test compresiune compoziție pentru turnarea monolită a pereților în cofraje pierdute [15]

Curba caracteristică forță – deplasare (Figura 6.10) evidențiază grafic comportarea probelor la solicitarea de compresiune și diferențele înregistrate de cele 9 piese testate la 3, 7 și 28 de zile de la turnare. Se observă creșterea palierului de elasticitate a probelor.

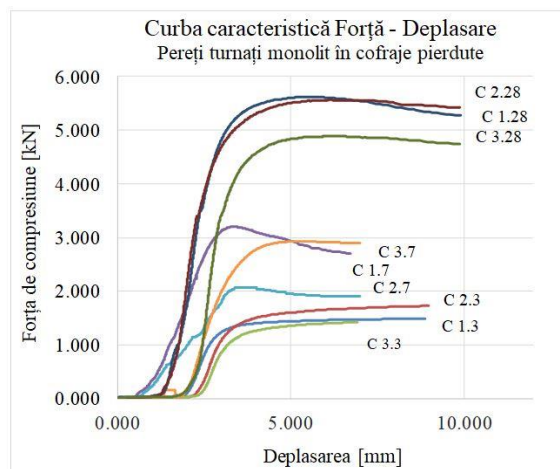


Figura 6.10 Curba caracteristică forță – deplasare pentru rezistența la compresiune

Valoarea medie de 0,238 MPa reprezintă rezistența la compresiune obținută de la cuburile testate la 28 de zile. Valorile sunt comparabile cu cele obținute de Carmeuse Holding S.R.L. la testele efectuate pentru obținerea agrementului tehnic pentru procedeul de realizare a pereților neportanți tip beton de cânepă, și anume între 0,3 și 1,1 MPa cu o densitate între 200 și 500 kg/m³, așa cum reiese din Acordul Tehnic nr. 001SC-02/621-2017 [119]. Alte valori obținute de Paulien Strandberg de Bruijn [120] au fost de 445 kg/m³ pentru densitate și o valoare de 0,4 MPa pentru rezistența la compresiune. În testele realizate de Nadezda Stevulova [121] densitatea probelor a fost de aproximativ 780-790 kg/m³ și o valoare a rezistenței la compresiune de 0,3 MPa. Aceste variații ale valorilor înregistrate, atât pentru densitate cât și pentru rezistența la compresiune au cauze multiple, cum ar fi :

- Materia primă (agregatele vegetale de cânepă) au proprietăți fizico-chimice influențate de caracteristicile morfologice și pedoclimatice ale soiului de plantă și ale zonei în care este cultivată ;
- Tehnologia de prelucrare și obținere a tocăturii lemnoase de cânepă este diferită de la un producător la altul ;
- Tipul de liant utilizat, tehnologia de turnare, gradul de compactare au fost diferite ;
- Silicatul de sodiu nu a fost utilizat în toate testele.

6.3.3 Concluzii

Testele efectuate demonstrează performanțele termice și mecanice ale materialelor de construcție realizate pe bază de cânepă. Importanța continuării testelor derivă din măsurătorile efectuate pentru determinarea rezistenței mecanice la compresiune, a conductivității și a densității materialului, ale căror valori obținute sunt comparabile cu alte materiale de construcție convenționale de pe piață. Cel mai important avantaj este dat de capacitatea de regenerare a materialului și de cantitatea de CO₂ pe care acesta o poate absorbi din atmosferă în timpul ciclului de creștere a cânepii pentru a deveni materie primă în elemente moderne de construcții sustenabile.

6.4 Blocuri de zidărie din beton ecologic pe bază de câneapă

6.4.1 Turnarea blocurilor de zidărie din beton ecologic pe bază de câneapă folosind matrița experimentală

Pentru turnarea blocurilor de zidărie a fost realizată o matriță experimentală (figura 6.11) din tablă de oțel de 5 mm grosime, matrița fiind compusă din 4 elemente:



Figura 6.11 Matrița utilizată pentru turnarea blocurilor de zidărie

- 1 - placa cu tije prismatice de secțiune 30 x 30 mm cu înălțimea de 280 mm folosită pentru realizarea golurilor verticale în volumul blocului de zidărie;
- 2 - placa perforată inferioară cu dimensiunea golurilor de 34 x 34 mm, utilizată pentru calibrarea cutiei de turnare pe placa cu tije,
- 3 - cutia de turnare utilizată pentru obținerea formei blocului de zidărie și a profilului geometric al încrucișării verticale între blocuri și
- 4 - placa perforată superioară cu pini și mânere de prindere pentru compactarea materialului în matrița cu 15 goluri dreptunghiulare cu dimensiunile de 36 x 36 mm, dimensiunile interioare ale matriței sunt: înălțimea de 250 mm, lungimea de 550 mm și lățimea de 215.

Placa cu tije permite obținerea a 15 goluri verticale în volumul blocului de zidărie. Golurile obținute în structura blocului de zidărie au secțiune în plan cu dimensiunea de 30x30 mm iar înălțimea de 250 mm. Golurilor sunt distribuite uniform în interiorul blocurilor de zidărie fiind poziționate vertical pe toată înălțimea elementului. Volumul unui bloc de zidărie obținut este de 0,02475 m³. Utilizarea formei permite obținerea de blocuri de zidărie din beton de câneapă cu goluri verticale cu avantaje pentru :

- Economia de materiale necesare turnării blocului;
- Rezistență mecanică sporită datorită gradului de compactare ridicat;
- Îmbunătățirea proprietăților termoizolatoare;
- Timp redus de maturare și întărire a blocului.

6.4.2 Determinarea coeficientului de conductivitate termică a blocurilor de zidărie din beton ecologic pe bază de câneapă

Pentru a determina coeficientul de transfer de căldură prin conducție, măsurătorile au fost efectuate, așa cum se arată în figura 6.12 și figura 6.13 cu ajutorul ISOMET 2114 - un sistem portabil pentru măsurarea coeficientului de conductivitate termică a materialelor.

S-au efectuat câte șase măsurători pentru fiecare dintre blocuri de zidărie. Au fost realizate câte trei măsurători în zona aflată pe direcția golurilor verticale și câte trei măsurători pentru zona aflată între goluri.

**CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR TERMO-MECANICE
ALE BETONULUI ECOLOGIC PE BAZĂ DE CÂNEPĂ**



Figura 6.12 Măsurarea conductivității termice – între goluri



Figura 6.13 Măsurarea conductivității termice – pe direcția golului

Valorile medii pentru conductivitatea termică măsurată sunt centralizate în tabelul 6.4.

Tabelul 6.4 Determinarea conductivității termice pentru blocurile de zidărie din beton de cânepă

BLOCUL	Coeficient de conductivitate termică λ (W/mK)		λ_{plin} (W/mK)	λ_{gol} (W/mK)	Densitatea aparentă (kg/m ³)
	plin	gol			
BZ-1	0,2215	0,1869	0,2719	0,2560	500.29
BZ-2	0,2845	0,2752			499.65
BZ-3	0,2621	0,2472			499.42
BZ-4	0,2889	0,2963			510.73
BZ-5	0,2601	0,2386			505.64
BZ-6	0,3143	0,2913			538.01

6.4.3 Încercarea la compresiune a blocurilor de zidărie din beton de cânepă

Rezistența la compresiune pe bloc s-a determinat cu relația (6.1).

$$R_b = \frac{F_{max}}{S} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (6.1)$$

Unde: R_c - rezistența la compresiune în Newton pe mm²; F_{max} - Forța maximă înregistrată în kN; S - suprafața de distribuție a forței fiind egală diferența dintre suprafața totală și suprafața golurilor (114014mm²-13500mm²) 100514 mm² sau 0,100514 m².

În figura 6.14 este prezentat un bloc de zidărie în timpul testului de rezistență la compresiune.



Figura 6.14 Bloc de zidărie – test de rezistență la compresiune

După efectuarea încercărilor de solicitare la compresiune, valorile au fost centralizate în tabelul 6.5.

Tabelul 6.5 Centralizarea valorilor rezistenței la compresiune pentru blocurile de zidărie

Bloc zidărie	F_{maxim} (kN)	Suprafața (m²)	R_b (N/mm²)	R_b mediu (N/mm²)
BZ-1	35,2	0,100514	0,3502	0,2683
BZ-2	40,8	0,100514	0,4059	
BZ-3	18,4	0,100514	0,1831	
BZ-4	25,4	0,100514	0,2527	
BZ-5	20,6	0,100514	0,2049	
BZ-6	21,4	0,100514	0,2129	

Valorile obținute pentru rezistența la compresiune a blocurilor de zidărie variază între 0,1831 MPa și 0,4059 MPa. Turnarea manuală poate fi una din cauzele variabilității largi a rezultatelor obținute. Prin automatizarea procesului de turnare se pot îmbunătății și uniformiza proprietățile termo-mecanice ale blocurilor.

6.4.4 Concluzii

Studiile de caz prezentate în acest capitol au demonstrat versatilitatea proprietăților termo-mecanice și aplicabilitatea tehnologică a betonului ecologic pe bază de câneapă deoarece proiectarea compozițiilor face posibilă obținerea de proprietăți dedicate elementului de construcție ce se dorește a fi realizat. Astfel, prin variația proporțiilor masice și volumice ale lianților utilizați față de cantitatea de câneapă intrată în amestec se pot obține compoziții specializate pentru: șape de egalizare, pereți turnați monolit pentru umplerea cu material izolator în structura pereților exteriori și elemente prefabricate de tipul blocurilor de zidărie cu posibilitate de industrializare ca materiale prefabricate.

Tipurile de materiale de construcții dezvoltate utilizând betonul ecologic pe bază de câneapă și analizate în acest capitol au prezentat următoarele avantaje :

- Șapele din beton de câneapă cu adaos de var hidratat și var hidraulic oferă o alternativă la șapele clasice din beton, șapele cu adaos de perlit sau la șapele din argilă expandată deoarece prezintă avantaje superioare din punct de vedere al reducerii pierderilor de căldură și a greutății de ansamblu a structurii de rezistență a clădirii;
- Prin optimizarea proprietăților termo-mecanice, blocurile de zidărie din beton ecologic pe bază de câneapă pot înlocui materiale convenționale consacrate industriei de profil, fiind o alternativă de luat în calcul atunci când se face alegerea între blocuri de zidărie din argilă arsă sau a blocurilor de zidărie din beton celular autoclavizat.
- Materia primă este obținută din resurse regenerabile sub formă de produs secundar al sectorului agricol, iar atât producerea lui cât și a materialelor de construcție este absorbantă de CO₂ ;
- Reciclarea integrală prin reutilizarea tuturor deșeurilor generate la demolarea, extinderea, sau reabilitarea clădirilor construite deoarece betonul de câneapă este adaptabil cerințelor de proiectare iar prelucrarea deșeurilor se face cu energie redusă.
- Elementele de construcție prezentate sunt un model funcțional de economie circulară, eficiente economic și energetic.

Capitolul 7

Cercetări privind evaluarea ciclului de viață pentru betonul ecologic pe bază de cânepă

7.1 Introducere

Evaluarea ciclului de viață (LCA - Life Cycle Assessment) [122], [123], [124], [125], [126] este un instrument de cuantificare a performanței de mediu a produselor, luând în considerare întregul ciclu de viață, începând de la producția de materii prime până la eliminarea finală a produselor, inclusiv reciclarea materialelor.

Pentru cuantificarea impactului performanței de mediu a betonului de cânepă, luând în considerare întregul ciclu de viață, începând de la producția de materii prime până la eliminarea finală a produselor, inclusiv reciclarea materialelor, dacă este necesar, s-a realizat evaluarea ciclului de viață LCA. Analiza impactului de mediu a fost realizată cu programul de calcul SimaPro (versiunea 9.5.0.2) [130] în perioada august 2024. Baza de date utilizată este EcoInvent V3 – limită de alocare pe unitatea de clasificare și conversia datelor EcoInvent 3.9.1 ca procese unitare, cu linkuri către alte procese. Baza de date EcoInvent V3 conține date privind ICV (inventarierea ciclului de viață) din diverse sectoare, cum ar fi producția de energie, transportul, materialele de construcție, producția de substanțe chimice, producția de metale și fructe și legume. Întreaga bază de date constă din peste 20 000 de seturi de date interconectate, fiecare dintre acestea descriind un inventar al ciclului de viață la nivel de proces. SimaPro oferă opt biblioteci care conțin fiecare toate procesele care se găsesc în baza de date EcoInvent, dar utilizează modele de sistem diferite și conțin procese unitare sau de sistem. Modelul de sistem "alocare, conținut reciclat" sau "cut-off" se bazează pe abordarea conform căreia producția primară de materiale este întotdeauna alocată utilizatorului primar al unui material. Dacă un material este reciclat, producătorul primar nu primește niciun credit pentru furnizarea de materiale reciclabile.

Consecința este că materialele reciclabile sunt disponibile fără sarcini pentru procesele de reciclare, iar materialele secundare (reciclate) suportă doar impactul proceselor de reciclare. De asemenea, producătorii de deșeuri nu primesc niciun credit pentru reciclarea sau reutilizarea produselor rezultate din tratarea deșeurilor.

Intervalul de referință pentru evaluarea ciclului de viață al betonului de cânepă este considerată perioada cuprinsă între aprovizionarea cu materii prime și dezafectarea materialului cu reutilizarea lui. Pentru o analiză comparativă și justificarea scenariului cradle-to-grave, în program au fost rulate 2 variante:

- Evaluarea ciclului de viață de la producerea betonului de cânepă și până la sfârșitul perioadei de utilizare Cradle-to-Grave [131] ;

- Evaluarea ciclului de viață de la producerea betonului de cânepă și până la dezafectarea materialului după perioada de utilizare, luând în calcul reciclarea și reutilizarea materiilor prime noi obținute Cradle-to-Cradle [132].

7.1.1 Identificarea scenariului privind ciclul de viață al betonului de cânepă

În cazul betonului ecologic pe bază de cânepă, perioada de analiză a impactului de mediu asupra potențialului de încălzire globală (GWP – Global Warming Potential), s-a realizat prin diferențierea a două scenarii:

• **1 – Cradle-to-Grave** – caracterizat ca sistem Resursă-Produție-Utilizare – având ca perioadă de impact durata de timp cuprinsă între etapa de procurare a materiilor prime utilizate la producerea betonului de cânepă și până la finalizarea duratei de utilizare de 100 de ani; această variantă evidențiază capacitatea de decarbonare ca urmare a absorbției biogenice de CO₂ cumulată cu stocarea cantității cu potențial de poluare prin sechestrarea în structura materialelor de construcție și implicit a clădirilor construite.

• **2 – Cradle-to-Cradle** – caracterizat ca sistem Resursă-Produție-Utilizare-Dezafectare-Reutilizare – pentru care impactul privind GWP este redus la minim ca urmare a reciclării betonului de cânepă după perioada de utilizare de 100 de ani, producerea de materii prime din elementele demolate și reutilizare prin introducerea într-un nou ciclu de viață în sistem de economie circulară în care existența materiei ca deșeu este eliminată; această variantă evidențiază capacitatea de decarbonare a betonului de cânepă în vederea obținerii neutralității climatice.

7.1.2 Bilanțul emisie-captare

Pentru a analiza dacă producerea betonului de cânepă este neutră din punct de vedere al amprente de carbon, s-a ales varianta ciclului de viață cradle-to grave prezentat anterior în figura 7.6. Cantitatea totală de CO_{2-eq} asociată fluxului tehnologic și activităților conexe perioadei de timp cuprinsă între obținerea materiilor prime, producerea betonului de cânepă și până la încheierea perioadei de utilizare de 100 de ani ca material de construcție în structura clădirilor, este de 154 kg CO_{2-eq}. Conform literaturii de specialitate [133] pentru fiecare kg de agregate vegetale de cânepă produse se absorb din atmosferă între 1,67 și 2,46 kg de CO₂. Pentru obținerea unei unități funcționale s-a utilizat conform compoziției prezentate în tabelul 7.2, o cantitate de 55 de kg de tulpini de cânepă tocate. Deoarece reacția de obținere a hidroxidului de calciu este reversibilă, pentru recarbonatarea oxidului de calciu se absorb 0,594 kg de CO₂ pentru fiecare kg de hidroxid de calciu Ca(OH)₂ utilizat. Pentru obținerea unei unități funcționale de produs s-au utilizat în compoziție 40 kg de Ca(OH)₂. Bilanțul a fost calculat cu relația (7.1), unde 2,065 reprezintă valoarea medie a cantității de dioxid de carbon absorbită de 1 kg de cânepă utilizată în compoziție.

$$CO_{2-eq} = 154kgCO_2 - 2,065k \frac{kgCO_2}{kgcânepă} \cdot 55kgcânepă - 40kgciment \cdot 0,594 \frac{kgCO_2}{kgciment} = 16,67 kg \quad (7.1)$$

7.1.3 Concluzii asupra rezultatelor obținute cu SimaPro9

Rezultatele obținute cu ajutorul programului SimaPro 9.5.0.2, utilizat pentru analiza ciclului de viață pentru betonul de cânepă au confirmat avantajele utilizării betonului ecologic pe bază de cânepă, pentru obținerea neutralității climatice. Analiza a contribuit la înțelegerea

impactului pe care îl are utilizarea acestei resurse regenerabile în ceea ce privește potențialul de încălzire global ca aport de CO₂ din surse fosile, din surse biogenice sau din transformarea și ocuparea terenurilor.

Reducerea la minim a amprentei de carbon pe care o poate genera producerea materialelor de construcții din beton de cânepă, are în vedere optimizarea consumurilor de resurse directe, prin proiectarea performanțelor betonului de cânepă ca urmare a cunoașterii influenței elementelor componente asupra variației coeficientului de conductivitate termică și a rezistenței la compresiune, iar indirect prin diminuarea poluării datorate transportului prin adoptarea unui model de economie circulară în care lanțul de producție să poată fi realizat la nivel local.

Reciclarea are un aport semnificativ deoarece poate reduce cu aproximativ 87% amprenta de carbon dacă se dezvoltă capacități de dezafectare și reciclare a elementelor de construcție din beton de cânepă după finalizarea perioadei de utilizare urmând ca un procent de cel puțin 95% din materialele recuperate să fie reutilizate pentru obținerea de materiale eco-sustenabile din beton de cânepă.

7.2 Analiza ciclului de viață realizat prin calcul manual

Deoarece calculul realizat în capitolul 7.2 prin metoda asistată de programul SimaPro9.5.0.2 nu conține în baza de date asociată EcoInvent V3, informații referitoare la impactul de mediu al materiilor prime cu proveniență de pe teritoriul României, în acest subcapitol se vor determina manual cantitățile de CO_{2-eq} asociate proceselor tehnologice de obținere a betonului de cânepă. Această analiză are ca scop justificarea implementării unui model de economie circulară prin care să se utilizeze resurse regenerabile pentru obținerea materiilor prime, producerea de materiale de construcții și utilizarea lor în șantiere aflate în proximitatea unităților de producție pentru susținerea unei dezvoltări locale descentralizate, pe modelul de sistem sustenabil „SURAI” prezentat în capitolul 2.

7.2.1 Bilanțul emisie-captare

Bilanțul CO_{2-eq} rezultat ca diferență între cantitatea emisă în atmosferă și cantitatea absorbită a fost determinată cu relația (7.1) unde 2,065 reprezintă cantitatea de CO₂ absorbită pentru fiecare kg de cânepă utilizată în compoziție iar 0,265 [factori de conversie].

$$\begin{aligned} CO_{2-eq} = & 253,542 \text{ kgCO}_2 + 2,101 \text{ kWh} \cdot 0,265 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}} - 2,065 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg cânepă}} \cdot 110 \text{ kgcânepă} \\ & - 80 \text{ kg CaO} \cdot 0,594 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kg}_{CaO}} = 253,542 + 0,557 - 227,15 - 47,52 = -20,57 \text{ kg} \end{aligned} \quad (7.1)$$

7.3 Concluzii asupra rezultatelor obținute

Amprenta de carbon calculată cu programul SimaPro9.5.0.2 având ca referință baza de date EcoInventV3 este de 16,67 kg de CO_{2-eq}. Amprenta de carbon determinată prin calcul manual în varianta obținerii betonului de cânepă la nivel local utilizând resursele natruale disponibile și limitând emisiile de CO₂ ca urmare a reducerii distanțelor între punctele de aprovizionare cu materii prime și unitatea de producție, este de -20,57 kg de CO_{2-eq}. Aceste valori justifică implementarea unui model de economie circular bazat pe producerea

materialelor de construcție pentru a căror fabricație se utilizează materii prime obținute din resurse sustenabile locale.

Conform analizei LCA [134] realizată pentru o unitate de producție localizată în Belgia, valoarea amprente de carbon pentru producerea blocurile de zidărie din beton de cânepă este de -75,4 kg CO₂-eq. Diferența între valoarea obținută în varianta producerii locale și varianta prezentată în studiul LCA-IsoHemp hempcrete blocks realizat de LIEGE Universite – Chemical Engineering este dată de compoziția betonului de cânepă. În cazul firmei ISOHemp Blocks, utilizarea ca liant a varului hidraulic natural determină absorbția unei cantități suplimentare de CO₂ din atmosferă, conform relației (7.2).

$$CO_{2-eq} = -0,459 \frac{kgCO_2}{kg_{NHL3,5}} \cdot 110kg_{cânepă} = -50,49 kg \quad (7.2)$$

Dacă pentru compoziția de beton de cânepă dezvoltată în cadrul programului de cercetare se înlocuiește cantitatea de ciment Portland cu 110 kg de var hidraulic natural, așa cum se identifică în compoziția betonului de cânepă produs de IsoHemp Belgia, atunci amprenta de carbon pentru betonul de cânepă produs în varianta locală pentru România, ar ajunge la valoarea negativă de -71,06 kg CO₂-eq. Această valoare este comparabilă cu valoarea de -75,4 kg CO₂-eq obținută în urma studiului LCA-ISOHEMP Belgia.

Pentru România însă, consumul de var hidraulic natural nu este economic din punct de vedere financiar. Prin cercetarea și implementarea unei tehnologii care să permit producerea varului hidraulic natural în zone cu resurse disponibile în diferite regiuni ale țării, se pot obține rezultate comparabile ale amprente de carbon produse de fabricarea betonului de cânepă cu valori comparabile cu cele obținute de IsoHemp Blocks din Belgia.

Dacă se ia în calcul dezvoltarea lanțului de producție cu valorificarea materiilor prime rezultate din reciclarea și reutilizarea betonului de cânepă rezultat din demolarea clădirilor, atunci aportul la efortul de obținere a neutralității privind încălzirea globală este semnificativ mai mare. Conform scenariului Cradle-to-cradle prezentat în figura 7.10, reciclarea betonului de cânepă la sfârșitul perioadei de utilizare de 100 de ani are o amprentă de doar 19 kg de CO₂-eq iar bilanțul total înregistrat poate ajunge la valoarea negativă de aproximativ -244,06 kg CO₂-eq ceea ce demonstrează și verifică informațiile din literatura de specialitate [94], [135], [136], [137] conform cărora absorbția de CO₂ echivalentă pentru 1 m³ de beton de cânepă se situează între 251 și 275 kg în timp ce degajarea de CO₂ integrată activităților de construire este cuprinsă între 35 și 46 kg. Astfel bilanțul negativ înregistrat este de aproximativ 205 – 229 kg CO₂-eq absorbit din atmosferă pentru fiecare metru cub de beton de cânepă pus în operă într-o construcție.

Capitolul 8

Concluzii generale. Contribuții personale. Valorificarea rezultatelor. Direcții viitoare de cercetare

8.1 Concluzii generale

Tema de cercetare abordată este în concordanță cu preocupările la nivel internațional privind reducerea încălzirii globale.

Capitolul 2 prezintă importanța contribuțiilor în domeniul optimizării performanțelor termo-mecanice ale betonului de cânepă prin justificarea rolului crucial pe care cânepa industrială îl joacă în atingerea obiectivelor Pactului Verde European, care vizează neutralitatea climatică până în 2050 și reducerea emisiilor de CO₂ cu 55% până în 2030. Printre avantajele acestei culturi se numără capacitatea sa de a stoca cantități mari de carbon, un hectar de cânepă absorbind între 9 și 22 tone de CO₂ în 100-145 de zile. Aceasta absoarbe și stochează CO₂ atât în perioada de creștere, cât și în produsele finite, cum ar fi materialele de construcție, unde contribuie la un bilanț negativ al emisiilor de CO₂. Cânepa ajută, de asemenea, la reducerea eroziunii solului, contribuie la biodiversitate, nu necesită pesticide și reduce costurile de producție.

În Uniunea Europeană, suprafața cultivată cu cânepă pentru fibră a crescut semnificativ între 2015 și 2022, totalizând o creștere de 62,4%, cu Franța având cea mai mare pondere a producției. Industria textilă, industria alimentară și de furaje, materialele de construcție și producția de hârtie sunt principalele domenii care beneficiază de cânepă. Cânepa este utilizată pentru textile, alimente, materiale de construcție ecologice și hârtie, fiind o alternativă sustenabilă și eficientă din punct de vedere al emisiilor de CO₂. Producerea la nivel local a materiei prime prin dezvoltarea unor lanțuri de producție cu valorificarea integrală a produselor derivate din cultura de cânepă pot crește nivelul de reziliență și de obținere a neutralității climatice locale prin adoptarea modelelor de sustenabilitate SURAI dezvoltate

Capitolul 3 sintetizează elementele componente ale betonului de cânepă și importanța identificării resurselor locale sustenabile. Analiza posibilitățile de obținere a materiilor prime de pe un teritoriu cât mai mic posibil permite dezvoltarea unor modele de economii circulare cu efect real de decarbonatare. Reducerea costurilor de transport și emisiilor de CO₂ trebuie să fie o prioritate și un criteriu de bază în achiziționarea durabilă a elementelor utilizate în compoziția betonului ecologic pe bază de cânepă.

Valorificarea resurselor locale presupune obținerea de materiale de construcții ale căror proprietăți termo-mecanice sunt optimizate plecând de la proprietățile de bază ale elementelor componente. Utilizarea aditivilor pentru îmbunătățirea și optimizarea performanțelor materialelor de construcție trebuie să aibă ca scop identificarea acelor compuși chimici care nu afectează mediul. Analiza tehnicilor tradiționale de obținere a lianților minerali aerieni și

hidraulici și optimizarea acelor procese prin intervenție minimă susținută de organismele abilitate științific pot eficientiza activitatea mestesugărească având ca rezultat reducerea consumului de materie primă și obținerea de materiale cu performanță superioară. Colaborarea între știință și tradiție, între specialiști și meșteșugari nativi din zone bogate în resurse locale pot genera modele funcționale de economie circulară și dezvoltarea de materiale unice calibrate necesităților consumatorilor dintr-un areal cu microclimat specific. Astfel dezvoltarea materialelor de construcție capătă un pronunțat caracter ecologic și natural aliniându-se pe axa sustenabilității dorite de organismele europene asigurând în același timp redresarea și reziliența comunităților locale pentru păstrarea identității naționale și a unității prin diversitate a Uniunii Europene.

În **Capitolul 4** efectuarea determinărilor experimentale pentru betonul ecologic pe bază de cânepă au dus la obținerea rezultatelor precum:

- standardizarea tehnologiei de amestec pentru compoziția de beton de cânepă;
- determinarea cantității optime de liant raportată la cantitatea de cânepă;
- identificarea limitei de separație între compoziția pentru betonul de cânepă cu proprietăți termo-izolatoare și compoziția pentru betonul de cânepă cu rezistență mecanică la compresiune;
- determinarea caracteristicilor termice și mecanice.

Standardizarea tehnologiei de amestec pentru obținerea betonului proaspăt de cânepă depinde de caracteristicile dimensionale ale agregatelor utilizate, de tipul liantului utilizat și de proporția între liant și agregate. Pentru obținerea betoanelor de cânepă cu rol de izolare termică se vor folosi agregate mari în timp ce pentru betoane de șapă, tencuială sau finisaj se vor utiliza agregate de granulozitate mică.

Din punct de vedere al testelor realizate pentru determinarea coeficientului de conductivitate termică se remarcă valorile de 0,06 W/mK la densitate medie de 340-360 kg/m³. În ceea ce privește rezistența la compresiune s-au înregistrat valori maxime de 0,825 MPa și rezistența maximă la rupere de 0,072 MPa pentru compozițiile care au avut o densitate medie de 540-570 kg/m³.

Expunerea pe termen lung la umiditate nu conferă un efect pozitiv asupra proprietăților mecanice ale materialului, deoarece materialul este atât de fragil încât nu poate fi tăiat la dimensiunile cerute pentru testul proprietăților mecanice. Acest fenomen este similar cu observația conform căreia materialele din beton de cânepă produse, au arătat o rezistență mecanică mai slabă la interior și au avut învelișul exterior mai puternic. Explicația ar putea fi una dintre următoarele afirmații: materialul intern nu primește suficient schimb de aer, astfel că nu există posibilitatea recarbonatării varului. Și în cazul pieselor la care s-a folosit ca aditiv silicatul de sodiu a fost observat același fenomen slăbiciunea nucleului interior al materialului, care a fost atribuită recarbonatării insuficiente și conținutului scăzut de apă, este cel mai probabil vina compușilor organici polizaharidici care sunt emiși în reacția dintre puzderia de cânepă și lianții alcalini.

Deoarece lianții pe bază de gips creează un mediu mai puțin alcalin și au o rezistență timpurie ridicată, retarderii organici de legare a zahărului nu afectează în mod semnificativ acești lianți. În prezența unei umidități suplimentare, puzderia de cânepă elimină substanțe organice care interferează cu întărirea liantului. Datorită naturii sale higroscopice, puzderia de cânepă absoarbe apă din liant, reducând astfel din cantitatea de apă necesară pentru hidratarea liantului.

Motivul principal care influențează întărirea liantului de var este interferența compoziției chimice – formată din pectine și alți compuși organici care sunt emise în reacția dintre părțile organice ale puzderiei de cânepă și mediul alcalin reprezentat de liantul de var.

Materia lemnoasă de cânepă fiind o polizaharidă din punct de vedere chimic, ea joacă rol de întârziator al reacției de hidratare și întărire a varului și cimentului iar în cazul lianților NHL (var hidrolic natural) aceste polizaharide opresc definitiv procesul de legare chimică a apei.

Asupra acestui fenomen un rol important îl are cantitatea totală de liant folosită în ceea ce privește ponderea de liant în masa de puzderie. Astfel, matricea de liant joacă rolul unui strat de difuzie după ce liantul începe să se usuce reușind să transporte apa conținută în particulele de puzderie aflate în interior. Fenomenul descris de cercetătorii de mai sus este întâlnit mai cu seamă la acele piese la care conținutul de liant este mic raportat la cantitatea de puzderie folosită.

În baza acestor concluzii, în **Capitolul 5** se prezintă variante de optimizare a compozițiilor de beton de cânepă. Pentru rezolvarea problemelor de optimizare au fost identificate 2 scenarii: cantitatea de liant utilizată să fie suficientă pentru obținerea rezistenței mecanice dar ceea ce a fost suplimentar să aducă efecte negative asupra coeficientului de conductivitate termică sau, cantitatea de liant să fie prea puțină și atunci, chiar dacă se obține un grad ridicat al coeficientului de izolare termică, utilizarea liantului fiind sub o anumită limită, rezistența mecanică este nesemnificativă iar materialul nu poate să-și mențină forma, stabilitatea etc. ceea ce înseamnă că utilizarea cantității de liant este inutilă.

Conform determinărilor experimentale realizate pe probele obținute pe baza compozițiilor generate de graficul de optimizare bazat pe metoda de calcul, sau obținut validări privind performanțele termo-mecanice ale epruvetelor testate, confirmându-se astfel optimizarea valorilor de răspuns privind reducerea coeficientului de conductivitate termică și creșterea rezistenței la compresiune. Modificarea proporțiilor amestecului de liant s-a supus legilor de variație descrise de metoda de optimizare la masă constantă de liant și la volum constant de liant. Astfel, înlocuirea treptată a masei de var utilizată în compoziția **V** și adăugarea de ciment fără a depăși masa de var determinată de punctele critice **M_{min}** și **M_{max}** a demonstrat capacitatea de reducere a coeficientul de conductivitate termică până la valori cuprinse între 0,1136 W/mK și 0,1990 W/mK iar pentru rezistența la compresiune valori cuprinse între 0,290 MPa și 0,732 MPa. De remarcat faptul că cele două metode de optimizare se aplică diferențiat funcție de caracteristicile materiilor prime și de performanțele dorite a fi obținute. Metoda de calcul dezvoltată este o inovare în ceea ce privește obținerea de materiale de construcție performante.

Importanța metodelor de optimizare enunțate, rezidă din necesitatea obținerii de materiale de construcție ale căror caracteristici să determine performanțe energetice superioare în construcțiile pentru care au fost dimensionate. Aceste materiale trebuie să răspundă în același timp cerințelor de sustenabilitate, privind utilizarea resurselor minerale, vegetale și energetice pentru prelucrarea materiilor prime, precum și a tehnologiilor utilizate în procesul de fabricație al betonului ecologic pe bază de cânepă. Testele realizate au demonstrat că metodele de optimizare utilizate au dus la obținerea unui model matematic de calcul pentru determinarea cantităților minime și maxime de lianti utilizați, raportați la cantitatea de cânepă din amestec, astfel încât consumul de materii prime să se facă rațional,

obținând în același timp performanțe maxime în limitele caracteristicilor agregatului vegetal și ale proprietăților hidraulice ale lianților. Faptul că, determinarea cantităților de lianți este dependentă de valoarea densității aparente a agregatelor vegetale de cânepă utilizate, iar mărimea agregatelor influențează densitatea și implicit volumul de aer conținut între agregate, este necesară clasificare agregatelor și a metodelor de optimizare, în scopul utilizării anumitor tipuri de agregate pentru obținerea de materiale de construcții cu destinații specializate, funcție de rolul elementului pe care îl îndeplinește în ansamblul clădirii. De exemplu, dacă se dorește obținerea stratului de izolare termică din componența pereților exterior, se utilizează agregate de cânepă cu densitate aparentă mică, iar compoziția de beton se optimizează prin metoda MsolL-cst, ceea ce asigură reducerea volumului soluției de liant și creșterea volumului de aer oclus, astfel încât să se obțină valori reduse pentru coeficientul de conductivitate termică și o rezistență la compresiune, în limitele minime admisibile materialelor autoportante. Dacă se dorește obținerea stratului de tencuială pentru protecția peretilor din beton de cânepă, se vor utiliza agregate cu granulozitate mică, pentru care înregistrează valori crescute ale densității aparente, iar compoziția de beton se optimizează prin metoda VsolL-cst, ceea ce asigură obținerea unor rezistențe la compresiune ridicate, la volume reduse ale soluțiilor de lianți utilizați, determinând o economie pentru materiile prime utilizate.

Metoda avansată de proiectare a experimentului a ajutat la ierarhizarea parametrilor analizați pentru a studia influența acestora asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale betonului de cânepă. Coeficientul de transfer termic este influențat în mare măsură atât de ciment, cât și de apă și de interacțiunea acestora. Acest lucru înseamnă că apa liberă din compoziție este importantă pentru obținerea unei porozități ridicate a betonului de cânepă în vederea reducerii conductivității termice. Rezistența la compresiune este influențată semnificativ doar de ciment și de interacțiunea ciment-apă. Pentru a obține o rezistență mai bună la compresiune este obligatorie utilizarea apei doar pentru hidratarea cimentului. În final, studiul arată că, în timp ce masă este influențată de ciment, var și silicat, densitatea este dependentă de toți parametrii studiați.

Rezultatele validării au demonstrat utilitatea metodei avansate DoE în optimizarea performanțelor fizice și mecanice ale betonului de cânepă. S-au obținut îmbunătățiri ale rezistenței la compresiune de până la 0,635 MPa și o reducere a coeficientului de transfer termic de până la 0,1021 W/mK, demonstrând că metoda utilizată poate oferi un instrument capabil să optimizeze performanța betonului ecologic pe bază de cânepă în funcție de cerințele temei de proiectare.

Metoda de optimizare DoE se bazează pe cunoașterea în prealabil a limitelor minime și maxime ale variabilelor de intrare (var, ciment, apă, silicat de sodiu) care sunt determinate prin aplicarea metodei de calcul pentru optimizarea performanțelor termo-mecanice ale betonului de cânepă la masă constantă a soluției de liant și la volum constant al soluției de liant. Avantajul metodei DoE este că aduce posibilitatea de a genera compoziții care se află în exteriorul curbelor de variație a proprietăților generate de optimizarea la masă și volum constant de liant. În timp ce pentru metoda DoE se poate analiza mărimea răspunsului generat de oricare combinație cuprinsă în domeniul studiat, pentru metodele de optimizare la masă și volum constant de liant, optimizarea se află pe o dreaptă constrânsă de legea de variație a mărimilor parametrilor de intrare în concordanță cu limitele impuse de condițiile de sustenabilitate. Metode sunt utile, ele completându-se în scopul obținerii unui material

innovator, performant și sustenabil, capabil să ofere o soluție la criza energetică actuală și la limitarea efectelor încălzirii globale.

Cu toate acestea, avantajele aplicării metodelor MsolLcst și VsolLcst pentru optimizarea performanțelor termo-mecanice ale betonului ecologic pe bază de cânepă sunt superioare metodei DoE deoarece se pot obține materiale de construcție optimizate prin metode accesibile care nu necesită instrumente și programe specializate de calcul ceea ce din punct de vedere cantitativ permite facilitarea accesului către materiale eco-sustenabile iar din punct de vedere calitativ optimizarea are loc prin diferențierea criteriilor de optimizarea ceea ce determină performanțe superioare specializate de izolare termică sau de rezistență mecanică, materialele obținute fiind proiectate și dedicate rolului pentru care au fost create.

În **Capitolul 6**, au fost obținute rezultate privind performanțele pe care compoziția de beton de cânepă utilizată la realizarea șapei din beton de cânepă cu var hidratat, var hidraulic și rumeguș (SBC-VHR). Pentru proba SBC-VHR, coeficientul de transfer termic este la limita materialelor termoizolante cu o valoare puțin peste $0,3 \text{ W/mK}$, cu posibilități reale de optimizare a comportamentului de izolator termic și ținând cont de faptul că are o bună rezistență mecanică și poate fi finisată astfel încât se poate reduce numărul etapelor de lucru și necesarul de materiale pentru industria construcțiilor, se poate concluziona că șapa de egalizare din beton de cânepă cu amestec de liant obținut din var hidraulic natural, var hidratat și rumeguș, poate fi o alternativă viabilă la șapa de egalizare standard din nisip și ciment. Avantajele utilizării betonului de cânepă pentru șapele de egalizare fiind concretizate prin reducerea încărcării asupra structurii de rezistență ca urmare a scăderii masei specific; reducerea cantității de ciment și implicit a emisiilor de CO_2 în atmosferă; creșterea gradului de izolare termică și fonică cu rol în eficiența termică a construcțiilor și îmbunătățirea gradului de confort interior. Obținerea blocurilor de zidărie cu valori pentru coeficientul de conductivitate termică mediu pe bloc de $0,2661 \text{ W/mK}$ și rezistența la compresiune de $0,2683 \text{ MPa}$ a fost posibilă cu ajutorul unei matrițe experimentale cu un număr de 15 goluri verticale. Această matriță a stat la baza solicitării cereri nr. **a 2024 00041 / 9.02.2024** pentru obținerea unui brevet de invenție pentru ***Procedeu de realizare a unui element de construcție din beton ecologic și matriță pentru realizarea elementului***. Cu ajutorul matriței pot fi produse blocuri de zidărie modulare din beton de cânepă cu posibilitatea de obținere a pieselor speciale de tipul îmbinărilor în colț, a îmbinărilor curente în câmp sau a îmbinărilor de ramificație de tip „T”. Mărimea golurilor verticale și dispunerea lor permite realizarea ulterioară a unei armări suplimentare cu ajutorul barelor de armare din fibră de sticlă și a mortarului de zidărie termo-izolant. Blocurile de zidărie pot fi tesute prin simpla răsturnare ce permite decalarea rostului pe verticală între două rânduri de zidărie. Greutatea redusă, ușurința montajului dată de caracterul intuitiv al formei și eficiența termică, rezumă inovarea în materie de materiale de construcție sustenabile.

Testele efectuate pe tot parcursul capitolului prezintă rezultatele obținute ca urmare cercetărilor ce au avut ca scop diversificarea tipurilor de materiale de construcție ecologice. Aceste rezultate demonstrează performanțele termice și mecanice ale materialelor de construcție realizate pe bază de cânepă. Importanța continuării testelor derivă din măsurătorile efectuate pentru determinarea rezistenței mecanice la compresiune, a conductivității și a densității materialului, ale căror valori obținute sunt comparabile cu alte materiale de construcție convenționale de pe piață. Cel mai important avantaj este dat de

capacitatea de regenerare a materialului și de cantitatea de CO₂ pe care acesta o poate absorbi din atmosferă în timpul ciclului de creștere a cânepii pentru a deveni materie primă în elemente moderne de construcții sustenabile.

În **Capitolul 7**, rezultatele obținute cu ajutorul programului SimaPro 9.5.0.2, utilizat pentru analiza ciclului de viață pentru betonul de cânepă au confirmat avantajele utilizării betonului ecologic pe bază de cânepă, pentru obținerea neutralității climatice. Analiza a contribuit la înțelegerea impactului pe care îl are utilizarea acestei resurse regenerabile în ceea ce privește potențialul de încălzire global ca aport de CO₂ din surse fosile, din surse biogenice sau din transformarea și ocuparea terenurilor.

Reducerea la minim a amprente de carbon pe care o poate genera producerea materialelor de construcții din beton de cânepă, are în vedere optimizarea consumurilor de resurse directe, prin proiectarea performanțelor betonului de cânepă ca urmare a cunoașterii influenței elementelor componente asupra variației coeficientului de conductivitate termică și a rezistenței la compresiune, iar indirect prin diminuarea poluării datorate transportului prin adoptarea unui model de economie circulară în care lanțul de producție să poată fi realizat la nivel local.

Reciclarea are un aport semnificativ deoarece poate reduce cu aproximativ 87% amprenta de carbon dacă se dezvoltă capacități de dezafectare și reciclare a elementelor de construcție din beton de cânepă după finalizarea perioadei de utilizare urmând ca un procent de cel puțin 95% din materialele recuperate să fie reutilizate pentru obținerea de materiale eco-sustenabile din beton de cânepă.

Dacă pentru compoziția de beton de cânepă dezvoltată în cadrul programului de cercetare se înlocuiește cantitatea de ciment Portland cu 110 kg de var hidrolic natural, așa cum se identifică în compoziția betonului de cânepă produs de IsoHemp Belgia, atunci amprenta de carbon pentru betonul de cânepă produs în varianta locală pentru România, ar ajunge la valoarea negativă de -71,06 kg CO₂-eq. Această valoare este comparabilă cu valoarea de -75,4 kg CO₂-eq obținută în urma studiului LCA-ISOHEMP Belgia.

Pentru România însă, consumul de var hidrolic natural nu este economic din punct de vedere financiar. Prin cercetarea și implementarea unei tehnologii care să permit producerea varului hidrolic natural în zone cu resurse disponibile în diferite regiuni ale țării, se pot obține rezultate comparabile ale amprente de carbon produse de fabricarea betonului de cânepă cu valori comparabile cu cele obținute de IsoHemp Blocks din Belgia.

8.2 Contribuții personale

1. Îmbunătățirea proprietăților fizico-mecanice ale betonului de cânepă prin tratarea agregatelor vegetale cu soluție de hidroxid de sodiu. Determinările experimentale au reliefat că utilizarea soluțiilor de hidroxid de sodiu în concentrații de 5%, 10% și 15% pentru pretratarea agregatelor vegetale de cânepă determină modificări ale elasticității acestora, ceea ce permite o compactare mai eficientă a compozițiilor de beton eco-sustenabile, direct proporțională cu concentrația de NaOH. Tratatamentul fibrelor de cânepă a îmbunătățit proprietățile de rezistență mecanică ale probelor cilindrice.

2. Analiza statistică a studiilor preliminare pentru betonul din cânepă, cu scopul de a obține raportul optim între liant și așchiile de cânepă. Aceasta este crucială pentru a defini punctul de inflexiune între materiale izolante și materiale cu rezistență mecanică

îmbunătățită, cu scopul de a obține raportul optim între liant și agregatele vegetale de cânepă. Determinările experimentale realizate pe 6 tipuri diferite de compoziții de beton de cânepă au demonstrat că volumul de soluție de liant necesară pentru acoperirea volumului de aer conținut de o masă de agregate de cânepă conținute de un recipient, este valoarea de referință pentru diferențierea materialelor izolatoare de cele cu rezistențe mecanice îmbunătățite.

3. Investigarea influenței elementelor componente ale betonului de cânepă cu scopul de a cuantifica efectul combinat sau unitar al variației cantităților de materii prime prin analiza varianței obținută sub forma graficelor tip Pareto. În urma studiului s-a demonstrat că cea mai mare influență este dată de cantitatea de ciment utilizată urmată de influența proporției între varul hidratat și ciment și proporția de apă de amestec.

4. Inovarea, descrierea și validarea metodelor de optimizare la masă constantă de liant și la volum constant al soluției de liant care a dus la obținerea unei metode de calcul capabilă să realizeze optimizare în concordanță cu proprietățile native ale agregatelor vegetale de cânepă. În urma analizei a 7 compoziții diferite s-au demonstrat ipotezele conform cărora metoda de calcul se aplică diferențiat funcție de densitatea agregatelor vegetale. Obținerea variației invers proporționale între densitate și rezistența la compresiune sau densitate și coeficientul de conductivitate termică a concluzionat că reducerea volumului de liant cumulată cu creșterea caracteristicilor hidraulice a liantului pot optimiza proprietățile termo-mecanice ajungând la valori pentru care betonul de cânepă poate fi admis ca material de construcție autoportant. Cu un coeficient de conductivitate termică de 0,1084 W/mK, o rezistență la compresiune de 0,324 MPa și la o densitate de 404,67 kg/m³, compoziția obținută în baza metodei de calcul la masă constantă de liant a permis optimizarea performanțelor ca urmare a reducerii volumului de liant cu 30% față de volumul de aer specific conținut de tipul agregatului utilizat.

5. Propunerea și conceptualizarea unui model de sistem sustenabil care să ofere o imagine clară asupra soluțiilor posibile pentru reducerea efectelor modificărilor climatice prin adoptarea unor moduri de viață socială și economică definite ca sisteme unitare regenerative autonome și independente (SURAI) capabile să funcționeze astfel încât activitățile desfășurate să aibă o amprentă cel puțin neutră de carbon sau să desfășoare acțiuni de compensare capabile să elimine efectele generării de CO₂. Sistemul sustenabil se bazează pe identificarea resurselor locale și crearea de economii circulare care să valorifice integral materii prime strategice. Modelul de sistem sustenabil propus are aplicabilitate în dezvoltarea industriei materialelor de construcție eco-sustenabile cum este cazul betonului de cânepă.

6. Analiza procesului de obținerea a oxidului de calciu în cuptoare de var cu lemne ca rezervă strategică de reziliență și conservare a tradiției cu scopul de a îmbunătăți randamentul procesului de fabricație, ocuparea forței de muncă și dezvoltarea unui model de economie bazată pe resurse locale capabile să genereze creștere economică și refacerea circuitului biogenic al degajărilor și al absorbțiilor de CO₂.

7. Dezvoltarea a 3 compoziții de beton de cânepă utilizate pentru obținerea: șapelor de egalizare pentru pardoseală, pereților turnați monolit cu structura de rezistență de tipul cofrajelor pierdute și a blocurilor de zidărie autoportante cu goluri verticale.

8. Crearea unei matrice și a unui procedeu de obținere a elementelor de construcție tip blocuri de zidărie eficiente energetic, modulare din beton de cânepă, care fac obiectul unei cereri de brevet.

9. Analiza ciclului de viață al betonului de cânepă și demonstrarea neutralității climatice a activităților de obținere a materialelor de construcție pe bază de agregate vegetale de cânepă. Evaluarea pentru betonul ecologic pe bază de cânepă, a impactului de mediu asupra potențialului de încălzire globală (GWP – Global Warming Potential), cu aplicația SimaPro 9.5, diferențiat în două scenarii:

- **1** – Cradle-to-Grave – caracterizat ca sistem Resursă-Producție-Utilizare – având ca perioadă de impact durata de timp cuprinsă între etapa de procurare a materiilor prime utilizate la producerea betonului de cânepă și până la finalizarea duratei de utilizare a clădirii de 100 de ani;
- **2** – Cradle-to-Cradle – caracterizat ca sistem Resursă-Producție-Utilizare-Dezafectare-Reutilizare – pentru care impactul privind GWP este redus la minim ca urmare a reciclării betonului de cânepă după perioada de utilizare de 100 de ani.

10. Evaluarea amprente de carbon a betonului ecologic pe bază de cânepă prin calcul manual în scopul evidențierii avantajelor privind obținerea betonului de cânepă la nivel local utilizând resursele naturale disponibile și reducând distanțele între punctele de aprovizionare cu materii prime și unitatea de producție.

11. Realizarea culturilor pentru 3 soiuri diferite de cânepă în scopul obținerii unei materii prime diversificate în ceea ce privește forma și dimensiunea agregatelor vegetale sub formă de tocătură lemnoasă de cânepă utilizată în scopul verificării ipotezelor teoretice propuse în rapoartele de cercetare. Deoarece în România și în U.E. materia primă nu este disponibilă în forme diferite activitatea de cultivare a permis obținerea materiei prime necesară realizării testelor de laborator.

12. Promovarea betonului de cânepă la nivel internațional prin participarea la 5 conferințe internaționale (3 on-line, 2 on-site) și publicarea unui număr de 5 articole științifice.

8.3 Valorificarea rezultatelor

8.3.1 Lucrări publicate în reviste cotate ISI cu factor de impact (3):

1. Adam, L.; Judele, L.; Motrescu, I.; Rusu, I.; Lepadatu, D.; Bucur, R.D.; *Advanced Design for Experimental Optimisation of Physico-Mechanical Characteristics of Sustainable Local Hemp Concrete. Sustainability* **2023**, 15, 8484. <https://doi.org/10.3390/su15118484> (IF=3,8)

2. L. Adam; D.N. Isopescu; D. Lepădatu; Experimental investigation of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes using design of experiment method, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2023** 1283 012001 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1283/1/012001>

3. L. Adam, D.N. Isopescu, S.G. Maxineasa; Improving the mechanical and thermal properties of hemp concrete by treating the hemp hurds with sodium hydroxide solution, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2022** 1242 012001

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/1242/1/012001#:~:text=10.1088/1757%2D899X/1242/1/012001>

8.3.2 Lucrări publicate în reviste indexate în baze de date internaționale (2):

1. Adam, L.; Isopescu, D.-N.; Judele, L.; Bucur, R.D.; Lepădatu, D. *Statistical analysis of preliminary studies for hemp concrete. Journal of Applied Life Sciences and Environment* **2022**, 55 (2), 145-158. <https://doi.org/10.46909/alase-552052>
2. Adam, L.; Isopescu, D.-N.; *Physico-mechanical properties investigation of hempcrete, Journal of Applied Life Sciences and Environment* **2022**, 55(1), 75-84. <https://doi.org/10.46909/alase-551047>

8.3.3 Lucrări prezentate la conferințe naționale sau internaționale (3):

1. XGEN NEXT 100 Internațional Student Scientific Communication Conference, VIIth, May 20-24, 2024, *Hemp Based Ecological Concrete-Calculation Method for Optimising Composition*
2. TRANSILVANIA UNIVERSITY OF BRASOV – FACULTY OF CIVIL ENGINEERING INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE 3th -4th, November 2022 „*Experimental investigation of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes using design of experiment method*”
3. UNIVERSITY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND VETERINARY MEDICINE ION IONESCU DE LA BRAD (UNIVERSITATEA DE ȘTIINȚELE VIEȚII „ION IONESCU DE LA BRAD” IAȘI) – LIFE SCIENCES TODAY FOR TOMORROW INTERNATIONAL CONGRES 20-21 October 2022 „*Statistical analysis of preliminary studies for hemp concrete*”

8.3.4 Lucrări publicate în Buletinul Institutului Politehnic Iași (BIPI):

1. Adam, L.; Isopescu, D.-N.; *Bio-Based Leveling Screed, An Eco-Sustainable Solution for Construction Industry.* (urmează a fi publicată)

8.3.5 Cerere de brevet de invenție

Nr. **a 2024 00041 / 9.02.2024** pentru *Procedeu de realizare a unui element de construcție din beton ecologic și matriță pentru realizarea elementului*, solicitant Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” IAȘI, inventatori Adam Laurențiu, Isopescu Dorina Nicolina

8.4 Direcții viitoare de cercetare

1. Dezvoltarea peretilor din beton vegetal pe bază de cânepă cu rol în acumularea de energie prin reglarea higo-termică a parametrilor aerului ambiental
2. Determinarea compoziției optime prin raportare la echilibrul higo-termo dinamic privind absorbția și desorbția umidității și a schimbului de energie prin transformări de fază
3. Determinarea grosimii optime ca raportare la cantitatea de umiditate și nivelul de energie termică disponibil în aerul ambiental

4. Analiza tehnico-economică a soluției și calibrarea eco-sustenabilă

5. Analiza posibilităților de obținere a varului hidraulic natural prin implementarea unei tehnologii care să permit producerea în cuptoare pe lemne asemeni obținerii oxidului de calciu, având ca scop diversificarea ofertei de materiale de construcție sub forma de lianți aerieni și hidraulici care să asigure susținerea producătorilor tradiționali.

6. Inovarea unui flux tehnologic cu proiectarea unei instalații capabile să recupereze prin evaporare și condensare apa utilizată la hidratarea oxidului de calciu și obținerea amestecului de beton de cânepă.

Bibliografie selectivă

- [1] C. Cazacu, R. Muntean, and D. Taus, "HEMP LIME TECHNOLOGY," vol. 9, 2016.
- [2] R. Fernea, D. L. Manea, L. Plesa, R. Iernuțan, and M. Dumitran, "Acoustic and thermal properties of hemp-cement building materials," *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 208–215, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.204.
- [3] R. Fernea, D. L. Manea, D. R. Tămaș-Gavrea, and I. C. Roșca, "Hemp-clay building materials - An investigation on acoustic, thermal and mechanical properties," *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 216–223, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.205.
- [4] R. Fernea, D. R. Tămaș-Gavrea, D. L. Manea, L. M. Molnar, C. Munteanu, and A.-E. Tiuc, "The influence of the binder and volcanic rocks in natural-organic building materials," *Procedia Manuf.*, vol. 22, pp. 364–371, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.055.
- [5] A. Hegyi, "BIOCOMPOSITES MATERIALS FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION," presented at the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2017, Jun. 2017. doi: 10.5593/sgem2017/62/S26.004.
- [6] B. I. Luca *et al.*, "Eco-concrete for obtaining 'green' construction elements," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1283, no. 1, p. 012007, Jun. 2023, doi: 10.1088/1757-899X/1283/1/012007.
- [7] M. L. Lupu, D. N. Isopescu, I.-R. Baci, S. G. Maxineasa, L. Pruna, and R. Gheorghiu, "Hempcrete - modern solutions for green buildings," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1242, no. 1, p. 012021, Apr. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1242/1/012021.
- [8] A. Marin, M. Butu, V. Dragomir, I. Oncioiu, and I. Dobre, "An overview of hemp for fibre market opportunities for Romania," *Ind. Textila*, vol. 73, no. 04, pp. 432–437, Aug. 2022, doi: 10.35530/IT.073.04.20226.
- [9] A.-T. Mircea and G. Călătan, "Research on clay mixtures for sustainable building materials," 2023.
- [10] L. Păunescu, E. Volceanov, and B.-V. Păunescu, "REINFORCED CONCRETE COMPOSITE WITH VEGETABLE," no. 1.
- [11] A.-M. Preda and E. Öztürk, "USING NATURE AS A SUSTAINABLE SOLUTION FOR RESIDENTIAL COMPLEX DESIGN".
- [12] R. Fernea, D. R. Tămaș-Gavrea, D. L. Manea, and C. Aciu, "Physical and Mechanical Property Characterization of Hemp Shive Reinforced Gypsum Composite Board," *Adv. Eng. Forum*, vol. 21, pp. 262–271, Mar. 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/AEF.21.262.
- [13] L. Adam, D. N. Isopescu, and D. Lepadatu, "Experimental investigation of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes using design of experiment method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1283, no. 1, p. 012001, Jun. 2023, doi: 10.1088/1757-899X/1283/1/012001.
- [14] L. Adam, D. N. Isopescu, and S. G. Maxineasa, "Improving the mechanical and thermal properties of hemp concrete by treating the hemp hurds with sodium hydroxide solution," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1242, no. 1, p. 012001, Apr. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1242/1/012001.
- [15] L. Adam and D.-N. Isopescu, "PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES INVESTIGATION OF HEMPCRETE," *J. Appl. Life Sci. Environ.*, vol. 55, no. 1(189), pp. 75–84, 2022, doi: 10.46909/alse-551047.
- [16] L. Adam, L. Judele, I. Motrescu, I. Rusu, D. Lepadatu, and R. D. Bucur, "Advanced Design for Experimental Optimisation of Physico-Mechanical Characteristics of Sustainable Local Hemp Concrete," *Sustainability*, vol. 15, no. 11, p. 8484, May 2023, doi: 10.3390/su15118484.

- [17] L. Adasm, D.-N. Isopescu, L. Judele, R. D. Bucur, and D. Lepadatu, "STATISTICAL ANALYSIS OF PRELIMINARY STUDIES FOR HEMP CONCRETE," *J. Appl. Life Sci. Environ.*, vol. 55, no. 2 (190), pp. 145–158, Feb. 2023, doi: 10.46909/al-se-552052.
- [18] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, and G. Dotelli, "Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 1051–1061, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.161.
- [19] S. Barbhuiya and B. Bhusan Das, "A comprehensive review on the use of hemp in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 341, p. 127857, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127857.
- [20] Y. J. Bas, I. Kamal, H. Muhsin, C. Najat, and M. Syamand, "Hempcrete a renewable material for green building: Manufacturing and properties optimization," presented at the 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND POWER, ICEP2021, Chiang Mai, Thailand, 2022, p. 020091. doi: 10.1063/5.0108734.
- [21] H. Bedlivá and N. Isaacs, "Hempcrete – An Environmentally Friendly Material?," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1041, pp. 83–86, Oct. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.83.
- [22] F. Bennai, M. Y. Ferroukhi, F. Benmahiddine, R. Belarbi, and A. Nouviaire, "Assessment of hygrothermal performance of hemp concrete compared to conventional building materials at overall building scale," *Constr. Build. Mater.*, vol. 316, p. 126007, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126007.
- [23] F. Collet and S. Pretot, "Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 612–619, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.
- [24] İ. Demir and C. Doğan, "Physical and Mechanical Properties of Hempcrete," *Open Waste Manag. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 26–34, Jul. 2020, doi: 10.2174/1874312902014010026.
- [25] L. Essaghouri, R. Mao, and X. Li, "Environmental benefits of using hempcrete walls in residential construction: An LCA-based comparative case study in Morocco," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 100, p. 107085, May 2023, doi: 10.1016/j.eiar.2023.107085.
- [26] I. Fernández-Plazaola *et al.*, Eds., *Construction and Building Research*, 1st ed. 2014. Dordrecht: Springer Netherlands : Imprint: Springer, 2014. doi: 10.1007/978-94-007-7790-3.
- [27] V. K. G, R. Ramadoss, and R. G.S, "A study report on carbon sequestration by using Hempcrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 6369–6371, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.012.
- [28] S. Geetha and M. Selvakumar, "Properties of Aerated Hempcrete as a potential sustainable Building Material," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 577, no. 1, p. 012074, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/577/1/012074.
- [29] M. D. Heidari, M. Lawrence, P. Blanchet, and B. Amor, "Regionalised Life Cycle Assessment of Bio-Based Materials in Construction; the Case of Hemp Shiv Treated with Sol-Gel Coatings," *Materials*, vol. 12, no. 18, p. 2987, Sep. 2019, doi: 10.3390/ma12182987.
- [30] T. Jami, S. R. Karade, and L. P. Singh, "A review of the properties of hemp concrete for green building applications," *J. Clean. Prod.*, vol. 239, p. 117852, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117852.
- [31] Y. Jiang, A. Hussain, D. M. Heidari, M. Lawrence, and M. Ansell, "Physico-chemical Characterization and Development of Hemp Aggregates for Highly Insulating Construction Building Materials," in *Sustainable Agriculture Reviews 42*, vol. 42, G. Crini and E. Lichtfouse, Eds., in Sustainable Agriculture Reviews, vol. 42. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 147–170. doi: 10.1007/978-3-030-41384-2_5.

- [32] M. Jothilingam and P. Paul, "Study on strength and microstructure of hempcrete," presented at the 7TH NATIONAL CONFERENCE ON HIERARCHICALLY STRUCTURED MATERIALS (NCHSM-2019), Chennai, India, 2019, p. 020028. doi: 10.1063/1.5114608.
- [33] S. D. Kore and J. S. Sudarsan, "Hemp Concrete: A Sustainable Green Material for Conventional Concrete," *J. Build. Mater. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–7, Sep. 2021, doi: 10.30564/jbms.v3i2.3189.
- [34] I. B. Muhit, E. L. Omairey, and V. G. Pashakolaie, "A holistic sustainability overview of hemp as building and highway construction materials," *Build. Environ.*, vol. 256, p. 111470, May 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111470.
- [35] P. Novakova and J. Sal, "Use of technical hemp for concrete - Hempcrete," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 603, no. 5, p. 052095, Sep. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/603/5/052095.
- [36] Y. Shang and F. Tariku, "Hempcrete building performance in mild and cold climates: Integrated analysis of carbon footprint, energy, and indoor thermal and moisture buffering," *Build. Environ.*, vol. 206, p. 108377, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108377.
- [37] F. Stella Mary, G. Nithambigai, and P. M. Rameshwaran, "Effect of binders and hemp fibre in concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 3791–3794, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.029.
- [38] A. Tanta, V. S. Kanwar, and M. Kanwar, "Self-Curing Concrete Made By Using Hemp: A Review," in *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development (ICITCSD – 2021)*, V. S. Kanwar, S. K. Sharma, and C. Prakasam, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 583–594. doi: 10.1007/978-3-030-93936-6_47.
- [39] M. Yadav and A. Saini, "Opportunities & challenges of hempcrete as a building material for construction: An overview," *Mater. Today Proc.*, vol. 65, pp. 2021–2028, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.576.
- [40] "Steve_Allin-International_Hemp_Building_Association-EIHA_2019.pdf."
- [41] R. Walker and S. Pavia, "Influence of the Type of Binder on the Properties of Lime-Hemp Concrete," in *Construction and Building Research*, C. Llinares-Millán, I. Fernández-Plazaola, F. Hidalgo-Delgado, M. M. Martínez-Valenzuela, F. J. Medina-Ramón, I. Oliver-Faubel, I. Rodríguez-Abad, A. Salandin, R. Sánchez-Grandia, and I. Tort-Ausina, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, pp. 505–514. doi: 10.1007/978-94-007-7790-3_61.
- [42] E. Knapen, N. Neelen, I. Claes, B. Vandoren, and B. Janssens, "Thermal performance of real-life in-situ cast lime hemp walls in Flanders," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 588, no. 4, p. 042049, Nov. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/588/4/042049.
- [43] F. Collet and S. Pretot, "Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 612–619, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.
- [44] N. Stevulova, L. Kidalova, J. Cigasova, J. Junak, A. Sicakova, and E. Terpakova, "Lightweight Composites Containing Hemp Hurds," *Procedia Eng.*, vol. 65, pp. 69–74, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.013.
- [45] S. Dartois, S. Mom, H. Dumontet, and A. Ben Hamida, "An iterative micromechanical modeling to estimate the thermal and mechanical properties of polydisperse composites with platy particles: Application to anisotropic hemp and lime concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 661–671, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.181.
- [46] J. Page, M. Sonebi, and S. Amziane, "Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 139, pp. 502–512, May 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.037.

- [47] P. Tronet, T. Lecompte, V. Picandet, and C. Baley, "Study of lime hemp concrete (LHC) – Mix design, casting process and mechanical behaviour," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 67, pp. 60–72, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004.
- [48] N. Asghari and A. M. Memari, "State of the Art Review of Attributes and Mechanical Properties of Hempcrete," *Biomass*, vol. 4, no. 1, pp. 65–91, Feb. 2024, doi: 10.3390/biomass4010004.
- [49] A. Ruus, T. Koosapoeg, M. Pau, T. Kalamees, and M. Põldaru, "Influence of production on hemp concrete hygrothermal properties: sorption, water vapour permeability and water absorption," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2069, no. 1, p. 012004, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2069/1/012004.
- [50] S. Pochwała, D. Makiola, S. Anweiler, and M. Böhm, "The Heat Conductivity Properties of Hemp–Lime Composite Material Used in Single-Family Buildings," *Materials*, vol. 13, no. 4, p. 1011, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13041011.
- [51] F. Delhomme *et al.*, "Physical properties of Australian hurd used as aggregate for hemp concrete," *Mater. Today Commun.*, vol. 24, p. 100986, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.100986.
- [52] R. Fernea, D. L. Manea, L. Plesa, R. Iernuțan, and M. Dumitran, "Acoustic and thermal properties of hemp-cement building materials," *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 208–215, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.204.
- [53] B. Seng, C. Magniont, and S. Lorente, "Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties," *J. Build. Eng.*, vol. 24, p. 100540, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jobte.2018.07.016.
- [54] "Aytac S 2018 An enviromentally friendly plant in terms of oxigen supply: hemp, Proocedigs of ICOEST 4th International conference on environmental science and technology, 19-28 september, Kiev-Ukraine, pp 32-24 https://www.researchgate.net/publication/329328155_An_Environmentally_Friendly_Plant_in_Terms_of_Oxygen_Supply_Hemp."
- [55] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, and G. Dotelli, "Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 1051–1061, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.161.
- [56] A. T. M. F. Ahmed, M. Z. Islam, M. S. Mahmud, M. E. Sarker, and M. R. Islam, "Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review," *Heliyon*, vol. 8, no. 1, p. e08753, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08753.
- [57] C. Ingrao *et al.*, "Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 29–42, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.002.
- [58] C. Magniont, G. Escadeillas, M. Coutand, and C. Oms-Multon, "Use of plant aggregates in building ecomaterials," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 16, no. sup1, pp. s17–s33, Jun. 2012, doi: 10.1080/19648189.2012.682452.
- [59] J. H. Arehart, W. S. Nelson, and W. V. Srubar, "On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 266, p. 121846, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121846.
- [60] T. Jami, S. R. Karade, and L. P. Singh, "A review of the properties of hemp concrete for green building applications," *J. Clean. Prod.*, vol. 239, p. 117852, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117852.
- [61] P. Novakova and J. Sal, "Use of technical hemp for concrete - Hempcrete," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 603, no. 5, p. 052095, Sep. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/603/5/052095.
- [62] "J, K, Kana, Experimental investigation on the physical properties of hemp concrete on addition of low carbon material, Int, Res, J, Eng, Technol, 2020, 7 2360-2364, <https://www.irjet.net/archives/V7/i7/IRJET-V7I7418.pdf>."

- [63] R. T. Nazmul, B.-A. Sainsbury, S. Al-Deen, E. O. Garcez, and M. Ashraf, "An Experimental Evaluation of Hemp as an Internal Curing Agent in Concrete Materials," *Materials*, vol. 16, no. 11, p. 3993, May 2023, doi: 10.3390/ma16113993.
- [64] S. D. Kore and J. S. Sudarsan, "Hemp Concrete: A Sustainable Green Material for Conventional Concrete," *J. Build. Mater. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–7, Sep. 2021, doi: 10.30564/jbms.v3i2.3189.
- [65] H. Bedlivá and N. Isaacs, "Hempcrete – An Environmentally Friendly Material?," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1041, pp. 83–86, Oct. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.83.
- [66] H. Mastouri, H. Bahi, H. Radoine, and B. Benhamou, "Improving energy efficiency in buildings: Review and compiling," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 2999–3003, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.270.
- [67] M. Sinka, D. Bajare, S. Gendelis, and A. Jakovics, "In-situ measurements of hemp-lime insulation materials for energy efficiency improvement," *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 242–248, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.088.
- [68] Y. Shang and F. Tariku, "Hempcrete building performance in mild and cold climates: Integrated analysis of carbon footprint, energy, and indoor thermal and moisture buffering," *Build. Environ.*, vol. 206, p. 108377, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108377.
- [69] C. Maalouf *et al.*, "An energy and carbon footprint assessment upon the usage of hemp-lime concrete and recycled-PET façades for office facilities in France and Italy," *J. Clean. Prod.*, vol. 170, pp. 1640–1653, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.111.
- [70] "Ruth Busbridge, Ranyl Rhydwen; An investigation of the thermal properties of hemp and clay monolithic walls 2010 Advances in Computing and Technology The School of Computing, Information Technology and Engineering, 5th Annual Conference, https://www.researchgate.net/publication/47529650_An_investigation_of_the_thermal_properties_of_hemp_and_clay_monolithic_walls."
- [71] "International Hemp Building Association 2014, <https://internationalhempbuilding.org/>."
- [72] M. Yadav and A. Saini, "Opportunities & challenges of hempcrete as a building material for construction: An overview," *Mater. Today Proc.*, vol. 65, pp. 2021–2028, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.576.
- [73] R. Haik, A. Peled, and I. A. Meir, "The thermal performance of lime hemp concrete (LHC) with alternative binders," *Energy Build.*, vol. 210, p. 109740, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109740.
- [74] P. B. De Bruijn, K.-H. Jeppsson, K. Sandin, and C. Nilsson, "Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres," *Biosyst. Eng.*, vol. 103, no. 4, pp. 474–479, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005.
- [75] E. A. J. Hirst, P. Walker, K. A. Paine, and T. Yates, "Characteristics of low-density hemp-lime building materials," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.*, vol. 165, no. 1, pp. 15–23, Feb. 2012, doi: 10.1680/coma.1000021.
- [76] S. E. Di Capua, L. Paolotti, E. Moretti, L. Rocchi, and A. Boggia, "Evaluation of the Environmental Sustainability of Hemp as a Building Material, through Life Cycle Assessment," *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 1215–1228, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuect-2021-0092.
- [77] "Daly, P.; Ronchetti, P.; Woolley, T. Hemp Lime Bio-Composite as a Building Material 2021 Irish Construction; Environmental Protection Agency: Wexford, Ireland, <https://www.equilibriumbioedilizia.it/sites/default/files/allegati/Hemp%20Lime%20Bio%20composite%20as%20a%20Building%20Material%20in%20Irish%20Construction.pdf>."
- [78] "<https://www.blackpine.co.nz/exterior-products/hempcrete/>."

- [79] "<https://www.ukhempcrete.com/the-hempcrete-book/>."
- [80] G. Balčiūnas, I. Pundienė, L. Lekūnaitė-Lukošiūnė, S. Vėjelis, and A. Korjamins, "Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical–mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material," *Ind. Crops Prod.*, vol. 77, pp. 724–734, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.09.011.
- [81] "IsoHemp pre-cast hempcrete blocks (full pallet - various sizes.)" [Online]. Available: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://naturalbuildingstore.com/wp-content/uploads/2022/10/Isohemp-Hempcrete-blocks-various-thicknesses.jpeg&tbid=3UvqK92zaASD1M&vet=1&imgrefurl=https://naturalbuildingstore.com/shop/iso hemp-pre-cast-hempcrete-blocks/&docid=ekfZaXqfjT5VjM&w=1322&h=1322&itg=1&hl=ro-RO&source=sh/x/im/m5/2&kgs=b10249fae1d8c92a&shem=abme,trie>
- [82] "<https://www.konopie.info.pl/wp-content/uploads/2021/04/3CM-training-1024x538-1-e1617275569839.jpg>."
- [83] "<http://isobioproject.com/results/rigid-insulation-panel-from-hemp/>."
- [84] G. Sahmenko, M. Sinka, E. Namsone, A. Korjamins, and D. Bajare, "Sustainable Wall Solutions Using Foam Concrete and Hemp Composites," *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 917–930, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuect-2021-0069.
- [85] "https://www.linkedin.com/posts/suraj-suryavanshi-bba935146_3dprinting-construction-innovation-activity-7207284340433551362-6iIZ."
- [86] "<https://images.app.goo.gl/AwJu7EnFsE3rrJbo6>."
- [87] L. Arnaud, S. Amziane, V. Nozahic, and E. Gourlay, "Mechanical Behavior," in *Bio-aggregate-based Building Materials*, 1st ed., S. Amziane, L. Arnaud, and N. Challamel, Eds., Wiley, 2013, pp. 153–178. doi: 10.1002/9781118576809.ch5.
- [88] "Bevan, R., Woolley, T., Pritchett, I., Carpenter, R., Walker, P., & Duckett, M. Hemp Lime Construction: a guide to building with hemp lime composites 2008, BRE Press, <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/hemp-lime-construction-a-guide-to-building-with-hemp-lime-composi>."
- [89] M. P. Sáez-Pérez, M. Brümmer, and J. A. Durán-Suárez, "A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes," *J. Build. Eng.*, vol. 31, p. 101323, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101323.
- [90] I. Cavusoglu, E. Yilmaz, and A. O. Yilmaz, "Sodium silicate effect on setting properties, strength behavior and microstructure of cemented coal fly ash backfill," *Powder Technol.*, vol. 384, pp. 17–28, May 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.02.013.
- [91] M. Liu, A. Thygesen, J. Summerscales, and A. S. Meyer, "Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: A review," *Ind. Crops Prod.*, vol. 108, pp. 660–683, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.07.027.
- [92] M. Greco-Coppi, C. Hofmann, J. Ströhle, D. Walter, and B. Epple, "Efficient CO₂ capture from lime production by an indirectly heated carbonate looping process," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 112, p. 103430, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103430.
- [93] K. Ip and A. Miller, "Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 69, pp. 1–9, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.09.001.
- [94] M. Lawrence, E. Fodde, K. Paine, and P. Walker, "Hygrothermal Performance of an Experimental Hemp-Lime Building," *Key Eng. Mater.*, vol. 517, pp. 413–421, Jun. 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.517.413.
- [95] I. Bošković and A. Radivojević, "Life cycle assessment of hemp-lime concrete wall constructions: The impact of wall finish type and renewal regimes," *J. Build. Eng.*, vol. 86, p. 108940, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.108940.
- [96] A. Raihan and T. R. Bijoy, "A review of the industrial use and global sustainability of Cannabis sativa," *Glob. Sustain. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 1–29, Oct. 2023, doi: 10.56556/gssr.v2i4.597.

- [97] J. P. Manaia, A. T. Manaia, and L. Rodrigues, "Industrial Hemp Fibers: An Overview," *Fibers*, vol. 7, no. 12, p. 106, Dec. 2019, doi: 10.3390/fib7120106.
- [98] M. J. Mochane *et al.*, "Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review," *Express Polym. Lett.*, vol. 13, no. 2, pp. 159–198, 2019, doi: 10.3144/expresspolymlett.2019.15.
- [99] N. Asghari and A. M. Memari, "State of the Art Review of Attributes and Mechanical Properties of Hempcrete," *Biomass*, vol. 4, no. 1, pp. 65–91, Feb. 2024, doi: 10.3390/biomass4010004.
- [100] M. Jothilingam and P. Paul, "Study on strength and microstructure of hempcrete," presented at the 7TH NATIONAL CONFERENCE ON HIERARCHICALLY STRUCTURED MATERIALS (NCHSM-2019), Chennai, India, 2019, p. 020028. doi: 10.1063/1.5114608.
- [101] "https://www.appliedp.com/download/manual/isomet2114_ug_en.pdf." [Online]. Available: https://www.appliedp.com/download/manual/isomet2114_ug_en.pdf
- [102] "https://www.scribd.com/document/715625609/39-SR-12390-5-2005-Incerari-pe-beton-intarit-Rezistenta-la-intindere-prin-incovoire." [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/715625609/39-SR-12390-5-2005-Incerari-pe-beton-intarit-Rezistenta-la-intindere-prin-incovoire>.
- [103] S. Scripcă and M. Barbută, "Properties of Microconcrete Produced with Fly Ash and Ultrafine Silica," *Bull. Polytech. Inst. Iași Constr. Archit. Sect.*, vol. 68, no. 1, pp. 39–54, Mar. 2022, doi: 10.2478/bipca-2022-0004.
- [104] S. A. Weissman and N. G. Anderson, "Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications," *Org. Process Res. Dev.*, vol. 19, no. 11, pp. 1605–1633, Nov. 2015, doi: 10.1021/op500169m.
- [105] "https://standardizare.wordpress.com/2013/05/13/sr-en-12390-12002-incercare-pe-beton-intarit-partea-1-forma-dimensiuni-si-alte-conditii-pentru-epruvete-si-tipare/." [Online]. Available: <https://standardizare.wordpress.com/2013/05/13/sr-en-12390-12002-incercare-pe-beton-intarit-partea-1-forma-dimensiuni-si-alte-conditii-pentru-epruvete-si-tipare/>.
- [106] "SR EN 12390-3:2019 Încercare pe beton întărit. Partea 3: Rezistența la compresiune a epruvetelor." [Online]. Available: <https://magazin.asro.ro/ro/standard/272857>
- [107] Y. Abdellatif and M. Kavgić, "Thermal, microstructural and numerical analysis of hempcrete-microencapsulated phase change material composites," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 178, p. 115520, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115520.
- [108] B. Çomak, A. Bideci, and Ö. Salli Bideci, "Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 169, pp. 794–799, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029.
- [109] E. Sassoni, S. Manzi, A. Motori, M. Montecchi, and M. Canti, "Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization," *Energy Build.*, vol. 77, pp. 219–226, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.033.
- [110] M. Sawadogo, F. Benmahiddine, A. E. A. Hamami, R. Belarbi, A. Godin, and M. Duquesne, "Investigation of a novel bio-based phase change material hemp concrete for passive energy storage in buildings," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 212, p. 118620, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118620.
- [111] S. Kristombu Baduge, P. Mendis, R. San Nicolas, K. Nguyen, and A. Hajimohammadi, "Performance of lightweight hemp concrete with alkali-activated cenosphere binders exposed to elevated temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 224, pp. 158–172, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.069.
- [112] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancrét, Y. Scudeller, and L. Goudet, "Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ('hempcrete') manufactured by a projection process," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 10, pp. 2116–2123, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016.
- [113] A. Hussain *et al.*, "Development of novel building composites based on hemp and multi-functional silica matrix," *Compos. Part B Eng.*, vol. 156, pp. 266–273, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.093.

- [114] S. Avudaiappan *et al.*, “Experimental investigation on the physical, microstructural, and mechanical properties of hemp limecrete,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 22650, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-48144-y.
- [115] V. Luiz Caleffo Piva Bigão, B. Ruiz Brandão Da Costa, J. Joaquim Mangabeira Da Silva, B. Spinosa De Martinis, and D. R. Tapia-Blácido, “Use of statistical design of experiments (DoE) in Forensic Analysis: A tailored review,” *Forensic Chem.*, vol. 37, p. 100554, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.forc.2024.100554.
- [116] H. K. Madhusudhana, B. Desai, and C. Venkatesha, “Experimental Investigation on Parameter Effects on Fracture Toughness of Hemp Fiber Reinforced Polymer Composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 20002–20012, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.367.
- [117] “Hand-placing cast on site hempcrete (new build).” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=1hlx5BVYDNQ>
- [118] “Carbon Smart Materials Palette.” [Online]. Available: <https://www.materialspalette.org/hempcrete/>
- [119] “PROCEDEU DE REALIZARE A PEREȚILOR NEPORTANȚI TIP HEMPCRETE Agreement Tehnic 001SC-02/612-2016.” [Online]. Available: https://www.casaverdecanepa.com/wp-content/uploads/2019/05/Agreement_Tehnic-Hempcrete.pdf
- [120] P. De Bruijn and P. Johansson, “Moisture fixation and thermal properties of lime–hemp concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1235–1242, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006.
- [121] N. Stevulova, L. Kidalova, J. Junak, J. Cigasova, and E. Terpakova, “Effect of Hemp Shive Sizes on Mechanical Properties of Lightweight Fibrous Composites,” *Procedia Eng.*, vol. 42, pp. 496–500, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.441.
- [122] A. Tanta and V. S. Kanwar, “Environmental Assessment of Hemp Concrete over Carbon Emissions,” *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 10, no. 6, pp. 65–73, Jun. 2023, doi: 10.14445/23488352/IJCE-V10I6P107.
- [123] L. Zampori, G. Dotelli, and V. Vernelli, “Life Cycle Assessment of Hemp Cultivation and Use of Hemp-Based Thermal Insulator Materials in Buildings,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 13, pp. 7413–7420, Jul. 2013, doi: 10.1021/es401326a.
- [124] E. Campiglia, L. Gobbi, A. Marucci, M. Rapa, R. Ruggieri, and G. Vinci, “Hemp Seed Production: Environmental Impacts of Cannabis sativa L. Agronomic Practices by Life Cycle Assessment (LCA) and Carbon Footprint Methodologies,” *Sustainability*, vol. 12, no. 16, p. 6570, Aug. 2020, doi: 10.3390/su12166570.
- [125] F. Scrucca *et al.*, “Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings,” *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 84, p. 106417, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106417.
- [126] M. Meffo Kemda, M. Marchi, E. Neri, N. Marchettini, and V. Niccolucci, “Environmental impact assessment of hemp cultivation and its seed-based food products,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, p. 1342330, May 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1342330.
- [127] “ISO 14040:2006(en) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
- [128] “ISO 14044:2006/Amd 2:2020 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/76122.html>
- [129] “Office for National Statistics Greenhouse gas emissions and other environment measures, UK and European countries: 2020.” [Online]. Available: <https://www.ons.gov.uk/economy/environmentalaccounts/articles/comparinggreenhousegasemissionsukandeuropeancountries/2020>

- [130] “SimaPro 9.5.” [Online]. Available: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2023/07/FullUpdateInstructionsToSimaPro950.pdf>
- [131] “European Environment Agency - cradle-to-grave assessment.” [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/cradle-to-grave>
- [132] “Sustainability Guide cradle-to-cradle assessment.” [Online]. Available: <https://sustainabilityguide.eu/methods/cradle-to-cradle/>
- [133] “The Role of Industrial Hemp in Carbon Farming Name: James Vosper BSCHons, FRGS, Good Earth Resources PTY Ltd (ABN 79 124 022 859).” [Online]. Available: <https://www.aph.gov.au/documentstore.ashx?id=ae6e9b56-1d34-4ed3-9851-2b3bf0b6eb4f>
- [134] “IsoHemp hempcrete blocks (2018) Project report, Faculte des sciences Appliquees, Chemical Engineering PEPs – Products, Environment, and Processes.” [Online]. Available: <http://chemeng.ulg.ac.be>
- [135] K. Ip and A. Miller, “Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 69, pp. 1–9, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.09.001.
- [136] “Sylvie Prétot, Florence Collet, Charles Garnier. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A HEMP CONCRETE WALL: IMPACT OF THICKNESS AND COATING.. Building and Environment, 2014, 72C, pp.223-231. ff10.1016/j.buildenv.2013.11.010ff. fffhal-00916557f.” [Online]. Available: <https://hal.science/hal-00916557/file/preprint-BAE-Pretot-et-al-2014.pdf>
- [137] Y. Abdellatef, M. A. Khan, A. Khan, M. I. Alam, and M. Kavgic, “Mechanical, Thermal, and Moisture Buffering Properties of Novel Insulating Hemp-Lime Composite Building Materials,” *Materials*, vol. 13, no. 21, p. 5000, Nov. 2020, doi: 10.3390/ma13215000.