

Proiect Erasmus+ 2022-1-NO01-KA220-HED-000087893

Acest proiect Erasmus+ a fost finanțat cu sprijinul Comisiei Europene. Această publicație reflectă numai opiniile autorilor, iar Comisia Europeană și agențiile naționale Erasmus+ nu pot fi considerate responsabile pentru utilizarea informațiilor conținute în aceasta

Proiect de construcție BIM-LCA

Raport de studiu de caz

Betonul geopolimeric: Un beton orientat spre viitor

TEZĂ DE LICENȚĂ

Betonul geopolimeric: Un beton orientat spre viitor

B23B02

15.05.2023

Departamentul de Inginerie - Inginerie civilă

Christian Janshaug

Sindre Andreas Johansen Melgaard

Frederik Toverød

Simon Hauk Vold





Colegiul universitar Ostfold

Departamentul de Inginerie

Raport de teză

Categoria tezei: <i>teza de master</i>
Număr de credite: *0
Domeniul de studiu: <i>Inginerie Civilă - structurală și civilă</i>

Disponibil gratuit



Disponibil în baza unui acord
cu **panterul** colaborator



Titlul raportului: <i>Analiza și proiectarea betonului geopolimer reorientat</i>	Data: 11.01.2023 Numărul de pagini slurl: 13 Numărul de pagini: / GJ Numărul de anexe: 2J Numărul total de pagini din acest teza este: 14/
Autori: <i>Christian Janshaug</i> <i>Simon Hand Told, G</i> <i>Fraferik To'erad</i> <i>Sindre Andrea.s Johansen ñelgaard</i>	Supervisors: 1) <i>Susana Garcia .Sanfeli.</i> 2) <i>Hairik Caer</i> 3) <i>Mariw Birkeland</i>
Departament / Program de studii: <i>Departamentul de inginerie mecanică/inginer civil</i>	Numărul tezei: fi2JfiG2

Desfășurat în colaborare cu: <i>Joine Eieiidom și Selvaag Boliy F.iasmis</i>	Persoana de contact a partenerului de colocrating: <i>Espeii C'hrisii'in Aiidreseii</i>
---	---

Această teză investighează durabilitatea și proprietățile betonului geopolimer autodezvoltat, comparând emisiile sale de CO₂- cu cele ale betonului tradițional. Studiul pune accentul pe betonul geopolimer ca o alternativă sustenabilă, subliniind emisiile sale mai scăzute și proprietățile sale excelente. Această cercetare utilizează modelarea BIM și analiza UA pentru a evalua impactul său asupra mediului și adecvarea pentru aplicațiile prefabricate. În general, studiul contribuie la cunoașterea betonului geopolimeric și promovează conștientizarea emisiilor în industria construcțiilor.

3 cuvinte cheie

Beton Gropolymer
LCA

Prefață

În această prefață, ne propunem să sintetizăm călătoria cuprinzătoare a studiilor noastre de trei ani în domeniul ingineriei civile, din 2020 până în 2023. Pe parcursul acestor trei ani, care au fost plini de entuziasm, provocări și suișuri și coborâșuri intrigante, am dobândit cunoștințe extinse în disciplinele legate de construcții, rezolvarea problemelor și lucrul la proiecte. În general, această călătorie ne-a format și ne-a pregătit în mare măsură ca viitori ingineri civili, oferindu-ne experiențe neprețuite.

Participarea la proiectul pilot BIM-LCA prin atelierul Erasmus+ din Cartagena UPCT a fost o experiență edificatoare, care a servit drept punct de plecare pentru această teză de licență, oferind informații valoroase și pregătind terenul pentru explorări ulterioare.

La început, ne exprimăm recunoștința sinceră față de Susana Garcia Sanfelix pentru asistența sa neprețuită în studiul betonului, al aspectelor chimice și pentru îndrumarea sa pe tot parcursul tezei noastre de licență. Expertiza și sprijinul ei au contribuit foarte mult la creșterea și înțelegerea noastră în aceste domenii.

În plus, ne exprimăm aprecierea sinceră față de Marius Birkeland și Henrik Røer pentru contribuțiile lor semnificative la componenta BIM și subiectul construcțiilor explorate în cadrul acestei teze.

În plus, am dori să ne exprimăm recunoștința față de Espen Andresen și Jotne Eiendom, precum și față de Selvaag Bolig pentru că ne-au oferit o clădire de referință și informații valoroase despre proiectul FMV-Vest.

În cele din urmă, mulțumirile noastre se îndreaptă către Bernt Kristiansen pentru sfaturi valoroase, Mahdi Kioumarsî pentru feedback constructiv, Lars Gunnar Furelid Tellnes pentru aspecte legate de LCA, Rudi Yi Xu cu privire la testul de carbonatare, Rino Nilsen pentru echipamentul de imprimare 3D, Arne Johan Østenby cu privire la configurarea electrică a testului de clorură, Jane Mælen pentru informații valoroase despre elementele prefabricate și Parham Shoaee pentru sprijinul său în procedurile legate de laborator și feedback excelent.

Rezumat

Această teză, intitulată "Beton geopolimer: Un beton orientat spre viitor", abordează obiectivul de a investiga durabilitatea și proprietățile unui beton geopolimer dezvoltat de noi înșine. Studiul implică, de asemenea, o comparație a emisiilor de CO₂ între faza de producție a betonului geopolimer și cea a betonului tradițional, cu scopul de a crește gradul de conștientizare a emisiilor în industria construcțiilor și ingineriei prin aplicarea metodologiilor BIM și LCA.

Teza se concentrează în principal pe geopolimer ca soluție promițătoare pentru o tranziție ecologică în industria construcțiilor și ingineriei. Componentele cheie ale studiului includ modelarea BIM și analiza LCA. Analiza LCA relevă un bilanț CO₂ pozitiv, indicând emisii mai mici pentru betonul geopolimer în comparație cu betonul tradițional, deși evidențiază și un aspect negativ privind consumul de energie.

Testele de laborator extinse efectuate de grup demonstrează că betonul geopolimer prezintă proprietăți excelente, îmbunătățind atât durabilitatea, cât și durata de viață. Ca urmare, se concluzionează că betonul geopolimer este potrivit pentru aplicații prefabricate. Studiul subliniază necesitatea explorării în continuare a potențialelor îmbunătățiri în ceea ce privește standardizarea utilizării betonului netradițional.

În general, această teză contribuie la cunoașterea și înțelegerea betonului geopolimer ca alternativă durabilă, subliniind în același timp importanța conștientizării emisiilor și a promovării practicilor ecologice în industria construcțiilor și ingineriei.

Conținut

Prefață	iii
Rezumat	iv
Conținut	v
Lista de figuri	ix
Listă de tabele	xi
Simboluri	xii
1 Introducere	1
1.1 Enunțarea problemei	2
1.2 Limitări	3
1.3 Metoda de cercetare	4
2 Teorie	5
2.1 Beton tradițional	5
2.1.1 Ciment	6
2.1.2 Procesul de hidratare	7
2.1.3 Aditivi	9
2.1.4 Amestecuri	15
2.1.5 Raportul de masă	16
2.1.6 Agregate	16
2.2 Beton geopolimeric	17
2.2.1 Raportul de masă al GPC, L/GB	17
2.2.2 Geopolimer ca liant	17
2.2.3 Activatori alcalini	22
2.2.4 Condiții de maturare	23
2.2.5 Proprietățile de autovindecare ale GPC	23

2.2.6 GPC în uz astăzi	24
2.3 Teoria legată de metodologie	27
2.3.1 Elaborarea rețetei.....	27
2.3.2 Dimensiunea agregatelor.....	27
2.3.3 Amestecarea și întărirea betonului	28
2.4 Teoria referitoare la procedura de testare.....	28
2.4.1 Conținutul de apă în agregat.....	28
2.4.2 Distribuția dimensiunii particulelor în agregat.....	28
2.4.3 Capacitate termică specifică	28
2.4.4 Calorimetria de conducere izotermă	29
2.4.5 Timpul de setare inițială și finală - VICAT	29
2.4.6 Capacitate de lucru.....	30
2.4.7 Conținutul de aer	32
2.4.8 Densitate	32
2.4.9 Rezistență la compresiune	32
2.4.10 Intruziune de clorură.....	33
2.4.11 Carbonatarea	35
2.5 Durabilitate și consolidare	36
2.5.1 Acoperire din beton.....	37
2.5.2 Armătură minimă.....	39
2.6 BIM, Modelarea informațiilor despre clădiri	40
2.6.1 Utilizatori de BIM	40
2.6.2 Standard BIM.....	40
2.6.3 Revit	40
2.6.4 Beneficii.....	41

2.7 LCA.....	42
2.7.1 Utilizatori de LCA.....	42
2.7.2 Standard LCA	43
2.7.3 SimaPro	43
2.7.4 Beneficii.....	44
2.7.5 GWP - Potențial de încălzire globală	44
3 Cadru	46
4 Metoda.....	48
4.1 Elaborarea rețetei.....	52
4.1.2 Dimensiune agregată.....	53
4.1.3 Amestecarea și întărirea betonului	53
4.2 Proceduri de testare.....	54
4.2.1 Conținutul de apă în agregat.....	54
4.2.2 Distribuția granulometrică a agregatelor	55
4.2.3 Test calorimetric TAM	57
4.2.4 Timpul de întărire inițială și finală a pastei de ciment, VICAT.....	60
4.2.5 Test de slăbire	61
4.2.6 Test de debit de alunecare.....	63
4.2.7 Conținutul de aer	64
4.2.8 Densitate	65
4.2.9 Test de rezistență la compresiune.....	65
4.2.10 Test rapid de permeabilitate la clorură.....	67
4.2.11 Adâncimea de carbonatare	70
5 Rezultate	73
5.1 Geopolimer.....	73

5.2 Utilizarea potențială a betonului geopolimer, analiza BIM.....	80
5.3 Studiu LCA.....	84
5.4 Surse de eroare și discuții.....	91
6 Concluzii.....	92
7. Sugestii pentru activitatea viitoare.....	93
8 Referințe.....	95
9 Anexă.....	106

Listă de figuri

Figura 1: Emisiile globale de CO ₂ pe sectoare (Ali, 2020, p. 12)	1
Figura 2: SEM al CH și C-S-H, amestec 8 (Armentrout & Belkowitz, 2009).....	8
Figura 3: Rezistența la compresiune a mortarului care conține SF (Muwashee & Al-Jameel, 2021)10	
Figura 4: Raportul OPC, rezistența la compresiune cu % FA (Abushad & Sabri, 2017)	12
Figura 5: Imaginea a) prezintă imaginea SEM a particulelor de zgură, în timp ce imaginea b) prezintă imaginea SEM a particulelor de cenușă zburătoare (Verma & Dev, 2021)	21
Figura 6: 1 din cele 33 de panouri GPC prefabricate (WAGNERS, n.red.).....	24
Figura 7: Plan de pavaj/pistă, Aeroportul BWB (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015)	25
Figura 8: Secțiunea transversală de proiectare a pavajului din beton de înaltă rezistență (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015)	25
Figura 9: Instalație cu două loturi de geopolimer (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015)	26
Figura 10: Procesul de hidratare (Wadsö, 2005).....	29
Figura 11: Capacitatea de muncă (Maage, 2015, p. 181).....	30
Figura 12: Mașină de testare la compresiune (EPOXY TILE FLOORING, 2021).....	33
Figura 13: Secțiune transversală a unui stâlp armat (Anre, 2020).....	37
Figura 14: Etapele ciclului de viață al produsului (Evaluarea ciclului de viață, 2020)	42
Figura 15: Principiul de structură al LCA (BNP Media, 2021)	44
Figura 16: Diagrama de flux a dezvoltării GPC.....	51
Figura 17: Betonieră obligatorie de tip ZK 50 HE (Pemat)	53
Figura 18: Aparatul TAM.....	57
Figura 19: Rata vs. amploarea procesului (Wadsö, 2005)	59
Figura 20: Aparat automat de înregistrare Vicatronic Vicat (MATEST, n.red.)	60
Figura 21: Tabelul de testare a alunecării (Mishra, n.red.)	61

Figura 22: Fluxul noroiului în creație	62
Figura 23: Extinderea fluxului (Standard Norge, 2019).....	63

Figura 24: Instrument de măsurare a conținutului de aer, controlul conținutului de aer al betonului proaspăt (Vegdirektoratet, 2014).....	64
Figura 25: Configurarea testului real, RCPT.....	67
Figura 26: Configurarea testului, RCPT (Nordtest, 1999)	67
Figura 27: Ilustrație a măsurării adâncimii de penetrare a clorurilor (Nordtest, 1999)	69
Figura 28: Adâncimea de penetrare a clorurilor începe să devină vizibilă după utilizarea $AgNO_3$	69
Figura 29: Suprafața carbonată	71
Figura 30: Principiul de măsurare a carbonării accelerate, (Atiş, 2003).....	71
Figura 31: Procesul de întărire a GP5.2 și CEMII/A-S 42.5 R.....	77
Figura 32: Fotografie a unei matrițe de oțel standard, care arată modul în care GPC aderă la oțel	79
Figura 33: Fotografie a mulajului din plastic utilizat pentru cilindrii de testare a migrării clorurilor.....	79
Figura 34: Modul de eșec al GP5.2.....	79
Figura 35: Fotografie după demontarea rețelei GP5.2	79
Figura 36: "Modellageret" astăzi.....	80
Figura 37: Imagine de impresie realistă a peretelui modulului	80
Figura 38: Raportul dintre acoperirea cu beton și W/C (Maage, 2015, p. 220).....	81
Figura 39: Secțiune transversală a peretelui modulului	81
Figura 40: Desen conceptual al armăturii.....	82
Figura 41: "Modellageret" cu un perete înlocuit cu un perete cu modul GPC	83
Figura 42: Rețeaua ciclului de viață a betonului CEM-II /A-S 42.5N	87
Figura 43: Rețeaua ciclului de viață GP5.2	88
Figura 44: Consumul de energie.....	89
Figura 45: Emisiile de CO ₂ din LCA	90

Listă de tabele

Tabelul 1: Cele 4 minerale principale ale OPC (Maage, 2015, p. 83)	7
Tabelul 2: Clasa de aditivi (SINTEF, 2010).....	15
Tabelul 3: Compoziția chimică a zgurii și FA.....	19
Tabelul 4: Clase de alunecare (Standard Norge, 2004).....	30
Tabelul 5: Clasele de alunecare-flux (Standard Norge, 2013, p. 28)	31
Tabelul 6: Clase de debit (Standard Norge, 2013, p. 27)	31
Tabelul 7: Factori de modificare privind conversia rezistenței probelor de beton (Institutul de Cercetare în Construcții, n.red.)	32
Tabelul 8: Standarde utilizate	47
Tabelul 9: Rețeta și greutatea reală a GP5.2.....	52
Tabelul 10: Cantitatea minimă de eșantion din granulația superioară	54
Tabelul 11: Cantitatea măsurată de agregate.....	56
Tabelul 12: Valori ale capacității termice	58
Tabelul 13: Tensiunea și durata testului ((Nordtest, 1999).....	68
Tabelul 14: Criterii de clasificare a rezistenței la clorură pentru beton (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, p. 13).....	70
Tabelul 15: Rezultatele GP5.2.....	74
Tabelul 16: Proprietăți întărite	77
Tabelul 17: Adâncimea de carbonatare accelerată (mm) a betonului comparabil (Atiș, 2003)	78
Tabelul 18: Raportul ciment zgură al rețetei comparate (Kopeckó & Balázs, 2017).....	84
Tabelul 19: Rețeta utilizată pentru studiul LCA (Kopeckó & Balázs, 2017).....	85
Tabelul 20: Valori cheie utilizate în studiul LCA	86

Simboluri

Abrevieri

ASR- Reacția alcalin-siliciu

BFS- zgură de furnal

BIM- Modelarea informațiilor despre clădiri

EFC- Beton prietenos cu Pământul

EPD- Declarația de mediu a

produsului FA- Cenușă zburătoare

GGBFS- zgură granulată de furnal

GPC- beton geopolimeric

LCA- Evaluarea ciclului de viață

OPC- Ciment Portland obișnuit

PCR- Reguli privind categoria de produse

SCC- Beton autoconsolidant

SF- Silica Fume

Abrevieri chimice AgNO_3 -

Nitrat de argint

Al- Aluminiu

Al_2O_3 - Oxid de aluminiu

$\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ - Dibenzalacetonă

C2S- Silicat

dicalcic

C3A- Aluminat tricalcic

C3S- Siliciu tricalcic

C4AF	- Aluminoferrit tetracalcic
Ca	- Calciu
Ca(OH) ₂	- Hidroxid de calciu
CaSiO ₃	- Silicat de calciu
CH	- Hidroxid de calciu / Portlandite
CH ₄	- Metan
CO	- Monoxid de carbon
CO ₂	- Dioxid de carbon
Fe	- Fier
H ₂ O	- Apă
K	- Potasiu
K ₂ O	- Oxid de potasiu
K ₂ SiO ₃	- Silicat de potasiu
KOH	- Hidroxid de potasiu
Li	- Litiu
MgO	- Oxid de magneziu
Na	- Sodiu
Na ₂ O	- Oxid de sodiu
Na ₂ SiO ₃	- Silicat de sodiu
NaCl	- Clorură de sodiu
O	- Oxigen
Si	- Siliciu

1 Introducere

Cu fiecare an care trece, clima se schimbă. Măsurătorile au arătat că temperatura crește, ghețarii se topesc, nivelul mărilor crește și există condiții meteorologice extreme mai imprevizibile. Acest lucru se datorează creșterii emisiilor de gaze cu efect de seră în atmosferă (FN-Sambandet, 2023). Numai industria construcțiilor este responsabilă pentru aproximativ 38% din emisiile mondiale (Programul Națiunilor Unite pentru Mediu, 2021). Din aceste 38%, producția de beton este responsabilă pentru un procent semnificativ de 10% din emisii (Saeed, et al., 2022, pp. 5-9). Datorită proprietăților excelente, cum ar fi

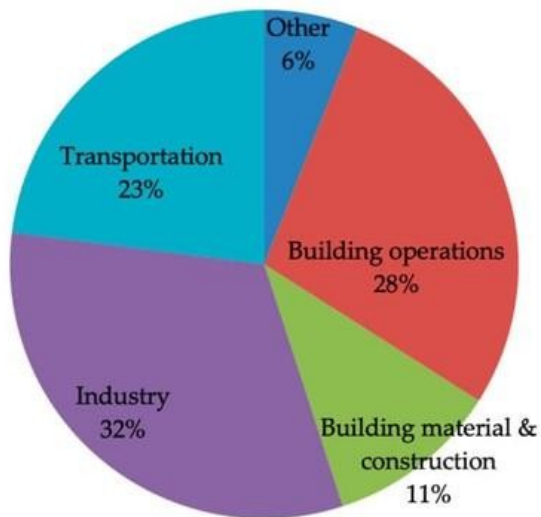


Figura 1: Emisiile globale de CO2 pe sectoare (Ali, 2020, p. 12)

rezistența la compresiune, durabilitatea, rezistența la foc și rezistența la alte solicitări mecanice, betonul a devenit cel mai utilizat material în industria construcțiilor. Se estimează un consum anual de 12,5 miliarde de metri cubi în 2021 (Seehusen, 2021). Betonul este utilizat pe scară largă în elemente prefabricate și structuri turnate pe șantier, deoarece are o mare flexibilitate pentru a fi modelat în forme dificile menținând în același timp proprietățile dorite.

Emisiile actuale de gaze cu efect de seră trebuie reduse la minimum pentru a evita prăbușirea societății și a proteja mediul (FN-Sambandet, 2023). Acest lucru înseamnă că toți actorii din cadrul diferitelor industrii trebuie să contribuie, inclusiv industria construcțiilor (FN-Sambandet, 2023).

Viziunea acestui grup este de a efectua o examinare aprofundată a betonului geopolimer, pentru a vedea dacă betonul tradițional poate fi înlocuit - prin utilizarea instrumentelor tehnice care sunt utilizate în industria construcțiilor.

1.1 Enunțarea problemei

Împreună cu programul Erasmus+ și în asociere cu Colegiul Universitar Østfold, grupul a fost implicat într-un proiect internațional de construcție BIM-LCA. Ca parte a acestuia, teza de licență a fost scrisă în colaborare cu Jotne Eiendom și Selvaag Bolig. Teza se concentrează pe dezvoltarea zonei urbane FMV-Vest din Fredrikstad, în principal spre o construcție numită "Modellageret". Această construcție are o durată de viață proiectată de 10 ani înainte ca noul plan de reglementare să devină operațional.

Prin urmare, grupul a ales să ilumineze tranziția ecologică în cadrul industriei construcțiilor prin abordarea următoarei probleme:

Scopul acestei teze este de a investiga durabilitatea și proprietățile unui beton geopolimer autodezvoltat, precum și de a compara emisiile de CO₂ din faza de producție față de betonul tradițional - cu scopul de a promova conștientizarea emisiilor în industria construcțiilor și a ingineriei utilizând BIM și LCA.

1.2 Limitări

Având în vedere constrângerile de timp pentru teza de licență, este oportun să se stabilească următoarele limitări pentru a se asigura că rezultatele sunt cât mai utile posibil:

Beton geopolimeric

- Proprietățile materialului sunt singurii factori luați în considerare și nu designul estetic.
- Niciun aspect economic nu va fi evaluat sau inclus în baza decizională.
- Proprietățile materialelor vor fi testate în laboratorul de la Colegiul Universitar Østfold și vor fi limitate la echipamentul disponibil.
- Limitări privind amestecarea unei cantități suficiente de probe.
- Comparația cu betonul tradițional este limitată la literatură și standarde.

Utilizarea potențială a betonului geopolimer, revizuire BIM

- Forțele și elementele statice care influențează proiectarea peretelui modulului nu fac obiectul acestei lucrări, ci utilizarea potențială a betonului geopolimer.
- Soluția de ancorare a peretelui modulului nu va fi luată în considerare, dar va fi discutată pe scurt, deoarece reutilizarea este un obiectiv.

Studiu LCA

- Valorile pentru studiul LCA sunt extrase din baza de date a SimaPro, iar consumul de energie este parțial presupus și nu este o valoare definitivă.
- Studiul LCA este limitat la faza de producție a betonului gata amestecat.

1.3 Metoda de cercetare

În timpul implementării tezei de licență, grupul utilizează diferite metode de cercetare, după cum se arată în următoarele puncte:

- Excursie la Cartagena și ateliere legate de instrumentele tehnice.
- Căutarea în literatura de specialitate și colectarea metodică a informațiilor referitoare la subiect.
- Programarea proiectului și urmărirea progresului în Microsoft Project.
- Diagrama de flux a amestecului și a dezvoltării rețetei în Microsoft Visio.
- Culegerea orală de informații de la partenerii de colaborare și supervizori.
- Turnare și testare în laborator.
- Modelare în Revit.
- Evaluarea ciclului de viață în SimaPro.
- Raportarea rezultatelor în Excel.

2 Teoria

Betonul este unul dintre cele mai utilizate materiale din lume și joacă un rol crucial în industria construcțiilor și a ingineriei (Gregory & Logan, 2021). Din punct de vedere istoric, betonul a fost utilizat în diverse forme timp de mii de ani, iar dezvoltarea betonului modern pe bază de ciment Portland poate fi urmărită până în secolul 19th (Kontrollrådet, 2018). În prezent, betonul rămâne un material de construcție popular datorită proprietăților sale versatile, dar producția de beton are un impact semnificativ asupra mediului, cu cantități mari de emisii de dioxid de carbon (Gregory & Logan, 2021).

În 1978, geopolimerul a fost introdus pentru prima dată ca alternativă la cimentul Portland obișnuit, OPC (Parshwanath, Nataraja, & Lakshmanan, 2011). Geopolimerul se bazează pe minerale mai puțin prelucrate cu silicați de aluminiu. Materiile prime adecvate pentru geopolimer pot fi cenușa zburătoare, zgura de fier sau chiar argila (Betongfokus, 2019). Pentru a determina dacă geopolimerul este un material ecologic și durabil, cititorul trebuie să se bazeze pe literatura de specialitate și pe dovezile bazate pe cercetare prezentate mai jos, inclusiv BIM și LCA.

2.1 Beton tradițional

Betonul este un material de inginerie versatil care constă dintr-o substanță de cimentare hidraulică, de obicei OPC, agregate, apă și, adesea, cantități controlate de aer antrenat. Betonul este inițial un amestec plastic, prelucrabil, care poate fi modelat într-o varietate de forme. Rezistența este dezvoltată în timpul reacției de hidratare dintre ciment și apă. Produsele, în principal silicați de calciu, aluminate de calciu și hidroxid de calciu, sunt relativ insolubile și leagă agregatul într-o matrice întărită (Jahren, 2012, p. 11). Masa de beton acționează ca un fluid omogen, în care faza de matrice înconjoară faza de particule (Maage, 2015, p. 143).

2.1.1 Ciment

Definiția cimentului este utilizată în general pentru a descrie o substanță uscată care nu a fost încă activată. Dimensiunea particulelor variază de la 0,5 la 80 μm, iar culoarea este în mod normal gri, datorită materiilor prime care conțin fier (Fe). Aceste materii prime constau în principal în calcar, gips și alte materiale care conțin niveluri ridicate de var și siliciu. Printre acestea se numără cuarțul, ardezia, nisipul sau argila (Jahren, 2012, p. 16).

Când vine vorba de producția de ciment, calcarul este ars cu, de exemplu, cuarț și șist. Amestecul este zdrobit și încălzit în cuptoare rotative la aproximativ 1450°C. Se obține astfel clincher care este măcinat împreună cu gipsul și devine ciment (Heidelberg Materials, s.f.). Calcarul este format în principal din carbon și oxigen, iar atunci când este încălzit, începe procesul de calcinare prin care calcarul se descompune în oxid de calciu (CaO) și se eliberează dioxid de carbon (CO₂) - rezultând emisii mari de CO₂ (Heidelberg Materials, n.red.).



Se estimează că, în fiecare an, se utilizează aproximativ 3 tone de beton pe ființă umană (Gagg, 2014, p. 1).

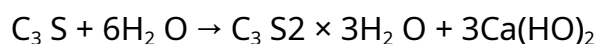
2.1.2 Procesul de hidratare

OPC constă în principal din patru minerale, și anume silicatul tricalcic (C_3S), silicatul dicalcic (C_2S), aluminatul tricalcic (C_3A) și ferita de aluminat tetracalcic (C_4AF). CaO nelegat este cel mai important mineral pentru proprietăți, la care se adaugă oxidul de magneziu (MgO), gipsul, oxidul de potasiu (K_2O) și oxidul de sodiu (Na_2O). Raportul dintre aceste patru minerale descrie proprietățile exoterme, de rezistență, durabilitate și întărire ale cimentului (Maage, 2015, p. 83).

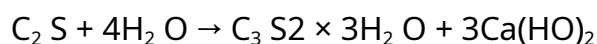
Nume și prenume	Formulă chimică	Simbol
Silicat tricalcic	$3CaO \times SiO_2$	C3S
Silicat dicalcic	$2CaO \times SiO_2$	C2S
Aluminat tricalcic	$3CaO \times Al_2 O_3$	C3A
Ferită de aluminat tetracalcic	$4CaO \times Al_2 O_3 \times Fe_2 O_3$	C4AF

Tabelul 1: Cele 4 minerale principale ale OPC (Maage, 2015, p. 83)

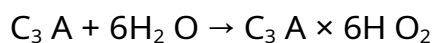
Formula procesului de hidratare a C_3S :



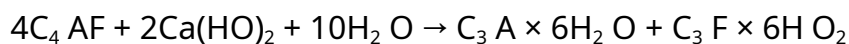
Formula procesului de hidratare a C_2S :



Formula procesului de hidratare a C_3A :



Formula procesului de hidratare a C_4AF :



(Saleh & Eskander, 2020)

Hidratarea este un proces exotermic care eliberează multă energie. Procesul este cunoscut drept hidraulic latent, iar reacția de hidratare poate continua chiar și atunci când este complet scufundat, în absența aerului. Reacția este întârziată de o cantitate mică de gips care trebuie să fie descompusă pentru ca procesul de hidratare să înceapă. Acest lucru asigură lucrabilitatea amestecului de beton timp de aproximativ 2 până la 3 ore (Maage, 2015, p. 57). Conform modelului lui Powers, produsele de reacție sunt hidratul de silicat de calciu (C-S-H) și portlandita (CH), precum și ettringita. Cu toate acestea, nu este posibil să se obțină o hidratare de 100%, aproximativ trei sferturi vor fi hidratate după un an. C-S-H creează porii gelului, care este principala sursă a ceea ce conferă pastei de ciment rezistența și proprietățile de întărire (Maage, 2015, pp. 58-59).

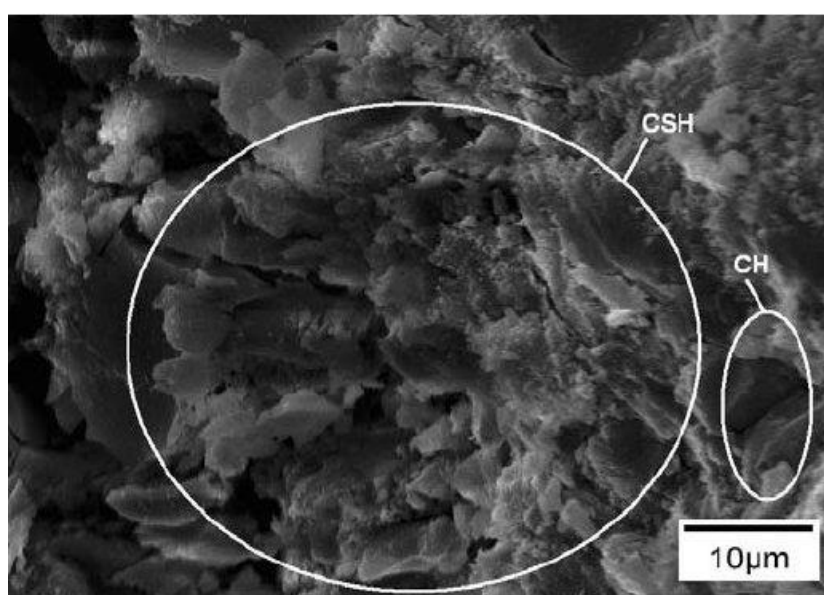


Figura 2: SEM al CH și C-S-H, amestec 8 (Armentrout & Belkowitz, 2009)

2.1.3 Aditivi

Aditivii sunt împărțiți în puzzolani și materiale hidraulice latente și au scopul de a înlocui cimentul Portland. Pe baza proprietăților dorite, diferitele materiale pot fi dozate în procente variabile în raport cu cimentul Portland (Maage, 2015, pp. 92-93). Materialele puzzolane sunt un termen colectiv pentru materialele care reacționează cu produsul de reacție hidroxid de calciu (Ca(OH)_2) (Maage, 2015, p. 93).

Fum de siliciu, 0.01-1 μm

Fumul de siliciu, SF, este un subprodus al producției de siliciu și ferrosiliciu metalic. SF are o granulație foarte fină, iar particulele sunt de ordinul a 1/100 din dimensiunea particulelor de ciment. În Europa, SF trebuie să fie în conformitate cu standardul *NS-EN 13263-1 "Silica fume for concrete, Part 1: Definiții, cerințe și criterii de conformitate"* (Maage, 2015, pp. 93-99).

Impactul asupra betonului proaspăt (Maage, 2015, pp. 95-96):

- SF contribuie la rigidizarea ușoară a betonului și reduce riscul de segregare.
- Vâscozitatea și tensiunea de forfecare la curgere sunt mai mari în betonul cu SF, prin urmare se folosesc întotdeauna agenți plastifianți.
- Aceasta contribuie la dezvoltarea mai lentă a rezistenței și la generarea mai puțină căldură.

Impactul asupra betonului vindecat și a proprietăților mecanice (Maage, 2015, pp. 96-98):

- Reacția puzzolanică a SF este mai mult influențată de temperatură - rezistență timpurie mai scăzută la temperaturi scăzute comparativ cu betonul obișnuit și viceversa.
- Betonul SF este mai rezistent la temperaturi ridicate de întărire, deoarece dezvoltă produse mai puțin poroase decât betonul tradițional.
- SF poate îmbunătăți rezistența la compresiune, aderența și rezistența la abraziune a

betonului decât în cazul betonului fără acesta.

Influența asupra durabilității (Maage, 2015, pp. 98-99):

- SF reduce potențialul de reacție alcalin-siliciu, ASR, deoarece puzzolaniile vor lega alcalii în beton, făcându-i indisponibili pentru reacția ulterioară cu agregatele reactive.
- Adăosul de SF duce la o structură mai fină a porilor în beton, ceea ce duce la un beton mai dens.
- Intrarea clorurilor este redusă semnificativ prin utilizarea SF.

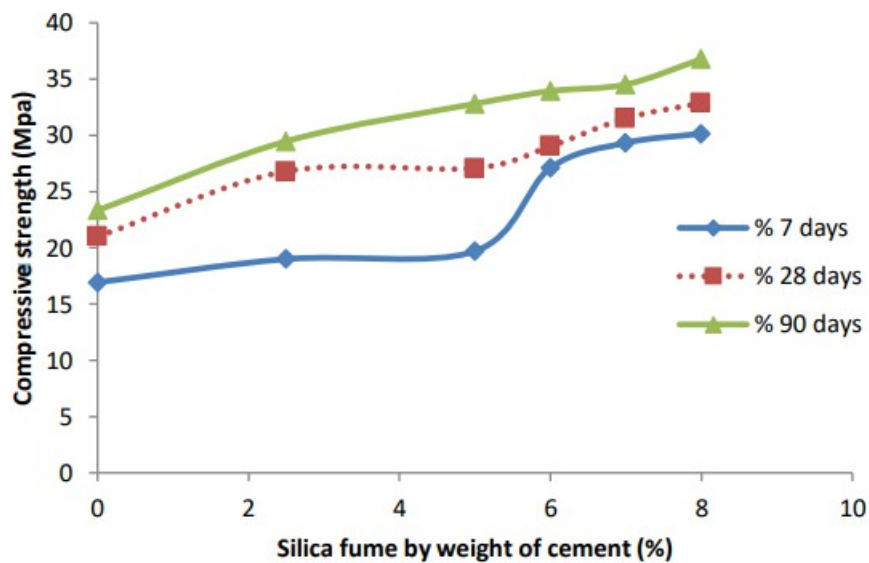


Figura 3: Rezistența la compresiune a mortarului care conține SF (Muwashee & Al-Jameel, 2021)

Cenușă zburătoare, 1-100 μm

Cenușa zburătoare, FA, este un produs secundar al epurării gazelor de ardere în centralele electrice pe bază de cărbune. *NS-EN 197-1* face referire la două tipuri de FA: un tip care conține silicat și un tip care conține calciu. FA conține, de obicei, ceva carbon rezidual, care se reflectă în culoarea ușor mai închisă a betonului (Maage, 2015, p. 101). Utilizarea FA în Europa este supusă standardului *NS-EN 450-1*: "*Cenușă zburătoare pentru beton, Partea 1: Definiție, specificații și criterii de conformitate*" (Maage, 2015, pp. 101-103).

Influența asupra betonului proaspăt (Maage, 2015, p. 102):

- Particulele de FA sunt în esență sferice, iar dimensiunea particulelor este similară cu cea a OPC. Acest lucru îmbunătățește lucrabilitatea betonului.
- FA are o densitate mai mică decât cimentul. Acest lucru poate contribui la creșterea volumului matricei, ceea ce poate îmbunătăți lucrabilitatea betonului.
- FA contribuie la o bună stabilitate.

Impactul asupra betonului întărit și a proprietăților mecanice (Maage, 2015, pp. 102-103):

- FA reacționează mai lent decât cimentul, ceea ce este compensat prin măcinarea cimentului la o stare mai fină.
- Pe termen lung, reacția puzzolanică va contribui la dezvoltarea unei rezistențe mai mari a betonului cu FA decât a betonului fără aceasta.
- Aderența este influențată pozitiv de utilizarea FA.

Impactul asupra durabilității (Maage, 2015, p. 103):

- FA are același impact asupra durabilității ca și SF, iar rezistența la levigat, la atacul sulfat și la atacul acid este influențată pozitiv de utilizarea FA.
- Carbonatarea se poate propaga mai rapid în beton odată cu creșterea cantității de FA.
- Intrarea clorurilor este puternic redusă, iar rezistența electrică crește odată cu creșterea conținutului de AF.

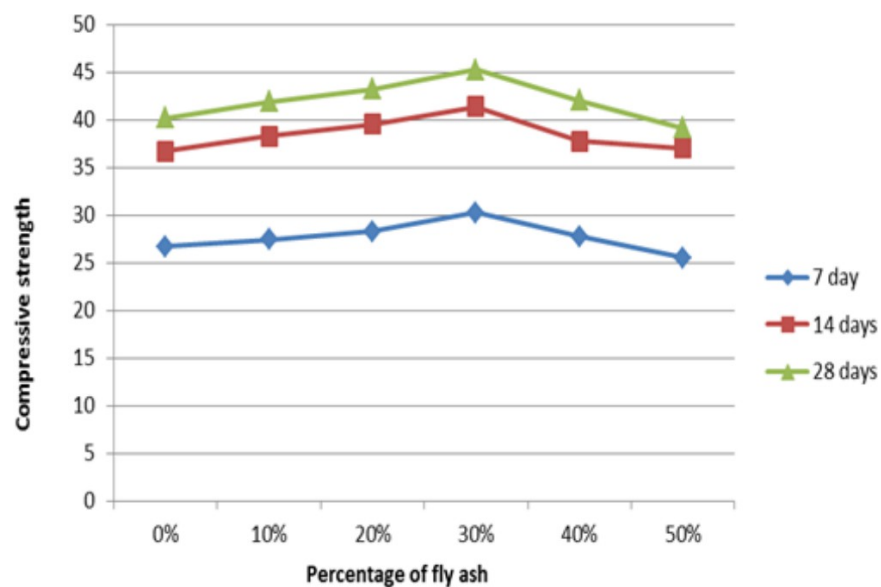


Figura 4: Raportul OPC, rezistența la compresiune cu % FA (Abushad & Sabri, 2017)

Zgură

Zgură, sau zgură de furnal, BFS, este un subprodus al producției de fier brut. Deșeurile colectate constau inițial în particule relativ mari și trebuie să fie zdrobite și măcinate la o dimensiune a particulelor asemănătoare cimentului. GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) este un subprodus al industriei siderurgice care se obține prin stingerea și măcinarea rapidă a zgurii de furnal și este utilizat în mod obișnuit ca material suplimentar de ciment în producția de beton (GCP, n.red.). GGBFS este denumit în mod obișnuit zgură în terminologia betonului și este un material "hidraulic latent", ceea ce înseamnă că poate reacționa chimic fără a se combina cu cimentul dacă nivelul pH-ului este suficient de ridicat. Se compune din 30-50% CaO, 30-40% oxid de siliciu sau silice (SiO_2), 10-25% oxid de aluminiu sau alumină (Al_2O_3), precum și alți oxizi (Maage, 2015, pp. 103-105).

Utilizarea zgurii va reduce emisiile asociate betonului și cantitatea de deșeurii din industria oțelului (Samferdsel og infrastruktur, 2019). În Europa, standardul utilizat este *NS-EN 15167-1*: "Zgură măcinată granulată de furnal pentru utilizare în beton, mortar și chit, Partea 1: Definiții, specificații și criterii de conformitate" (Maage, 2015, p. 105).

Impactul asupra betonului proaspăt (Maage, 2015, p. 105):

- Betonul cu ciment de zgură are adesea proprietăți de lucrabilitate îmbunătățite și segregare redusă în comparație cu betonul care conține doar OPC.
- Cimentul de zgură în beton nu duce neapărat la o dezvoltare redusă a căldurii.

Impactul asupra betonului întărit și a proprietăților mecanice (Maage, 2015, p. 105):

- Zgură reacționează lent, iar rezistența va fi mai scăzută în primele zile decât dacă s-ar fi folosit OPC. Acest lucru poate fi ajustat într-o anumită măsură prin măcinarea cimentului de zgură la o stare mai fină.
- Reacția cimentului de zgură durează o perioadă mai lungă. Aceasta înseamnă că betonul cu ciment de zgură va obține o rezistență mai mare decât betonul cu OPC.

Impactul asupra durabilității (Maage, 2015, p. 105):

- Scoria contribuie la reducerea pătrunderii clorurilor, deoarece produsele C-S-H se formează în timp.
- Sistemul de pori din beton devine mai fin, rezultând un beton mai dens, sporind astfel rezistența la reacțiile alcaline și la atacurile cu sulfatați este influențată pozitiv de utilizarea zgurii.
- Faptul că absorbția de apă în sistemul poros crește semnificativ înseamnă că betonul cu ciment de zgură va avea o rezistență redusă la îngheț.

2.1.4 Adaosuri

Mai jos este prezentat un tabel cu cele mai utilizate adaosuri:

Class of admixtures	Description of the substance's mode of action in concrete
Water – reducing or plasticizing	Reduces the water requirement in each concrete mixture without affecting the consistency or increase the slump/spread measurement without affecting the water requirement or has both effects simultaneously.
Highly water – reducing or super plasticizing	Significantly reduces the water requirement in each concrete mixture without affecting the consistency, or significantly increases the slump/spread measurement without affecting the water requirement or has both effects simultaneously.
Air – entraining	The admixture adds a controlled amount of small, uniformly distributed air bubble during mixing that remain in the mixture after hardening.
Setting accelerators	Reduces the time before the concrete mixture transitions from a plastic to a hardened state.
Hardening accelerators	Causes faster development of early strength in concrete, with or without affecting the setting time.
Setting retarders	Increases the time before the concrete mixture transitions from a plastic to a hardened state.
Water – repellent	Reduces the capillary water absorption in curing concrete.
Admixture for reduced water separation	Reduces water loss by reducing water separation <Bleeding>.
Setting – retarding and water – reducing	Provides combined effect of a water – reducing admixture (primary function) and a setting – retarding admixture (secondary function).
Setting – retarding and high – range water-reducing	Provides combined effects of a water – reducing admixture (primary function) and a setting accelerating admixture (secondary function).
Accelerating setting and water reducing	Provides combined effects of a water – reducing admixture (primary function) and a setting – retarding admixture (secondary function).

Tabelul 2: Clasa de aditivi (SINTEF, 2010)

2.1.5 Raportul de masă

Raportul de masă depinde de raportul apă/ciment, aditivi suplimentari, împreună cu factorul k respectiv (Maage, 2015, p. 100). Raportul de masă este cel mai mare factor al proprietăților întărite, cum ar fi rezistența și durabilitatea. În plus, orice adaosuri și aditivi utilizați vor afecta celelalte proprietăți (Maage, 2015, p. 13).

Formula pentru raportul de masă (Maage, 2015, p. 155):

$$m = \frac{v}{c} = \frac{v}{(c + \sum k * p)}$$

Unde:

- m- Raportul de masă
- v- Cantitatea de apă
- c- Cantitatea de ciment
- p- Cantitatea de aditivi
- k- Factor de eficacitate

2.1.6 Agregate

În principal, agregatele de beton sunt împărțite în agregate grosiere și agregate fine. O fracție de agregat este definită prin denumirea d/D, care reprezintă dimensiunea nominală minimă și maximă a particulelor. Dimensiunea nominală superioară a particulelor nu reprezintă dimensiunea maximă reală a particulelor, ceea ce înseamnă că va exista întotdeauna un anumit număr de particule supradimensionate (Maage, 2015, p. 133). Distribuția dimensiunii particulelor este documentată prin analiza prin sită în conformitate cu *NS-EN 933-1* (CEN, 2012).

2.2 Beton geopolimeric

Betonul geopolimeric, GPC, a câștigat multă atenție în ultimii ani și este un material de construcție relativ nou. La fel ca betonul obișnuit, GPC este fabricat cu un liant, un lichid și agregate. Principala diferență este că liantul nu conține OPC, iar lichidul este format în principal din activatori alcalini. Cealaltă mare diferență dintre betonul OPC și GPC este că GPC utilizează mult mai bine deșeurile, reducând astfel semnificativ emisiile de CO₂. De asemenea, este considerat destul de rentabil, oferind o infrastructură cu durată lungă de viață și un consum redus de energie (Ahmed, et al., 2022).

2.2.1 Raportul de masă al GPC, L/GB

La punctul 2.1.5 Raportul de masă, conceptul de raport de masă, după cum s-a menționat, cuprinde și raportul lichid-legant, care reprezintă raportul de masă dintre cantitatea totală de apă liberă și apa conținută în soluțiile alcaline, precum și masa totală a solidelor geopolimerice, inclusiv FA, GGBFS, granule de hidroxid de potasiu (KOH) și solide de silicat de sodiu (Na_2SiO_3). Acest raport este sugerat să aibă un efect similar cu raportul apă/ciment (W/C) pentru apă și ciment (Pilehvar, et al., 2018). Cu toate acestea, termenul propus "lichid" este utilizat pentru a cuprinde cantitatea totală de soluții alcaline, apă suplimentară, superplastifianți și lianți geopolimerici, care includ FA și GGBFS (Pilehvar, et al., 2018). Prin aceste două propuneri, grupul a stabilit să utilizeze ultimul raport, deoarece grupul a definit întreaga soluție alcalină, superplastifiantul și apa ca fiind un *lichid*.

2.2.2 Geopolimer ca liant

Există un consens din ce în ce mai larg conform căruia liantul pe bază de calcar este considerat ciment de primă generație, OPC ca fiind de a doua generație, iar cimentul geopolimer este adesea denumit material cimentat de a treia generație (Singh, Ishwarya, Gupta, & Bhattacharyya, 2015). Acesta a câștigat multă atenție pozitivă în ultimii ani, datorită rezistenței timpurii la compresiune, rezistenței chimice bune, permeabilității scăzute și proprietăților rezistente la foc. Cuvântul "geopolimer" este un termen general care este utilizat în mod obișnuit pentru a se referi la aluminosilicat alcalin amorf, deoarece

amorf descrie ca un solid care nu prezintă o structură cristalină (Mavračić, Mocanu, Deringer, Csányi, & Elliott, 2018). În plus, acestea sunt cunoscute și sub alte denumiri, cum ar fi "geocamente", "cimenturi activate de alcalii", "polimeri anorganici", "ceramică legată de alcalii", "hidroceramică" și altele (Singh, Ishwarya,

Gupta, & Bhattacharyya, 2015). Acești termeni diferiți descriu materiale care utilizează substanțe chimice comparabile, în ciuda diversității terminologiei.

Compusul chimic constă, în general, dintr-o unitate repetată de monomer sialat.

Monomerul este un tip de conexiune chimică, în care moleculele reacționează în interiorul lor pentru a crea molecule mai mari, date fiind condițiile adecvate (Helseth, 2021).

Monomerii sialat sunt o formă prescurtată de siliciu-oxo-aluminat alcalin, unde alcalii sunt sodiu (Na), potasiu (K), litiu (Li) și calciu (Ca). Ele se caracterizează prin compoziția lor, care include atomi de siliciu (Si), aluminiu (Al) și oxigen (O), împreună cu cationi de metale alcaline, cum ar fi Na sau K. Astfel de materiale care au fost utilizate ca materii prime în geopolimeri, cuprind feldspat, caolinit și reziduuri industriale solide. Acestea includ FA, deșeuri miniere și zgură metalurgică. Reactivitatea este descrisă de caracteristici precum compoziția chimică, morfologia, faza sticloasă, finețea și compoziția mineralogică a acestor surse de aluminosilicate. Factorii comuni care dezvoltă atributele geopolimerului includ materiale care posedă un conținut suficient de sticlos reactiv, o stare amorfă ridicată, o cerere nesemnificativă de apă și capacitatea de a elibera ușor aluminiu (Singh, Ishwarya, Gupta și Bhattacharyya, 2015).

Procesul de geopolimerizare constă, în general, din următoarele etape (Cong & Cheng, 2021):

1. Dizolvarea precursorului
2. Formarea gelului inițial
3. Formarea structurii rețelei de gel de silicat

Ca și în cazul OPC, selectarea materiilor prime și raportul dintre acestea au un impact major asupra proprietăților geopolimerului, cum ar fi durabilitatea, dezvoltarea termică, rezistența potențială, dezvoltarea rezistenței (Maage, 2015, pp. 83-87). Deoarece se utilizează zgură și FA ca liant, se va discuta compoziția minerală a materialelor. Tabelul 3 de mai jos, arată compoziția aditivilor care au fost utilizați în acest proiect. De asemenea, valoarea Blaine, sau suprafața specifică, și finețea particulelor descriu eficiența unui material puzzolanic (Taffase & Espinosa-Leal, 2023, p. 2).

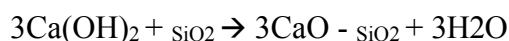
MERIT		FA from Norcem	
	Slag		FA F
H2O	0,18	H2O	0,54
CO2	1,41	CO2	1,25
Na2O	0,55	Na2O	0,86
MgO	12,79	MgO	1,24
Al2O3	11,82	Al2O3	21,13
SiO2	32,12	SiO2	60,59
SO3	2,69	SO3	0,66
K2O	0,96	K2O	2,65
CaO	34,25	CaO	2,04
TiO2	2,15	TiO2	1,10
V2O5	0,11	V2O5	0,05
Cr2O3	0,01	Cr2O3	0,02
MnO	0,51	MnO	0,09
Fe2O3	0,21	Fe2O3	7,13
CuO	0,01	CuO	0,02
Rb2O	0,00	Rb2O	0,01
SrO	0,06	SrO	0,06
Y2O3	0,01	Y2O3	0,01
ZrO2	0,04	ZrO2	0,06
Nb2O5	0,00	Nb2O5	0,00
BaO	0,07	BaO	0,12
	99,94		99,61

Tabelul 3: Compoziția chimică a zgurii și FA

Zgură sau GGBFS în geopolimer

Scoria este activată de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfatați și alcali (Maage, 2015, p. 105). În zgură, cantitatea mare de CaO și SiO_2 asigură proprietatea hidraulică de a reacționa cu monoxidul de dihidrogen (H_2O), precum și capacitatea de a se întări complet submers. SiO_2 , și Al_2O_3 , este un material amorf, având astfel proprietăți puzzolanice. Când pH-ul este ≥ 11 , Al_2O_3 și SiO_2 devin solubile, permițând o reacție puzzolanică (Singh, Siddique, & Singh, 2022, pp. 1-29). SiO_2 trebuie să fie în stare amorfă pentru a participa la reacția puzzolanică (Maage, 2015, p. 101). SiO_2 și CaO vor forma metasilicat de calciu (CaSiO_3), precum și produse C-S-H, prin reacția SiO_2 cu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Maage, 2015, p. 94).

Reacție puzzolanică (Setina, Gabrene, & Juhnevică, 2013, p. 1006):



FA (tip F) în Geopolymer

FA constă în principal din SiO_2 și Al_2O_3 și, la fel ca zgura, generează o reacție puzzolanică. Finețea pulberii de FA afectează foarte mult întărirea și dezvoltarea rezistenței. FA ultrafin scade porozitatea, generând un beton mai durabil, dar scade și timpul de priză (Deb & Sarker, 2016, pp. 1-5). Lucrabilitatea este îmbunătățită datorită formei sferice și proporțiilor mici ale particulelor (Maage, 2015, p. 101). În plus, reduce porozitatea, iar sorptivitatea apei va fi redusă ca urmare. Va crește apoi rezistența la difuzia clorurilor, din cauza porilor permeabili reduși (Saha, 2018, pp. 25-31). Cu toate acestea, datorită conținutului scăzut de CaO și nivelului ridicat de siliciu amorf, dezvoltarea timpurie a rezistenței la compresiune va fi mai scăzută, iar pe termen lung va fi mai mare. De asemenea, FA contribuie treptat la reducerea contracției la uscare, deoarece are o cantitate semnificativ mai mică de var (Saha, 2018, pp. 25-31).

Motivul pentru care FA de tip F este atât de eficient în a contribui la reducerea permeabilității și la creșterea rezistenței la atenuarea ionilor de clorură se datorează reducerii a două metode de transport (Saha, 2018, pp. 25-31):

- Interconectarea golurilor în beton.
- Ioni hidroxil (HO) liberi.

Cu o finețe mai mare a FA, interconexiunea va fi redusă, făcând astfel dificilă deplasarea ionilor prin beton. Deoarece FA de tip F reduce, de asemenea, ASR, acesta leagă în plus ionii HO în soluția din pori. Prin urmare, acești doi factori sunt puncte forte în realizarea unui beton mai durabil, în special din cauza permeabilității reduse la cloruri (Saha, 2018, pp. 25-31).

Raportul dintre FA și GGBFS

Cu un raport mai mare între FA și GGBFS, timpul de întărire inițială scade datorită reacției Ca din GGBFS. Lucrabilitatea amestecului este crescută în GPC odată cu creșterea cantității de FA datorită dimensiunii și formei mici a particulelor. Datorită fineții și valorii Blaine ridicate a FA, reactivitatea puzzolanică crește și porii capilari se prăbușesc (Ahmed, et al., 2022). Acest lucru generează o porozitate mai scăzută și o rezistență și o densitate mai mari, deoarece mai mult material umple porii care ar putea fi umpluți cu aer sau apă. Creșterea raportului de GGBFS scade lucrabilitatea, deoarece particulele au o formă mai unghiulară decât cele din FA. Dezvoltarea rezistenței este inițial mai lentă, dar rezistența crește până la 180 de zile (Ahmed, et al., 2022). Raportul dintre GGBFS și FA de 20 până la 80 este optim, conform lui Ahmed. Raportul de 25 la 75 de GGBFS și FA este, de asemenea, sugerat pentru a avea cele mai bune proprietăți mecanice (Patil, Karikatti, & Chitawadagi, 2018).

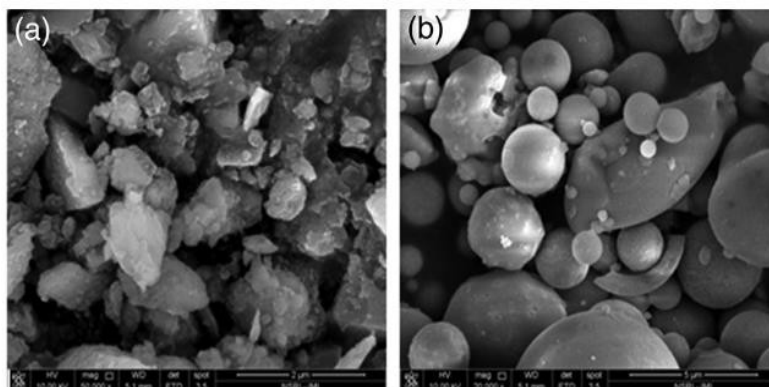


Figura 5: Imaginea a) arată imaginea SEM a particulelor de zgură, în timp ce b) arată imaginea SEM a particulelor de cenușă zburătoare (Verma & Dev, 2021)

2.2.3 Activatori alcalini

Activatorii utilizați pentru fabricarea GPC sunt KOH, hidroxidul de sodiu (NaOH), silicatul de potasiu (K_2SiO_3) și Na_2SiO_3 . Aceștia sunt utilizați pentru a activa substanțele aluminosilicate și pentru a produce produsele de hidratare, C-S-H, CH și ettringită. Procesul de geopolimerizare constă, în general, din trei etape consecutive (Cong & Cheng, 2021):

1. Dizolvarea materialelor de aluminosilicat de către activatorii alcalini.
2. Reacția de condensare a hidroxilului de alumină și siliciu pentru a forma gel geopolimer.
3. Se condensează în continuare pentru a forma o rețea tridimensională.

Atunci când se compară NaOH cu KOH, KOH prezintă un conținut mai mare de alcalinitate, cu toate acestea, NaOH pare să prezinte o capacitate mai mare de a elibera monomeri de silicat și aluminat (Singh, Ishwarya, Gupta, & Bhattacharyya, 2015). O molaritate mai mare a activatorilor alcalini, cum ar fi NaOH, asigură o rezistență mai mare la compresiune, deși o lucrabilitate mai scăzută (Ahmed și colab., 2022). De asemenea, KOH posedă o rezistență mai mare la compresiune cu o concentrație mai mare, până la 14M (Hardjito & Tsen, 2008).

Raportul dintre activatori

Pentru a obține cea mai mare rezistență la compresiune, Detphan și Chindaprasirt, au realizat GPC din cenușă de coajă de orez și FA, care a fost activată de o soluție de NaOH și Na_2SiO_3 . Raportul masic optim de Na_2SiO_3 la NaOH a fost de 4:1 (Saeed, et al., 2022). Alte surse afirmă că raportul între cele două soluții alcaline trebuie să fie $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 2,5$ (Ketana, Reddy, Rao, & Shrihari, 2021). Grupul a stabilit un raport nu prea departe de aceste rezultate, deși aceste două diferă foarte mult, 2,5:1 și 4:1. 1,5:1 este ceea ce grupul va lua în considerare. Rata de lucrabilitate și timpul de întărire, este ceea ce raportul activatorilor alcalini va schimba (Saeed, et al., 2022).

2.2.4 Condiții de întărire

Condițiile optime de întărire a GPC pe bază de FA sunt întărirea în cuptor între 40°C și 100°C, iar durata optimă de întărire în cuptor a fost considerată de 20 de ore (Fadhil, Haruna, Mohammed și Sha'aban, 2017, p. 32). Acest lucru se datorează activității sporite a geopolimerului în timpul temperaturilor mai ridicate decât temperatura mediului ambiant. Legătura dintre pastă și agregate este crescută, creând o creștere generală a rezistenței și durabilității. Activarea mecanică și rata de dezintegrare a particulelor FA și transformarea morfologică sunt îmbunătățite, pe măsură ce temperatura de întărire crește (Fadhil, Haruna, Mohammed și Sha'aban, 2017, p. 32).

2.2.5 Proprietățile de autovindecare ale GPC

Principalul motiv pentru care unele structuri de beton cedează este coroziunea armăturilor (Rodriguez, Ortega, & Casal, 1997). În plus, un motiv comun și esențial pentru coroziunea armăturilor sunt fisurile din beton. Deoarece principala preocupare privind durata de viață a unei structuri de beton depinde de capacitatea sa de a etanșa și proteja armăturile - această proprietate de autovindecare este rudimentară. Fisurile nu sunt neobișnuite și se vor dezvolta datorită căldurii de întărire, contracției de uscare, contracției plastice, deteriorării și forțelor aplicate (Maage, 2015, p. 407). Acestea permit substanțelor chimice și ionilor să pătrundă în beton, prin sorbția și difuzia apei. Acest lucru va destabiliza stratul de oxid și armăturile de oțel vor începe să se corodeze. În plus, acest lucru va duce atât la scăderea suprafeței secțiunii transversale a armăturilor, cât și la scăderea capacității de încărcare și la extinderea volumului armăturilor (Maage, 2015, pp. 218-227). Acest lucru se datorează produsului de coroziune, creând tensiuni interne de tracțiune care fisurează betonul.

FA de tip F, așa cum sunt utilizate, au demonstrat proprietăți de autovindecare. Gradul de vindecare depinde de deteriorarea betonului (Ross, Genedy, Juenger, & van Oort, 2022). FA tip F are autovindecare "autogenă", iar procesul de reparare are loc datorită încorporării polimerilor. Mecanismul de vindecare este inițiat din cauza formării de produse de reacție amorfe de aluminosilicat, precum și a unei depuneri de calcit.

Capacitatea de a închide fisurile, de a opri în continuare pătrunderea, este ceea ce determină o bună capacitate de autovindecare (Ross, Genedy, Juenger și van Oort, 2022). Proprietățile benefice menționate ale FA în GPC pot prelungi durata de viață a structurii.

2.2.6 GPC în uz astăzi

Un factor care contribuie la trecerea lentă la GPC este mediul periculos creat de activatorii alcalini. Având în vedere că substanțele alcaline sunt soda caustică, soluțiile sunt periculoase pentru operatorii care amestecă GPC, precum și pentru cei care lucrează la turnare (National Center for Biotechnology Information, 2023). În plus, atunci când se creează o soluție de NaOH sau KOH din granule cu apă, reacția dintre cele două componente, adică NaOH și H_2O , este puternic exotermică. Ea va atinge aproape temperatura de fierbere a apei (BYJU's Learning, 2023). Acest lucru înseamnă că manipularea unor cantități mari din acest lichid și amestecarea acestuia ar trebui să se facă extrem de atent și într-un mod strict. În plus, GPC este utilizat într-o varietate de proiecte cu aplicații diferite, cum ar fi următoarele:

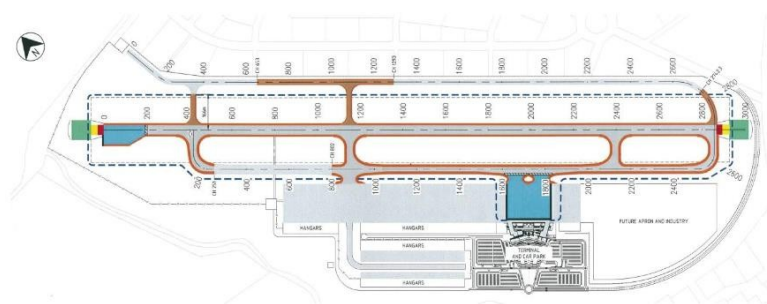
Universitatea Queensland GCI (Global Change Institute)

Australienii au cercetat GPC pe o perioadă îndelungată și au încorporat deja, ca primii din lume, GPC în scopuri structurale - cum ar fi plăcile prefabricate ale clădirii GCI (Global Change Institute) a Universității Queensland. Aceasta este o construcție cu 4 etaje, unde 3 dintre etaje implică utilizarea a 33 de panouri GPC prefabricate. Panourile prefabricate sunt realizate din GPC pe bază de zgură/FA, denumit Earth Friendly Concrete, EFC, și a fost proiectat de Wagners Australia (WAGNERS, n.d.).



Figura 6: 1 din cele 33 de panouri GPC prefabricate (WAGNERS, n.red.)

Aeroportul Brisbane West Wellcamp

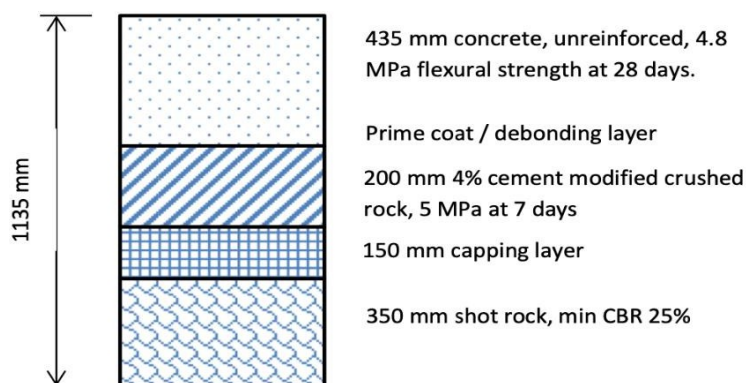


(pavement plan - excerpt from ACG Engineers drawings)

Figura 7: Plan de pavaj/pistă, Aeroportul BWW (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015)

Aeroportul BWW a devenit complet operațional cu zboruri comerciale în 2014. Wagner's Australia a furnizat pentru acest proiect aproximativ 40 000 m³ de beton geopolimer, aceasta fiind cea mai mare aplicație a acestei clase de beton din lume la momentul respectiv. EFC a fost potrivit pentru proiect datorită rezistenței ridicate la tracțiune prin flexiune, contracției reduse și caracteristicilor sale de lucrabilitate (Glasby, Day, Genrich și Aldred, 2015).

EFC a fost furnizat de Wagners Australia pentru construcția pistelor grele cu grosimea de 435 mm, după cum se arată în figura 8 de mai jos, în zonele de întoarcere ale aeronavelor. Au existat trei zone de piste din geopolimer, inclusiv nodul de întoarcere de la capătul nordic al pistei, calea de rulare de pe partea vestică a pistei și hangarele de pe partea estică a pistei (Glasby, Day, Genrich și Aldred, 2015).



(pavement design by ACG Engineers)

Figura 8: Secțiunea transversală de proiectare a pavajului din beton de înaltă rezistență (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015)

Amestecul de GPC utilizat în acest proiect a fost dezvoltat pe parcursul unei perioade de 10 ani, de către Wagner, pentru a crea un beton comercial care să poată fi produs și manipulat în mod similar cu betonul convențional. Parametrul sumar al amestecului acestui GPC (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015):

- Liant total alumină-silicat compus din zgură + FA, 415 kg/m^3 .
- Raportul apă: liant: 0,41.
- Dimensiune nominală maximă a agregatelor de 40 mm, conformă cu 28 mm la AS 2758.1 (3).
- Activator chimic, 37 kg/m^3 conținut de substanțe solide.
- Amestec proprietar pentru reducerea apei.

Betonul utilizat în Aeroportul BWB a fost produs într-o instalație mobilă dublă de amestecare umedă stabilită pe amplasamentul proiectului, cu o capacitate maximă de alimentare de $120 \text{ m}^3/\text{h}$, după cum se arată în figura 9 (Glasby, Day, Genrich și Aldred, 2015).



Figura 9: Instalație cu două loturi de geopolimer (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015)

2.3 Teoria legată de metodologie

Pentru a determina proprietățile betonului atât în stare proaspătă, cât și în stare întărită, grupul a utilizat diverse teorii asociate cu metoda. Acest capitol va descrie teoria din spatele metodelor utilizate.

2.3.1 Elaborarea rețetei

Un proiect de amestec de beton este proporționat pe baza proprietăților dorite ale betonului. Regula principală este că compoziția matricei controlează proprietățile betonului întărit, în timp ce compoziția agregatelor controlează proprietățile betonului proaspăt (Maage, 2015, p. 156).

Aceasta este o regulă aproximativă, ceea ce înseamnă că este încă posibil să se ajusteze proprietățile betonului proaspăt prin modificarea ușoară a proprietăților matricei fără a modifica simultan proprietățile betonului întărit (Maage, 2015, p. 156).

2.3.2 Dimensiunea agregatelor

Dimensiunea particulelor afectează în mare măsură proprietățile betonului proaspăt, dar și pe cele întărite (Maage, 2015, p. 119). De obicei, fracțiunile utilizate în producția de beton gata preparat și beton prefabricat sunt împărțite în fracțiuni de 0-8 mm, 8-16 mm și 16-22 mm în producția de beton gata preparat (Maage, 2015, p. 130). Agregatele fine au proprietatea de a "efectul de umplere" care umple golurile cu material mai degrabă decât cu aer. Acest lucru generează o prelucrabilitate ușor mai redusă, dar crește stabilitatea în timp ce scade sângerarea, crește rezistența la compresiune și gradul de compactare este îmbunătățit (Diagne, Ibrahima, & Gueye, 2021).

Pentru a obține o rezistență ridicată la compresiune, Neville și Aïtcin sugerează fracțiuni cu dimensiunea de 10-14 mm pentru betonul de înaltă performanță, HPC (Neville & Aïtcin, 1998). Pentru HPC, este important ca dimensiunea agregatelor să fie selectată cu atenție. Motivul pentru care fracțiunile mai mici sunt benefice se datorează a doi parametri. În primul rând, tensiunile diferențiale de la interfața agregat - pastă de ciment

vor cauza probabil microfisuri, iar acest lucru poate fi prevenit prin fracțiuni mai mici. În al doilea rând, datorită fragmentării rocilor, se reduc și defectele mari, rezultând astfel că agregatele mai mici sunt mai puternice decât cele mari (Neville & Aïtcin, 1998). Agregatele unghiulare au, de asemenea, beneficii favorabile față de agregatele rotunde, deoarece agregatele unghiulare posedă o rezistență mai mare la compresiune, datorită acțiunii de blocare mai mare între agregatele unghiulare (Nitka & Tejchman, 2020). Ca urmare a recomandării

maxim 10-14 mm (Neville & Aïtcin, 1998), a fost aleasă o reducere cu 25% a fracțiunilor de 8-16 mm la fracțiunile de 0-8 mm, în loc de raportul dintre distribuția inițială de 50-50.

2.3.3 Amestecarea și întărirea betonului

Modificările mici în compoziția amestecului de beton pot avea diferențe semnificative în ceea ce privește proprietățile de lucrabilitate și rezistență. Prin urmare, se utilizează amestecuri de probă, iar amestecul este ajustat în funcție de proprietățile dorite (Maage, 2015, p. 165).

Procesul standard de întărire a betonului este stocarea apei la 20°C (Heidelberg Materials). Temperaturile mai ridicate, de peste 40°C, determină o hidratare rapidă și, prin urmare, o dezvoltare rapidă a rezistenței și viceversa. Temperaturile ridicate de întărire, pe de altă parte, pot duce la scăderea rezistenței finale și pot provoca fisurarea (Maage, 2015, pp. 323-324).

2.4 Teoria referitoare la procedura de testare.

Pentru a determina proprietățile betonului atât în stare proaspătă, cât și în stare întărită, grupul a utilizat diverse teorii asociate cu procedura de testare. Acest capitol va descrie teoria din spatele procedurii de testare utilizate.

2.4.1 Conținutul de apă în agregat

Conținutul de apă din agregat este verificat pentru a măsura cantitatea totală de apă liberă prezentă într-un eșantion de agregat. Apa poate proveni de la suprafața agregatului și din apa disponibilă în porii particulelor de agregat (Pavement Interactive, n.red.).

2.4.2 Distribuția dimensiunii particulelor în agregat

Distribuția granulometrică este o măsură a procentului în greutate al diferitelor dimensiuni ale particulelor în materialele granulare și agregate. Distribuția granulometrică este importantă în determinarea proprietăților tehnice ale betonului și este exprimată sub forma

unei curbe de sită (Thue, 2019).

2.4.3 Capacitatea termică specifică

Capacitatea termică specifică, c , indică cantitatea de energie necesară pentru a încălzi 1 kg de material cu 1 K. De asemenea, indică în același mod cantitatea de căldură eliberată atunci când materialul este răcit. Capacitatea termică specifică este exprimată în $J/(kgK)$ (CBI Norge, s.f.).

2.4.4 Calorimetrie de conducere izotermă

Cu ajutorul calorimetrului izoterm de conducție, căldura de hidratare a materialelor de ciment este măsurată direct prin monitorizarea fluxului de căldură din epruvetă atunci când atât epruveta, cât și mediul înconjurător sunt în condiții aproximativ izoterme.

Calorimetria izotermă este o modalitate bună de a urmări și documenta toate etapele procesului de hidratare (Wadsö, 2005):

- I. Proces inițial rapid
- II. Perioada de inactivitate
- III. Perioada de accelerare
- IV. Perioada de retardare
- V. Reacții pe termen lung

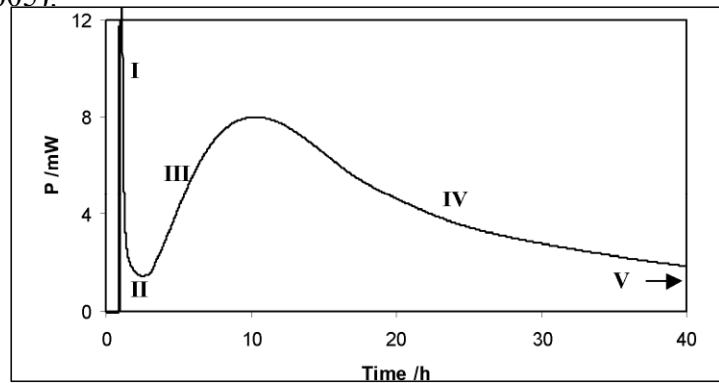


Figura 10: Procesul de hidratare (Wadsö, 2005)

2.4.5 Timpul de setare inițială și finală - VICAT

Tranziția în care mortarul trece de la un material lichid/plastic la o substanță solidă se numește timp de întărire. După întărire, masa devine rigidă, în timp ce dezvoltarea rezistenței nu a început încă în mod corespunzător. Timpul de priză al betonului este determinat în conformitate cu *NS-EN 480-2* ca vârsta betonului la care rezistența la penetrare atinge 3,5 MPa de la un piston, însă poate fi determinat și din curba de evoluție termică (Meyer, 2021).

2.4.6 Lucrabilitate

În terminologia betonului, termenul lucrabilitate este împărțit în trei ramuri: stabilitate, mobilitate și compresibilitate. Acestea au în comun faptul că descriu calitativ și parțial cantitativ comportamentul betonului proaspăt (Maage, 2015, p. 181).

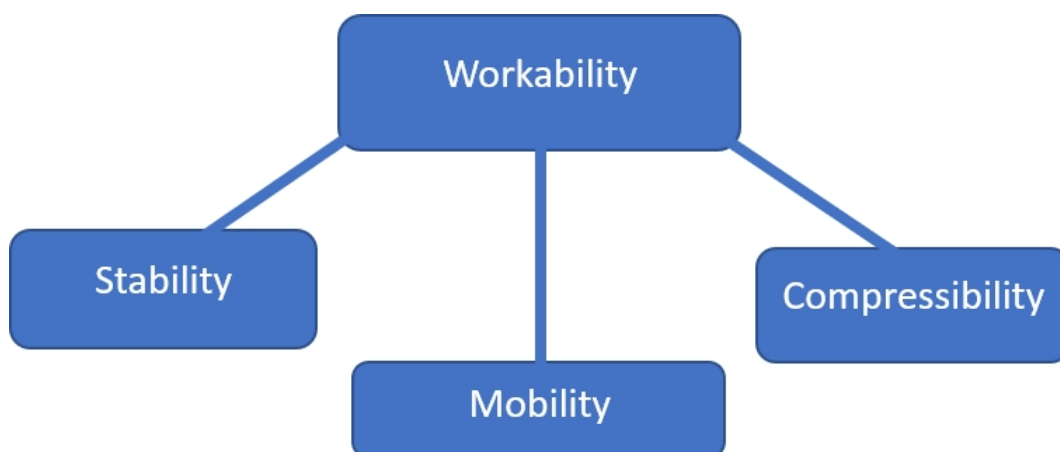


Figura 11: Capacitatea de muncă (Maage, 2015, p. 181)

O metodă frecvent utilizată pentru clasificarea prelucrabilității betonului este utilizarea încercărilor de înclinare. Domeniul de aplicare al metodei de testare a înclinării se extinde de la beton foarte rigid la beton foarte fluid.

Table 3 — Slump classes

Class	Slump tested in accordance with EN 12350-2 mm
S1	10 to 40
S2	50 to 90
S3	100 to 150
S4	160 to 210
S5 ^a	≥ 220
^a See Note 1 to 5.4.1.	

Tablelul 4: Clase de alunecare (Standard Norge, 2004)

Tablelul 3 Clase de alunecare din NS-EN 206:2013+A2+NA este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

Atunci când înclinarea este mai mare de 250 mm, diferențele suplimentare determină variații ne semnificative ale proprietăților de lucrabilitate ale betonului.

În cazul betonului cu o tasare mai mare de 250 mm, este normal să se utilizeze măsurători de împrăștiere (Maage, 2015, p. 187). Cu ajutorul măsurătorii răspândirii, se poate clasifica clasa de consistență a betonului.

Table 6 — Slump-flow classes

Class	Slump-flow ^a tested in accordance with EN 12350-8 mm
SF1	550 to 650
SF2	660 to 750
SF3	760 to 850
^a The classification is not applicable to concrete with D_{max} exceeding 40 mm.	

Tabelul 5: Clasele de alunecare-flux (Standard Norge, 2013, p. 28)

Tabelul 6 Clase de alunecare-flux din NS-EN 206:2013+A2+NA este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: Un beton orientat spre viitor" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

De asemenea, este firesc să se efectueze un test al diametrului de curgere pentru a clasifica clasa de curgere. Acest lucru se face în conformitate cu metoda de testare NS-EN 12350-5.

Table 5 — Flow classes

Class	Flow diameter tested in accordance with EN 12350-5 mm
F1 ^a	≤ 340
F2	350 to 410
F3	420 to 480
F4	490 to 550
F5	560 to 620
F6 ^a	≥ 630
^a See Note 1 to 5.4.1.	

Tabelul 6: Clase de debit (Standard Norge, 2013, p. 27)

Tabelul 5 Clase de curgere din NS-EN 206:2013+A2+NA este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

2.4.7 Conținutul de aer

Betonul este un material poros care conține 120-180 l/m³ de pori în beton. O mare parte din acești pori, în special la suprafață, se umplu cu apă atunci când betonul este expus la apă liberă pentru intervale scurte sau lungi. Atunci când apa din acești pori îngheață, gheața se dilată, ceea ce poate deteriora betonul (Maage, 2015, p. 227). În prezent, cantitatea de aer din beton este controlată printr-o procedură standard, explicată în capitolul 4.2.7 Conținutul de aer.

2.4.8 Densitate

Densitatea, sau densitatea masică, se exprimă în kg/m³ și reprezintă raportul dintre masa unei anumite probe de beton și volumul acesteia.

2.4.9 Rezistența la compresiune

Shape of Test Specimen	Size in mm	Modification Factor
Cube	100 x 100 x 100	0.8
	150 x 150 x 150	0.8
	200 x 200 x 200	0.83
Cylinder	150Φ x 300	1.0
	100Φ x 200	0.97
	200Φ x 500	1.05
Square Prism	150 x 150 x 450	1.05
	200 x 200 x 600	1.05

Tabelul 7: Factori de modificare privind conversia rezistenței probelor de beton (Institutul de Cercetare în Construcții, n.red.)

Rezistența la compresiune este definită ca valoarea medie a sarcinii maxime a mai multor epruvete standardizate care sunt încărcate până la cedare. Sarcina maximă este convertită în tensiune nominală (Maage, 2015, p. 195).

EN 206 /4/ definește rezistența la compresiune a betonului în clase de rezistență cu denumirea B și un număr din două cifre, de exemplu, B25, care reprezintă măsura rezistenței caracteristice pe cilindri după o întărire standard timp de 28 de zile (Maage, 2015, p. 195). Aceasta înseamnă că betonului i se atribuie o clasă de rezistență în funcție de cerințele pentru rezistența caracteristică a cilindrilor, f_{ck} , chiar dacă rezistența caracteristică a cuburilor, $f_{ck,cube}$, este mai mare. Factori de modificare prezentate în tabelul 7 pot fi utilizate atunci când testarea rezistenței cubului pentru a prezenta rezistența caracteristică a cilindrului.

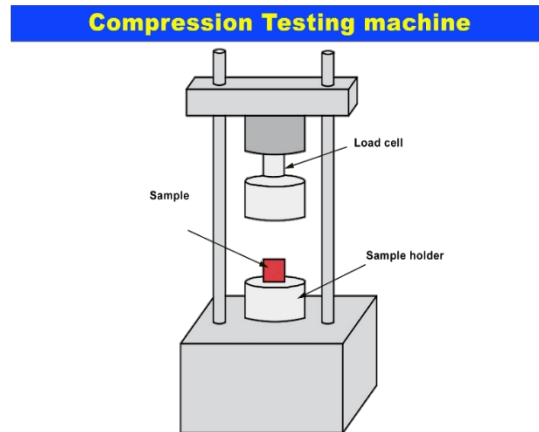


Figura 12: Mașină de testare la compresiune (EPOXY TILE FLOORING, 2021)

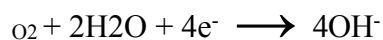
2.4.10 Intruziunea clorurilor

Atunci când o cantitate suficientă de cloruri intră în contact cu oțelul de armare, stratul de oxid pasivant este distrus, iar coroziunea poate apărea chiar dacă valoarea pH-ului este ridicată. Acest tip de coroziune are adesea o evoluție mai rapidă decât atunci când procesul este inițiat de carbonatare (Maage, 2015, p. 42). Coroziunea care rezultă din pătrunderea clorurilor este considerată "mai periculoasă" decât carbonatarea, deoarece progresia are loc în zone mai delimitate pe suprafața oțelului, unde stratul de oxid este distrus. Aceasta duce la o deteriorare mai rapidă a oțelului, care poate fi comparată cu "tăierea" armăturii, denumită "pitting" (Maage, 2015, p. 224).

Valoarea limită pentru o cantitate suficientă de cloruri pentru a iniția coroziunea nu este un interval definit, ci este determinată de factori precum nivelul pH-ului, structura porilor, porozitatea, umiditatea etc. din beton (Maage, 2015, p. 221). Atât clorurile libere, cât și cele legate sunt prezente în beton. Clorurile libere sunt dizolvate în apa din pori, în timp ce

unele vor fi legate chimic sau fizic de produsele de reacție. Numai clorurile libere vor crea probleme în ceea ce privește coroziunea. Raportul dintre clorurile libere și cele legate nu depinde în mod semnificativ de raportul de masă sau de nivelul de umiditate, ci mai degrabă de tipul de ciment, de cantitatea de SF și de nivelul pH-ului din beton.

Procesul catodic, "motorul" coroziunii (Maage, 2015, p. 223):



Procesul anodic, oțelul se corodează (Maage, 2015, p. 223):

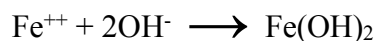


Procesul de coroziune are loc după cum urmează:

1. În timpul procesului de inițiere, nu se produce coroziune și nu există semne de degradare.
2. După procesul de inițiere, este imprevizibil momentul în care deteriorarea prin coroziune este vizibilă.

Procesul anodic, așa cum este descris chimic mai sus, este o reacție pe oțel în care fierul se dezintegrează. Electronii se deplasează dintr-un loc al oțelului în alt loc, unde există suficient O și H_2O pentru a începe procesul catodic. Cu cât raportul catod-anod este mai mare, cu atât procesul de coroziune este mai rapid (Maage, 2015, p. 223).

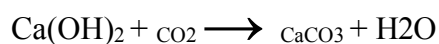
Procesul de coroziune sau "rugină" (Maage, 2015, p. 224):



2.4.11 Carbonatare

În principiu, betonul este un material de construcție foarte alcalin, cu un pH de aproximativ 13,5 - 14,0 (Maage, 2015, p. 219). Acest lucru se datorează produsului de reacție Ca(OH)_2 , care se formează în timpul procesului de întărire a betonului, precum și unor cantități mici de compuși alcalini precum Na_2O și K_2O . Combinația acestor componente duce la formarea de ioni în apa din pori, iar pe suprafața oțelului de armare se formează un strat de oxid - coroziunea nu poate avea loc (Maage, 2015, p. 219).

Atunci când CO_2 pătrunde în beton și reacționează chimic cu componentele menționate, are loc procesul de carbonatare (Maage, 2015, p. 219):



În cazul betonului carbonat, valoarea pH-ului va fi redusă la aproximativ 8,3, iar oțelul de armare nu mai este protejat de pelicula de oxid. Acest proces depinde de umiditatea relativă și se oprește complet la o umiditate mai mică de aproximativ 50%, deoarece nu există suficient conținut de apă în porii betonului pentru ca reacția chimică să aibă loc (Maage, 2015, p. 219).

2.5 Durabilitate și consolidare

(1) Durabilitatea descrie capacitatea unei structuri de a atinge durata de viață prevăzută și de a îndeplini cerințele de utilizare, rezistență și stabilitate, fără o reducere semnificativă a utilității sale sau fără necesitatea unei întrețineri ample și neprevăzute (Standard Norge, 2004, p. 45).

Capitolul 4 - 4.1 Generelt (1) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

(1-2) Pentru a atinge durata de viață proiectată, trebuie avute în vedere proiectarea, selectarea materialelor, detaliile de construcție, execuția, controlul calității, inspecția și documentația în timpul fazei de proiectare (Standard Norge, 2004, p. 47)

Capitolul 4 - 4.3 Krav til bestandighet (1) și (2) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: Un beton orientat spre viitor" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no.

Structurile din beton sunt, de obicei, durabile și își vor îndeplini funcția pentru o perioadă mai lungă decât cea prevăzută, cu condiția ca acestea să fie proiectate și construite corespunzător. Cu toate acestea, au fost observate diverse forme de deteriorare. Cauzele deteriorării sunt relativ bine cunoscute (Maage, 2015, p. 217).

Dacă se analizează diferitele tipuri de deteriorări ale structurilor de beton atât în Norvegia, cât și în majoritatea celorlalte țări din prezent, se constată rapid că deteriorările sunt în mare parte legate de coroziunea armăturilor. Pentru a preveni începerea coroziunii, acoperirea cu beton este esențială (Maage, 2015, pp. 217-226).

2.5.1 Acoperire din beton

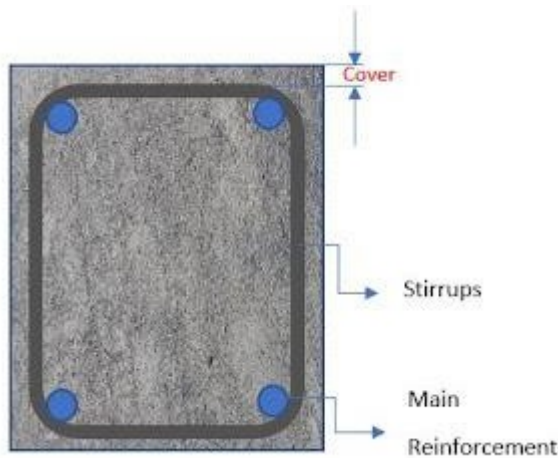


Figura 13: Secțiune transversală a unui stâlp armat (Anre, 2020)

(1-2) Pentru a atinge durata de viață preconizată a unei structuri de beton, trebuie luate măsuri pentru a proteja diferitele componente ale structurii împotriva factorilor de mediu relevanți (Standard Norge, 2004, p. 47).

Capitolul 4 - 4.3 Krav til bestandighet (1) și (2) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: Un beton orientat spre viitor" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

(1) Învelișul de beton este distanța dintre suprafața armăturilor cele mai exterioare și cea mai apropiată suprafață a betonului (Standard Norge, 2004, p. 47).

(2) La proiectarea structurilor de beton în conformitate cu NS-EN 1992-1-1, acoperirea nominală, C_{nom} , este definită ca o acoperire minimă, C_{min} , plus o abatere ΔC_{dev} care trebuie luată în considerare în proiectare (Standard Norge, 2004, p. 47).

Capitolul 4 - 4.4.1.1 Generelt (1) și (2) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

(1-2) Învelișul minim de beton, C_{min} , este destinat să asigure transferul sigur al forțelor prin aderență, protecția oțelului împotriva coroziunii și o rezistență satisfăcătoare la foc (Standard Norge, 2004, p. 48).

Capitolul 4 - 4.4.1.2 Minste overdekning C_{min} (1) și (2) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

(1) Pentru a obține acoperirea nominală, se adaugă la acoperirea minimă prin creșterea acoperirii minime cu valoarea absolută a abaterii negative permise, ΔC_{dev} (Standard Norge, 2004, p. 51).

Capitolul 4 - 4.4.1.3 Tillatte avvik, hensyn ved prosjekteringen (1) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: Un beton orientat spre viitor" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

(2) Acoperire nominală pentru armătură (Standard Norge, 2004, p. 47):

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Unde:

C_{min} - Acoperire minimă, mm

ΔC_{dev} - Abatere admisibilă, mm

C_{nom} - Acoperire nominală, mm

Capitolul 4 - 4.4.1.1 Generelt (1) și (2) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: Un beton orientat spre viitor" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

2.5.2 Armătură minimă

(3) Suprafața minimă de armare, $A_{s, \min}$, este specificată pentru a preveni modurile de rupere fragile, fisurile mari și pentru a absorbi forțele care rezultă din acțiunile impuse (Standard Norge, 2004, p. 151).

Capitolul 9 - 9.1 Generelt (3) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

(1) La armarea betonului în structurile clădirilor, secțiunea transversală (Standard Norge, 2004, p. 151):

$$A_{s, \min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d \geq 0,0013 * b_t * d$$

Unde:

f_{ctm} - Valoarea medie a rezistenței la tracțiune

axială a betonului f_{yk} - Limita de curgere

caracteristică a armăturii b_t - Lățimea medie a

zonei de tensiune

d - Grosimea efectivă a secțiunii transversale, distanța de la linia mediană a armăturii de tracțiune la marginea de compresie.

Capitolul 9 - 9.2.1.1 Minste og største armeringsareal (1) din NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: Un beton orientat spre viitor" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

2.6 BIM, modelarea informațiilor despre clădiri

Building Information Modeling, BIM, este un proces digital utilizat în industria construcțiilor și în inginerie. Un model BIM este un model precis și detaliat al unei clădiri sau al unei infrastructuri. Modelele BIM pot conține toate informațiile relevante pentru un proiect de construcție, inclusiv dimensiuni, materiale, funcții și locație. Modelele BIM pot include, de asemenea, informații privind consumul de energie, costurile, timpul de construcție, exploatarea și întreținerea (Autodesk, s.f.).

2.6.1 Utilizatori de BIM

Toate grupurile profesionale implicate într-un proiect de construcție pot utiliza BIM. Utilizatorii tipici sunt arhitecții, inginerii, antreprenorii și proprietarii de clădiri. BIM face posibilă eficientizarea colaborării și poate contribui la un proiect mai precis și la un produs final mai bun. Arhitecții proiectează, inginerii calculează, designerii de interior vizualizează spațiile și mobilierul, antreprenorii efectuează calcule cantitative, planifică logistica și execută proiectul conform planului, în timp ce proprietarii de clădiri utilizează BIM pentru a supraveghea și controla întreaga fază de construcție (Nordic BIM Group, n.red.).

2.6.2 Standard BIM

NS-EN ISO 19650 este un standard internațional și oferă o descriere a principiilor pentru gestionarea informațiilor utilizând BIM. Este un cadru de administrare și schimb de informații, inclusiv controlul versiunilor și organizarea, pentru toate părțile interesate implicate într-un proiect de construcție (Standard Norge, 2022).

2.6.3 Revit

Revit este un software BIM utilizat de arhitecți și ingineri pentru a crea clădiri și infrastructuri de înaltă calitate. Revit are mai multe aplicații diferite, dar poate fi utilizat pentru a modela forme, structuri și sisteme în 3D cu acuratețe parametrică, precizie și ușurință (Autodesk, s.f.).

2.6.4 Beneficii

Printre beneficiile utilizării modelelor BIM în industria construcțiilor se numără (McKenna Group, n.d.):

- O mai bună comunicare și lucru în echipă.
- Vizualizarea rezultatului în faza de proiectare.
- Conflictele dintre discipline sunt detectate mai eficient și mai ușor.
- Poate minimiza incidentele legate de sănătate și siguranță. Prin semnalizarea zonelor cu risc ridicat și a fazelor de construcție.
- Control mai bun și mai fiabil al bugetului.
- Construcții mai ecologice, prin controlul mai precis al materialelor.

2.7 LCA

Evaluarea ciclului de viață, LCA, este o metodă sistematică de evaluare a impactului asupra mediului și a resurselor de-a lungul ciclului de viață al unui produs sau sistem. LCA este, de asemenea, utilizată ca bază pentru elaborarea declarațiilor de mediu ale produselor, EPD (LCA Norge, n.red.).

LCA este împărțită în două categorii principale: "Cradle-to-Grave" și "Cradle-to-Cradle", cea din urmă fiind preferată. Metodologia LCA examinează toate fazele implicate într-un produs, de la extracția materiei prime, transport, faza de utilizare, până la eliminare sau reciclare (LCA Norge, n.red.).



O EPD descrie impactul asupra mediului al unui produs sau sistem și este documentată într-un

Figura 14: Etapele ciclului de viață al produsului (Evaluarea ciclului de viață, 2020)

raport concis. EPD sunt destinate să ofere o bază mai bună pentru evaluarea impactului asupra mediului, să promoveze dezvoltarea mediului și sunt un instrument important pentru dezvoltarea de produse inovatoare. Acestea ar trebui să fie disponibile publicului, aprobate de o terță parte, comparabile și adiționale pentru a fi utilizate în proiecte mai ample (LCA Norge, n.red.).

2.7.1 Utilizatori de LCA

LCA poate fi utilizată în industria construcțiilor pentru a lua în considerare impactul asupra mediului al diferitelor opțiuni de proiectare sau alternative tehnice și pentru a compara impactul acestora. Acest lucru se face pentru a găsi cele mai ecologice soluții în timpul unui proiect sau pentru a documenta orice impact asupra mediului la livrarea produsului final (Multiconsult, s.f.).

2.7.2 Standard LCA

Cadrul și standardul utilizat pentru efectuarea unei LCA complete este *NS-EN ISO 14040*, iar metodologia pentru analiza în sine este împărțită în principal în 4 componente:

- Inventar - calcularea emisiilor
- Clasificare - clasificarea emisiilor
- Caracterizare - calcularea impactului asupra mediului
- Îmbunătățirea - analiza modului în care ciclul de viață al produsului poate fi îmbunătățite/optimize (LCA Norge, n.red.).

Standardul european pentru elaborarea EPD-urilor pentru clădiri și construcții, *NS- EN 15804*, definește modul în care o companie ar trebui să producă declarații de mediu. Standardul oferă orientări clare cu privire la modul în care întreprinderile din industria construcțiilor ar trebui să efectueze LCA în EPD-uri. Standardul garantează că toate grupurile de produse utilizează aceleași metode LCA pentru a compara EPD-urile (LCA Norge, n.red.).

Regulile privind categoriile de produse, PCR, sunt elaborate ca o completare la *NS-EN 15804* și conțin reguli și condiții suplimentare pentru anumite categorii de produse. Principiul principal al unei PCR este de a determina ce procese și materiale ar trebui să acopere analiza și ce ar trebui să fie definit ca unitate declarată pentru produs. Acest lucru se face astfel încât producătorii să dezvăluie conținutul de substanțe cu impact semnificativ asupra mediului din produsele relevante - pentru a facilita compararea amprentelor de mediu ale mai multor produse din aceeași categorie (LCA Norge, n.red.).

2.7.3 SimaPro

SimaPro este un instrument software inovator utilizat pentru a efectua LCA pentru produse și servicii. Fiind una dintre cele mai importante soluții software LCA din lume, SimaPro este utilizat de companii, consultanți și universități din peste 80 de țări (SimaPro, n.red.). Programul dispune de o vastă bibliotecă de date și informații științifice necesare pentru colectarea, analiza și monitorizarea datelor privind durabilitatea produselor și serviciilor.

Acest lucru facilitează modelarea ciclurilor de viață într-un mod sistematic, fiind în același timp capabil să editeze și să personalizeze diferitele produse care se află deja în baza de date.

Software-ul include o gamă largă de caracteristici care ajută utilizatorii să identifice și să estimeze impactul asupra mediului al unui produs, de la extracția materiei prime până la gestionarea deșeurilor.

Acest lucru îl face un instrument util în industria construcțiilor și a ingineriei, deoarece poate ajuta întreprinderile să înțeleagă și să își îmbunătățească dezvoltarea durabilă (SimaPro, s.f.).

2.7.4 Beneficii

Atunci când se utilizează LCA în stadiile incipiente ale dezvoltării conceptului pentru sisteme sau produse, aceasta permite o evaluare a impactului asupra mediului al diferitelor alternative. Aceasta oferă o modalitate sistematică de documentare și identificare a celor mai ecologice și rentabile soluții pentru un anumit concept. Mai jos este ilustrat principiul unei LCA.

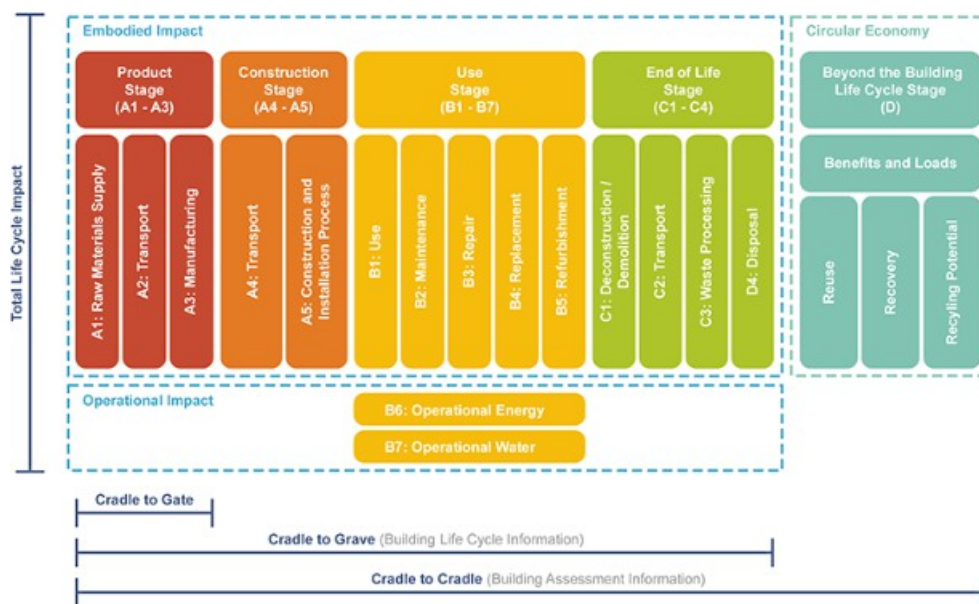


Figura 15: Principiul de structură al LCA (BNP Media, 2021)

2.7.5 GWP - Potențial de încălzire globală

Atunci când se realizează studiul LCA în SimaPro, se utilizează valoarea GWP100.

Aceasta se referă la efectul de încălzire acumulat în raport cu emisiile de CO₂ pe o perioadă de 100 de ani.

GWP este de obicei împărțit în 4 indicatori diferiți:

GWP total: suma transformărilor fosile, biogene și terestre.

GWP fosil: Indicatorul GWP fosil ia în considerare GWP pentru emisiile și sechestrarea gazelor cu efect de seră în toate mediile rezultate din oxidarea sau reducerea combustibililor fosili sau

substanțe fosile care conțin carbon. Aceasta include, de asemenea, sechestrarea sau emisiile de gaze cu efect de seră din materiale anorganice, cum ar fi carbonatarea cimentului.

GWP biogenic: Pe scurt, se referă la CO_2 stocat în material/produs, indicând cantitatea de CO_2 absorbită din atmosferă în timpul creșterii biomasei și emisiile biogene în aer prin oxidarea sau descompunerea biomasei, de exemplu, arderea biomasei.

GWP Transformarea terenurilor: Acesta este indicatorul pentru emisiile și sechestrarea gazelor cu efect de seră CO_2 , monoxid de carbon (CO), tetrahidridă de carbon (CH_4) care rezultă din modificările stocurilor de carbon specificate ca urmare a utilizării terenurilor și a schimbării utilizării terenurilor.

(LCA, n.red.)

3 Cadru

Următoarele manuale și standarde au fost utilizate pentru elaborarea acestei teze:

Standarde	Descriere
HB R210 (Vegdirektoratet, 2014)	Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser constă în descrieri de metode pentru analize de laborator efectuate în cadrul Administrației Drumurilor Publice din Norvegia (Statens Vegvesen). HB R210 se bazează pe standardele actuale.
NS-EN 206 (Standard Norge, 2013)	NS-EN 206 specifică cerințele pentru compoziția betonului și regulile de verificare a proprietăților așteptate.
NS-EN 1992-1-1, EC 2 (Standard Norge, 2004)	Eurocode 2 oferă baza pentru proiectarea structurilor din beton, precum și cerințele privind capacitatea, capacitatea de funcționare, durabilitatea și rezistența la foc.
NS-EN ISO 14040 (Standard Norge, 2006)	NS-EN ISO 14040 descrie principiile și cadrul pentru evaluarea ciclului de viață (LCA), scopul și domeniul său de aplicare.
NS-EN 12350 (Standard Norge, 2019)	Testarea proprietăților betonului proaspăt
ASTM C 1679 - 09 (Standard Norge, 2022)	Măsurarea cineticii de hidratare a amestecurilor de ciment hidraulic prin calorimetrie izotermă

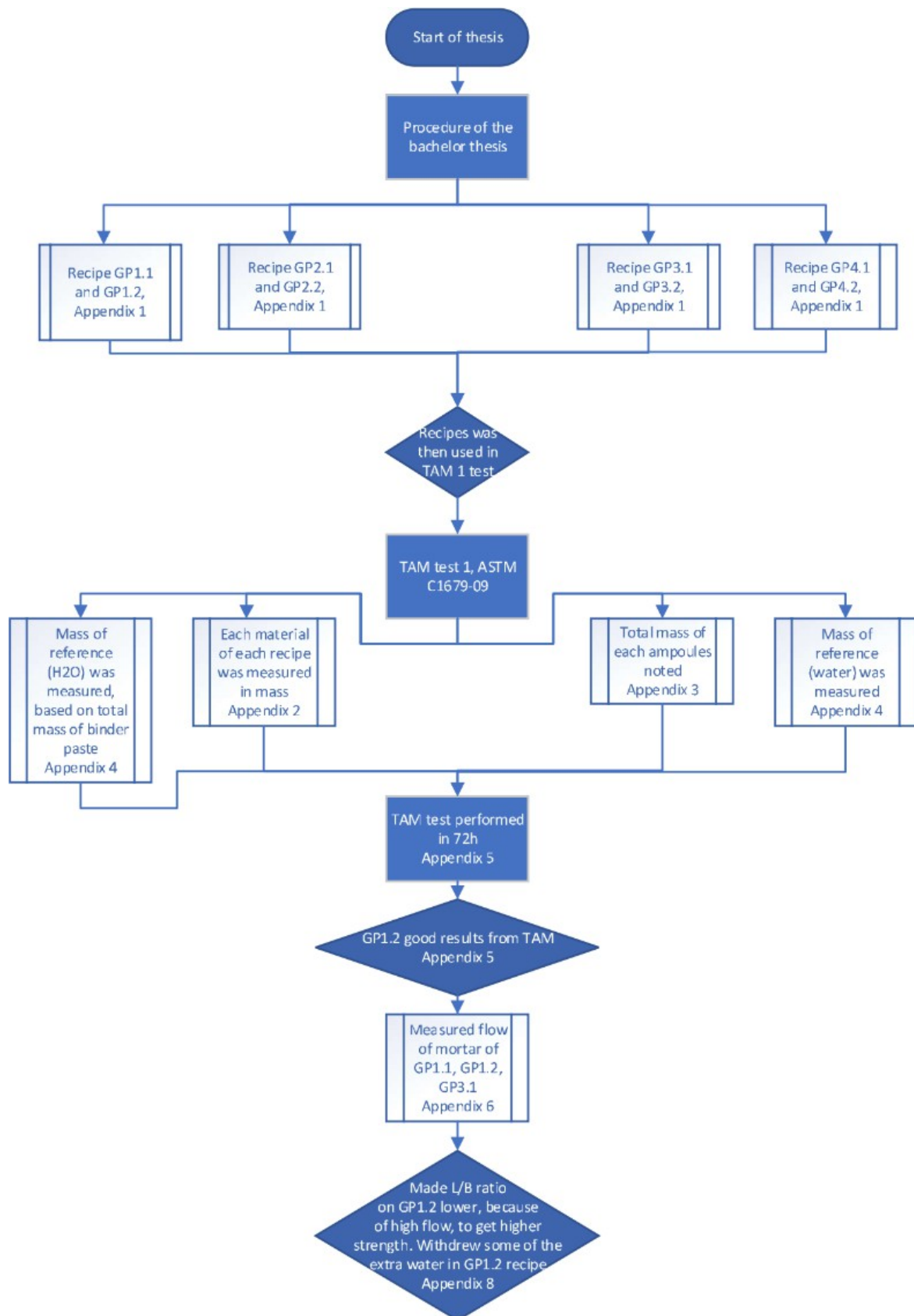
<p>NS-EN 196-3:2016 (Standard Norge, 2016)</p>	<p>Metode de încercare a cimentului - Partea 3: Determinarea timpului de priză și a solidității</p>
<p>NT Build 492 (Nordtest, 1999)</p>	<p>Materiale de reparare pe bază de beton, mortar și ciment: Coeficientul de migrare a clorurilor din experimentele de migrare în regim non-staționar</p>

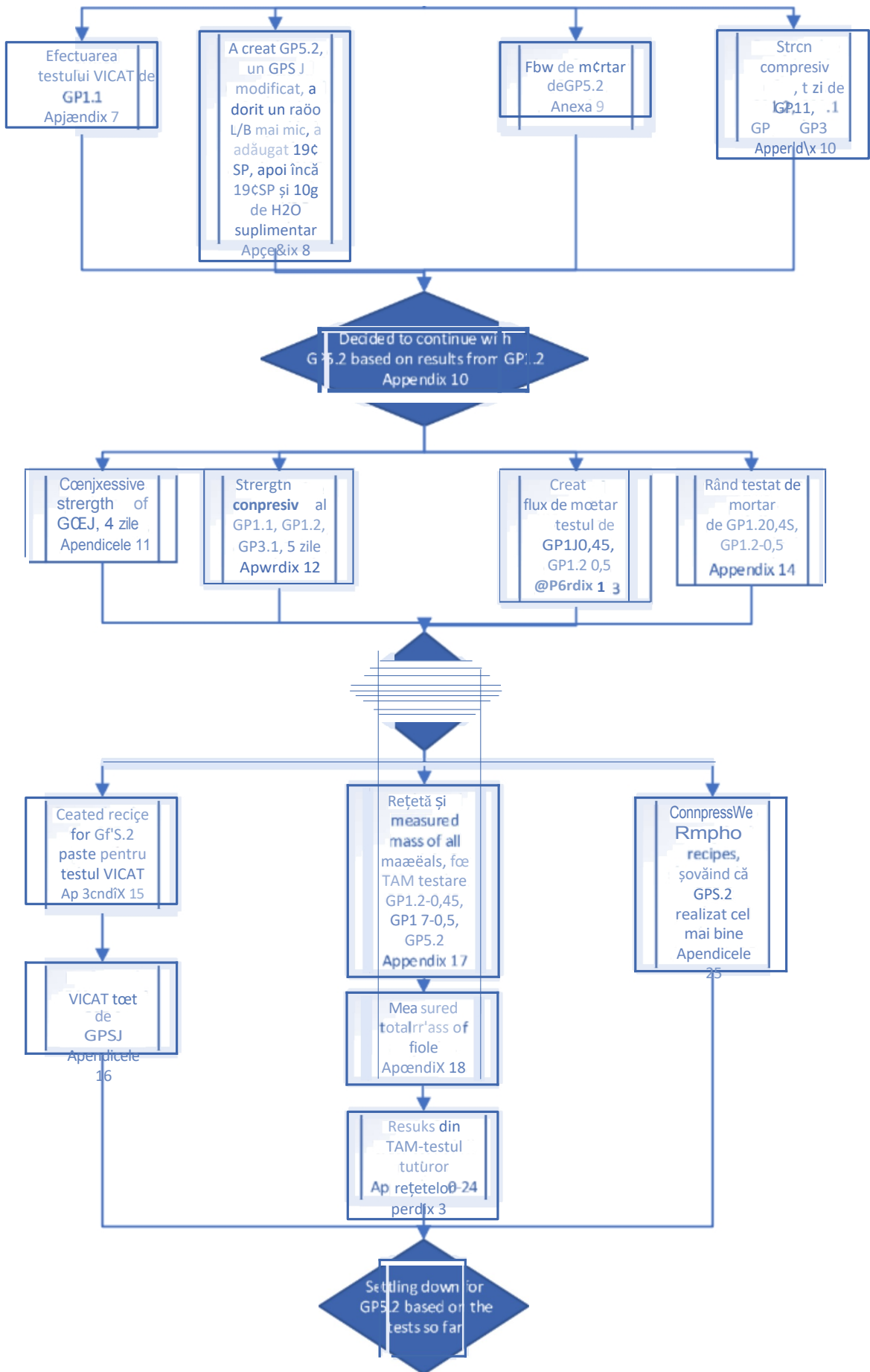
Tabelul 8: Standarde utilizate

4 Metoda

Pentru a obține rezultate comparabile și reproductibile, grupul a utilizat teste și metode standardizate care se bazează pe standarde internaționale oficiale. Acestea vor descrie calitatea și proprietățile rețetei GPC dezvoltate de grup. În acest capitol, vor fi descrise metodele și procedurile utilizate și vor fi incluse imagini ale procedurilor de testare reale. Diagrama de flux de mai jos ilustrează procesul de elaborare a rețetei finale și de extragere a rezultatelor:

Diagrama de flux a dezvoltării rețetei





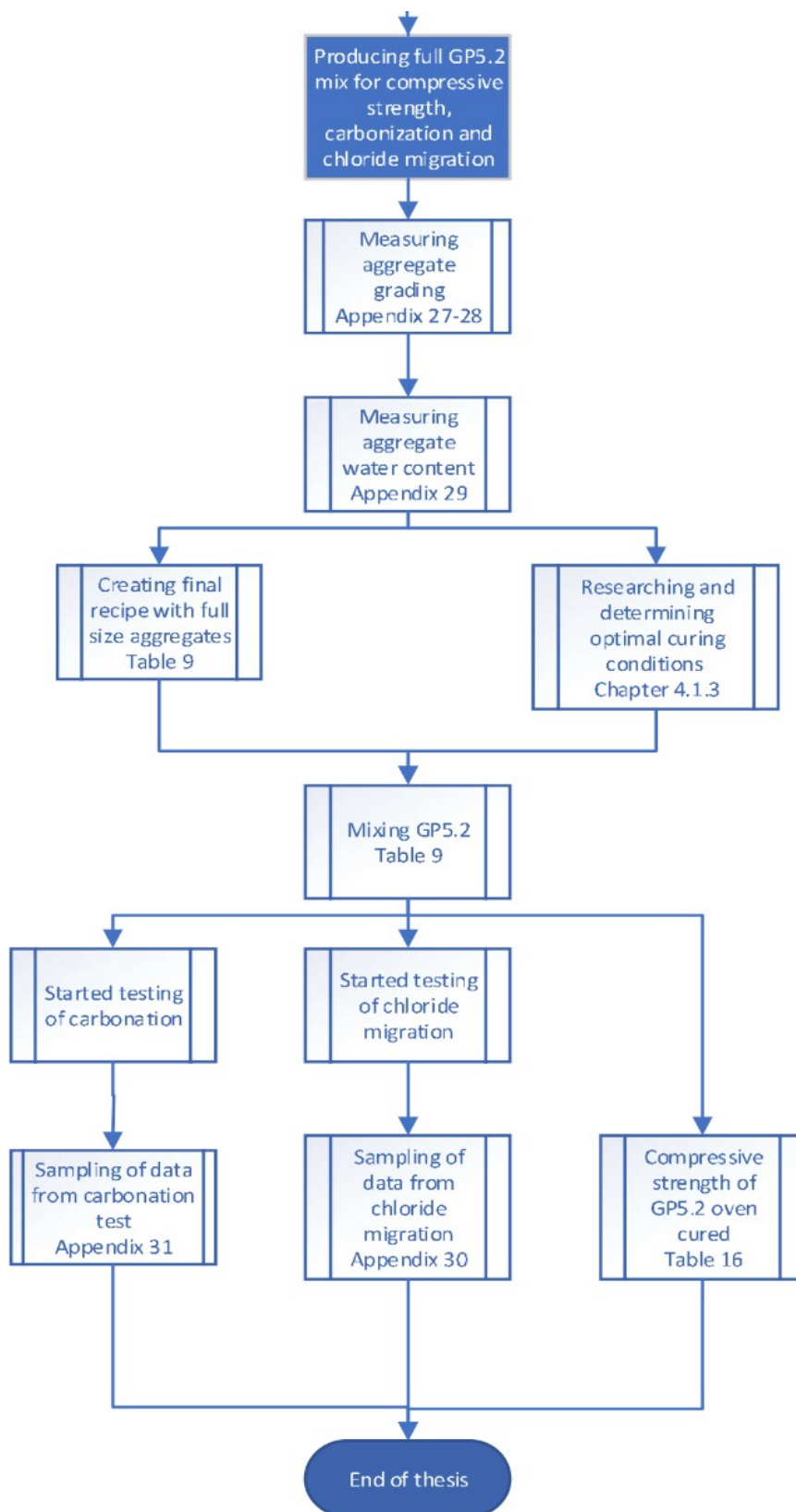


Figura 16: Diagrama de flux a dezvoltării GPC

4.1 Elaborarea rețetei

Există foarte puține standarde disponibile în ceea ce privește rețetele de beton geopolimeric. Consilierul acestui grup dispunea de o rețetă prefabricată, amestecată între două rețete existente, care putea fi testată cu diferite molarități ale soluțiilor alcaline, precum și prelucrabilitatea amestecurilor și, în final, rezistența.

Pe parcursul unei perioade de aproximativ o lună, grupul a lucrat la elaborarea unei rețete de geopolimer. Acest proces a dus la elaborarea a 11 rețete diferite pe care grupul le-a folosit pentru experimentele ulterioare. Grupul a utilizat rezultatele testelor calorimetrice pentru a elimina 8 din cele 11 rețete. Dintre aceste 3 rețete rămase, a fost clar pentru grup că rețeta de beton cu cea mai mare rezistență la compresiune timpurie și cea mai bună lucrabilitate a fost cea pe care se va concentra proiectul, GP5.2.

GP5.2, L/GB = 0,55				
Material	Recipe weight	Actual weight, batch 1	Actual weight, Batch 2	$\frac{kg}{m^3}$
FA	5,472kg	5,472kg	5,472kg	243,2kg
GGBFS	3,648kg	3,646kg	3,648kg	162,1kg
Na ₂ SiO ₃	2,736kg	2,736kg	2,736kg	121,6kg
KOH	1,824kg	1,824kg	1,824kg	81,1kg
Free water	0,3045kg	0,3045kg	0,3045kg	13,5kg
SP	0,177kg	0,177kg	0,177kg	7,9kg
Aggregate 0/8	21,703kg	21,702kg	21,702kg	964,5kg
Aggregate 8/16	17,001kg	17,002kg	17,002kg	755,7kg
L/GB ratio	$\frac{121,6 + 81,1 + 13,5 + 7,9[kg]}{243,2 + 162,1[kg]} = 0,55$			

Tabelul 9: Rețeta și greutatea reală a GP5.2

4.1.2 Dimensiunea agregatelor

Grupul a eliminat fracțiunea de 16-22 mm și a optat pentru 0-8 mm și 8-16 mm, astfel cum se menționează în teoria 2.3.2 Dimensiunea agregatelor. Deoarece una dintre fracțiunile standard este 8-16 mm, grupul a ales-o în loc să creeze o serie proprie de fracțiuni. De asemenea, a fost aleasă reducerea cu 25% a 8-16 mm la 0-8 mm, pentru a se apropia de dimensiunea agregatului sugerată de 10-14 mm.

4.1.3 Amestecarea și întărirea betonului

În timpul producției de beton, grupul a ales să urmeze procedura descrisă în *HB R210 411, "Produsering av betong i laboratorium"*. A fost utilizat un mixer forțat de tip (ZK 50 HE), iar grupul a ales să împartă amestecul dorit în două loturi. Aceste loturi au fost amestecate în aceeași zi, iar abaterile sunt presupuse a fi mici. După amestecare, temperatura lotului a fost măsurată și s-au efectuat următoarele teste, 4.2 Proceduri de testare și turnarea epruvetelor.



Figura 17: Malaxor de beton de tip ZK 50 HE (Pemat)

Turnarea pieselor de testare a fost efectuată în conformitate cu *HB R210 416, "Støping av Prøvestykker"*, cu o mică abatere. După cum s-a menționat anterior, condițiile optime de întărire a GPC sunt între 40-100°C timp de 20 de ore. Prin urmare, grupul a ales să se

abțină de la depozitarea cu plastic timp de 16 ore și, în schimb, să supună betonul proaspăt la 80°C și 20 de ore, iar apoi în condiții ambientale la 20°C într-o cameră cu temperatură strict controlată. La turnare

amestecul GP5.2 dorit, au fost turnate în total 4 cuburi pentru testarea carbonării, 4 cilindri pentru testarea pătrunderii clorurilor și 12 cuburi pentru testarea rezistenței la compresiune la 1, 7 și 28 de zile, jumătate din acestea fiind întărite în cuptor, iar restul la temperatura camerei, 20°C. După 24 de ore, cuburile au fost dezmembrate, iar probele au fost sigilate într-un recipient etanș.

4.2 Proceduri de testare

Următoarele teste sunt alese pentru a determina comportamentul GPC în stadiul proaspăt și în stadiul întărit. Trebuie precizat că timpul disponibil este limitat pentru a efectua toate testele necesare pentru a stabili o propunere definitivă a performanței produsului final din beton.

4.2.1 Conținutul de apă în agregat

La determinarea conținutului de apă din agregate, grupul urmează *HB R210, 121 "Vanninnhold i tilslag"*.

Acest lucru se face prin măsurarea unui bol de agregat umed care urmează să fie testat după ce a fost cântărită o anumită cantitate minimă, după cum se arată în tabelul 10.

Dimensiunea superioară a bobului (D) (mm)	Cantitatea minimă de probe (kg)
< 1	0,2
4	0,8
8	1,6
16	3,2
22	4,4

Tabelul 10: Cantitatea minimă de eșantion din granulația superioară

Proba umedă se cântărește și se introduce într-o etuvă până când se obține o masă constantă. După ce eșantionul este uscat, masa se măsoară din nou.

Formula pentru conținutul de umiditate:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M_3)} * 100$$

Unde:

w- conținutul de apă în %

M₁ - masa probei umede în grame + bol M₂

- masa probei uscate în grame + bol M₃

- masa bolului în grame

4.2.2 Distribuția granulometrică a agregatelor

La determinarea distribuției granulometrice a agregatelor, grupul a urmat metoda din *HB R210, 131 "Sikteanalyse (tørrsikting av vasket materiale)"* de Statens Vegvesen.

Acest lucru se face prin măsurarea unei cantități de agregat, astfel cum se arată în tabelul 11.

Dimensiunea superioară a bobului (D) (mm)	Cantitatea eșantionului (kg)
90	80
63	40
45	20
32	10
22	5

16	2,6
11	1,4
8	0,6
≤4	0,2

Tabelul 11: Cantitatea măsurată de agregat

Agregatul este cernut prin site cu deschideri pătrate timp de 10 minute. Sitele sunt cântărite înainte și după încercare.

Rezultatele se înregistrează prin calcularea reziduului pentru fiecare încercare de cernere, R_1, R_2, \dots, R_n , pe baza cantității totale de eșantion (M_1), apoi prin însumarea acestora.

Valoarea procentuală pentru fiecare dimensiune a particulelor se obține folosind următoarea formulă și se aplică tuturor agregatelor până la 0,063 mm:

$$X_i = \frac{R_i}{M_1} * 100$$

Unde:

R_i - masa în grame a fiecărei
fracțiuni M_1 - masa totală uscată a
eșantionului

Dimensiunea particulelor mai mică de 0,063 mm (agregate fine) este determinată prin următoarea formulă:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100$$

Unde:

M_1 - masa totală uscată a eșantionului
 M_2 - dimensiune a particulelor mai mare de 0,063 mm
după spălare P- material cernut rămas în vasul inferior

4.2.3 Test calorimetric TAM

Comportamentul matricei, în principal timpul de întărire și de răcire, precum și nivelul de hidratare, se determină printr-un test calorimetric. Obiectivul aparatului calorimetric este să niveleze temperatura căldurii emise de probe și să calculeze energia produsă.

Probele sunt adaptate la o masă individuală de referință, m_{ref} , cu o capacitate termică specifică fixă, c . Se înregistrează apoi momentul în care energia este eliberată și cantitatea de energie (Wadsö, 2005).



Figura 18: Aparatul TAM

La efectuarea testului calorimetric, grupul a calculat masa exactă a fiecărui eșantion de testare utilizând formula pentru capacitatea calorică specifică.

Formula pentru capacitatea termică specifică este (The Engineering Toolbox, n.d.):

$$c = \frac{Q}{m * \Delta T}$$

Unde:

c - capacitatea termică specifică,

J/(kgK) m - greutatea masei, kg

ΔT - rata de schimbare a

temperaturii, K Q- energie, J

Următoarele valori ale capacității termice, furnizate de unul dintre consilieri, au fost utilizate pentru a calcula masa de referință pentru fiole:

Capacitatea termică	Valoare (J/Kg*K)
Cslag	1,05
CFA	0,72
Cpw	4,18
CNa ₂ SiO ₃	0,92
CNaOH	0,7
CKOH	1,174

Tabelul 12: Valori ale capacității termice

Grupul a măsurat apoi apa pentru ampulele de referință și a amestecat pasta de ciment pentru geopolimer în ampulele de probă, le-a sigilat și a început testul TAM. Masa ampulelor a fost calculată la aproximativ 6 g din masa totală a fiecăreia pentru a simplifica rutina de testare.

Procesul TAM a inclus un total de 11 modificări diferite ale geopolimerului și a procesat informații timp de 72 de ore. Grupul a obținut apoi rezultatele de la computerul conectat la cameră, sub formă de diagrame. Diagramele au ilustrat producția de căldură în timp.

După cum arată figura de mai jos, **P** reflectă **rata** procesului, iar **Q** reflectă **amplourea** procesului.

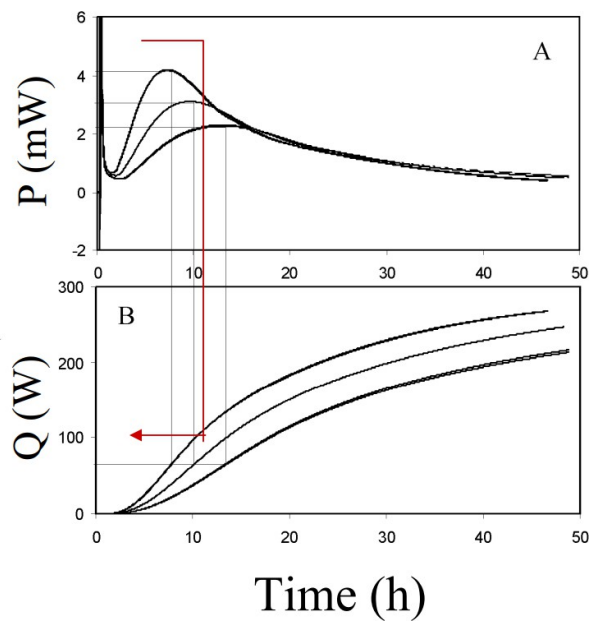


Figura 19: Rata vs. amploarea procesului (Wadsö, 2005)

4.2.4 Timpul inițial și final de întărire a pastei de ciment, VICAT

Cu ajutorul aparatului automat Vicat, "Vicatronic Automatic Vicat Recording Apparatus", se determină timpul de întărire inițial și final al pastei de geopolimer.



Figura 20: Aparat automat de înregistrare Vicatronic Vicat (MATEST, n.red.)

Urmând procedura de testare descrisă în *NS-EN 196-3*, cerința pentru cameră este de $(20^{\circ}\text{C} \pm 2)$ și nu mai puțin de 90% umiditate relativă. Sonda a fost așezată în cădere liberă, iar următorii parametri au fost măsurați în timpul testului (MATEST, n.red.):

- Interval de timp: 5 min
- Timp total: 420 min
- Calibrare: 0 mm și 40 mm

4.2.5 Test de alunecare

Conform procedurii descrise în *HB R210, 412 Konsistens; synkmål*, grupul a determinat consistența betonului geopolimer proaspăt. Testul de tasare măsoară distanța dintre partea superioară a conului de tasare și punctul cel mai înalt al betonului după ce conul a fost ridicat și deplasat, după cum se arată în figura 21.

Baza este hidratată, iar conul este umplut cu trei straturi de grosime aproximativ egală în timp ce este ținut pe bază. Fiecare strat este compactat cu 25 de lovituri ale unei tije de oțel înainte de umplerea stratului următor. După compactarea celui de-al treilea strat, betonul este reumplut astfel încât să fie la același nivel cu suprafața conului.

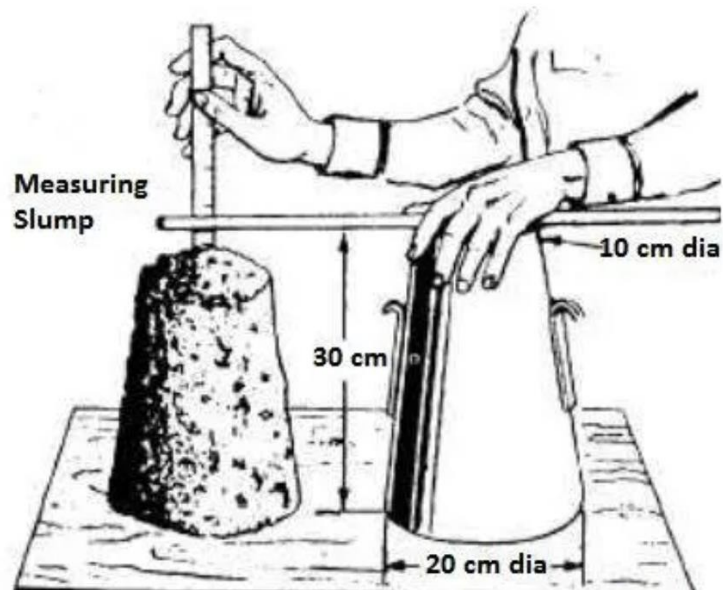


Figura 21: Tabelul de testare a alunecării (Mishra, n.red.)

Grupul a efectuat testul de alunecare, iar măsurătorile au fost derivate. Testul de slăbire este prezentat în figura 22 de mai jos.



Figura 22: Fluxul noroiului în creație

4.2.6 Test de curgere

În același timp cu efectuarea testului de înclinare, grupul a măsurat și răspândirea amestecului geopolimeric. Acest lucru se face în conformitate cu procedura descrisă în *NS-EN 12350-8: Testing fresh concrete, Part 8: Beton autocompactant - Încercare de curgere*. GPC dezvoltat de grup este clasificat drept beton autocompactant, SCC, datorită adaosului de superplastifiant.

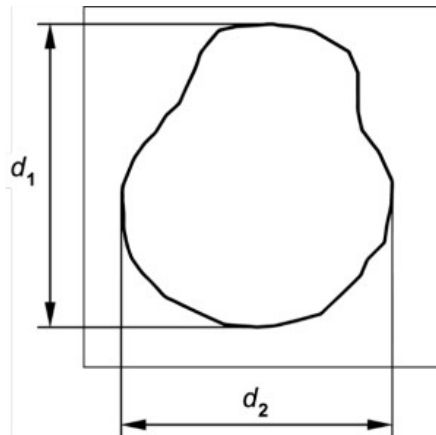


Figura 23: Extinderea fluxului (Standard Norge, 2019)

Figura 4 Komprimeringsstøter din NS-EN 12350-5:2019 este reprodusă de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

Fluxul de alunecare este media dintre d_1 și d_2 , exprimată la cea mai apropiată 10 mm, dată de formula (Standard Norge, 2019):

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Unde:

SF- este fluxul de alunecare; mm

d_1 - este cel mai mare diametru al distribuției

debitului; mm d_2 - este diametrul de răspândire a

debitului la 90° față de d_1 ; mm

Capitolul 8 Prøvningsresultat formel og tekst din NS-EN 12350-5:2019 este reprodus de B23B02 în teza "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" sub licență de la Standard Online AS mai 2023. Standard Online nu oferă nicio garanție cu privire la corectitudinea reproducerii. A se vedea www.standard.no

4.2.7 Conținutul de aer

La determinarea conținutului de aer din GPC, se aplică metoda 415 "Luftinnhold, trykkmetoden", descrisă în *HB R210* de Statens Vegvesen. Aceasta se realizează cu



ajutorul unui aparat de măsurare a aerului calibrat, prezentat în figura 24.

Figura 24: Instrument de măsurare a conținutului de aer, controlul conținutului de aer din betonul proaspăt (Vegdirektoratet, 2014)

În timpul procedurii, se adaugă trei straturi de beton în container, fiecare strat fiind prelucrat cu 25 de lovituri ale unei tije de oțel. Materialul în exces este îndepărtat din container, iar atunci când partea superioară este asamblată, se deschid supapele sferice. Se adaugă apă la una dintre supapele sferice până când aceasta curge prin supapa opusă, fără bule de aer. Manometrul este ținut ușor înclinat pentru a permite aerului de sub capac să iasă, iar apa este adăugată după cum este necesar.

Supapa de reglare este închisă înainte de creșterea presiunii, iar manometrul este reglat la zero. Robinetele sferice sunt apoi închise, iar conținutul de aer al GPC este citit atunci când manometrul s-a stabilizat. Conținutul de aer este exprimat în procente cu o zecimală (Vegdirektoratet, 2014).

4.2.8 Densitate

În metoda de testare *HB 210, 422 Densitet*, densitatea betonului întărit este determinată după imersia în apă. Din cauza întăririi în mediu ambiant și a întăririi termice a betonului geopolimeric, grupul a ales să determine densitatea uscată prin măsurarea masei și a volumului. Densitatea, ρ , este definită ca raportul dintre masa unei probe de beton date și volumul acesteia și este exprimată în conformitate cu Statens Vegvesen (Vegdirektoratet, 2014):

$$\rho = \frac{m1}{V}, \text{rotunjit la cel mai apropiat } 10\text{kg/m}^3$$

ρ - densitatea, (kg/m)³
m1- greutate, (kg)
V- volum, (m)³

4.2.9 Test de rezistență la compresiune

Metoda de încercare 1, de la *punctul 14.631 din HB-R210 Laboratorieundersøkelser*, descrie procedura pe care grupul o desfășoară pentru încercarea rezistenței la compresiune a epruvetelor turnate. Scopul acestei metode de încercare este de a determina rezistența la compresiune (f_c) a epruvetelor relevante.

Următoarele orientări și standarde sunt respectate în timpul efectuării testării rezistenței la compresiune:

- *NS-EN 12390-3: Încercarea betonului întărit - Partea 3: Rezistența la compresiune a epruvetelor.*
- *NS-EN 12390-1: Încercarea betonului întărit - Partea 1: Forma, dimensiunile și alte cerințe pentru epruvete și matrițe.*

Rezistența la compresiune descrie capacitatea betonului de a rezista solicitărilor care duc la fisurare și/sau deformare.

În cadrul procedurii de testare, epruvetele relevante sunt scoase din baia de apă/recipientul

de turnare cu cel puțin o jumătate de oră înainte de testare și sunt uscate de apa de suprafață liberă. Ulterior, densitatea uscată și dimensiunile epruvetelor sunt măsurate cu ajutorul unui

etrier glisant.

Este important să se verifice unghiul dintre marginile laterale ale suprafeței de presiune cu ajutorul unui pătrat. Încercarea la compresiune se efectuează în timp ce epruvetele sunt umede la suprafață și sunt plasate central în aparatul de încercare la compresiune.

Eșantionul este supus în mod continuu unei sarcini aplicate central cu o creștere a presiunii de $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa}$, în conformitate cu *NS-EN 3668*. Rezistența la compresiune pe epruvetă este atunci înregistrată. Această procedură se repetă după 1, 7 și 28 de zile pentru a documenta evoluția rezistenței la compresiune a betonului respectiv.

Pentru epruvetele turnate, suprafața de compresiune se calculează pe baza dimensiunilor nominale ale matriței dacă dimensiunile măsurate ale epruvetei nu deviază cu mai mult de $\pm 1,0 \%$. Rezistența la compresiune este raportată în MPa cu o zecimală.

Rezistența la compresiune (f_c) a betonului se exprimă în MPa, cu o zecimală, și se calculează folosind formula (Vegdirektoratet, 2014):

$$f_c = \frac{F}{a}$$

Unde:

a- suprafața de presiune a probei, mm²

F- forța centrică aplicată, N

4.2.10 Test rapid de permeabilitate la clorură

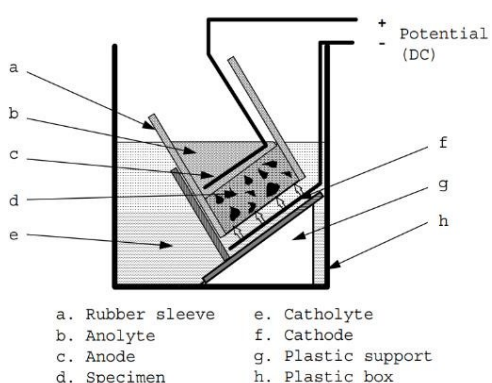


Figura 25: Configurația testului real, RCPT

Figura 26: Configurația testului, RCPT (Nordtest, 1999)

În conformitate cu *NT Build 492*, *testul de permeabilitate rapidă la cloruri (RCPT)* este efectuat pentru a testa rezistența la penetrarea clorurilor, indicând astfel durata de viață a unei probe de beton. Proba de beton este fie turnată într-o formă cilindrică, fie perforată cu un diametru de 100 mm și o grosime de cel puțin 160 mm în cazul turnării și de 100 mm în cazul perforării. Cilindrul este apoi tăiat la 50 mm grosime și se aplică epoxid pe pereții laterali ai cilindrului. Acest lucru are rolul de a permite lichidelor să intre doar la capetele cilindrului. Un manșon de cauciuc este apoi montat în cilindru, astfel încât marginea să fie la același nivel cu suprafața probei.

Catolit și anolit:

- Catolitul constă în soluție de clorură de sodiu (NaCl) 10% (100 g NaCl în 900 g apă distilată).
- Anolitul constă în soluție de NaOH 0,3 N (12 g NaOH în 1 l apă distilată), apendicele 30.

Soluțiile sunt apoi depozitate la temperatura stabilită de 20-25°C.

Catodul este plasat pe un suport din plastic în interiorul unei cutii din plastic. Proba cu manșon, este apoi scufundată în catolit și plasată pe suportul din plastic imprimat 3D. Anolitul este apoi turnat în interiorul manșonului de cauciuc, cu o carcasă cilindrică din PVC. Catodul și anodul sunt apoi conectate la o tensiune continuă, cu o constantă de 10 V

Și un curent

de 0,22 Ah timp de 24 de ore, după cum se vede în tabelul de mai jos.

Table 1. Test voltage and duration for concrete specimen with normal binder content.

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Tabelul 13: Tensiunea și durata încercării (Nordtest, 1999)

Eșantioanele sunt apoi supuse la două lichide, anolitul și catolitul, respectiv NaCl și NaOH, pe o perioadă de 24 de ore. După perioada de 24 de ore, grupul taie, curăță și usucă suprafața probei și așteaptă 15 minute înainte ca nitratul de argint să fie pulverizat pe tăietura centrală proaspătă a cilindrului. Nitratul de argint ($AgNO_3$) va lăsa o linie strălucitoare de culoare albă în geopolimer, care specifică locul în care clorura a pătruns în probă. Acest lucru va indica nivelul de penetrare și nivelul la care ar trebui să fie acoperirea cu beton, pentru a proteja suficient armăturile metalice. Figura de mai jos prezintă procedura de măsurare a penetrării clorurilor. Grupul măsoară adâncimile de la x_{d1} la x_{d7} .

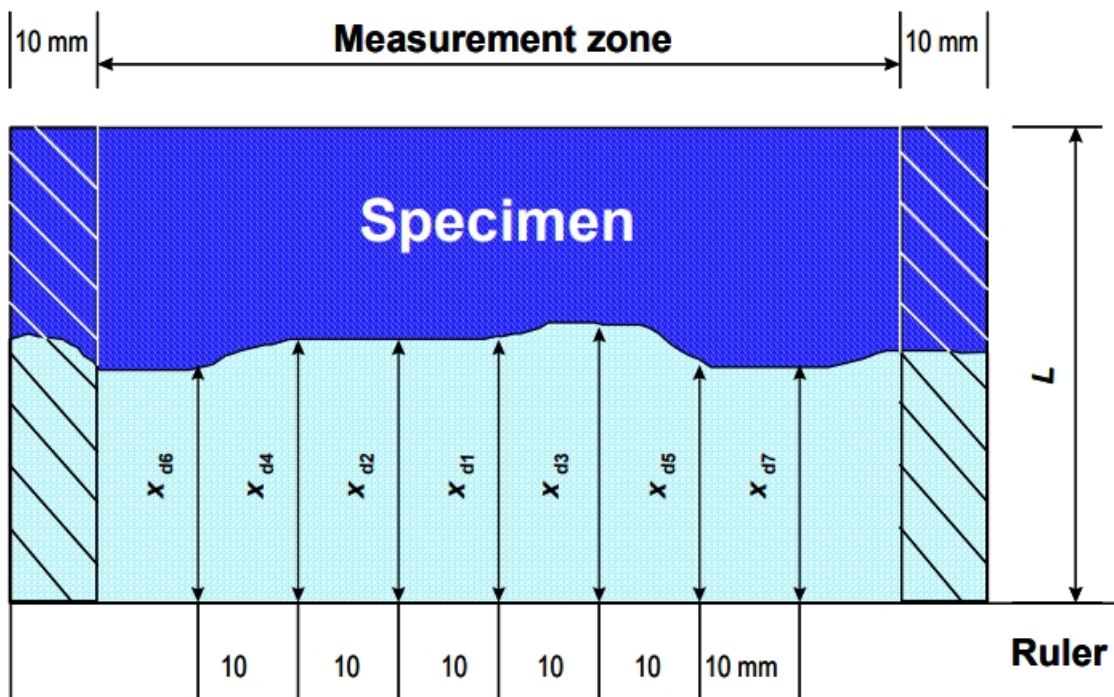


Figura 27: Ilustrație a măsurării adâncimii de penetrare a clorurilor (Nordtest, 1999)

Următoarea imagine arată specimenul utilizat în test care începe să prezinte linia albă care indică adâncimea de penetrare a clorurii:



Figura 28: Adâncimea de penetrare a clorurii începe să devină vizibilă după utilizarea $AgNO_3$

Coeficientul de migrație în regim non-staționar, D_{nssm} , se determină prin următoarea formulă:

$$D_{nssm} = 0,0239 \frac{(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(1 - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right)$$

Unde:

D_{nssm} - Coeficient de migrație în stare nestaționară, $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

U - Valoarea absolută a potențialului extern aplicat între cei doi electrozi, V

T - Valoarea medie a temperaturilor inițială și finală în anolit, $^{\circ}\text{C}$

L - Grosimea specimenului, mm

x_d - Valoarea medie a adâncimilor de

penetrare, mm t - Durata încercării, ore

Deoarece nu există încă criteriile de acceptare pentru coeficientul de difuzie a clorurilor, a fost elaborat un set de valori sugerate ca orientare privind coeficientul de migrare a clorurilor, D_{nssm} , măsurat prin testul RCM. Aceste valori se bazează pe dezvoltarea lui Tang și Nilsson în 1992, care a fost standardizată prin NT Build 492 al NORD în 1999. Următoarele valori sunt apoi o sugestie bazată pe ultimele două dezvoltări, elaborate în 2013 (Dhanya, Santhanam, Pillai și Gettu, 2014, p. 7).

Category	Wenner Resistivity (k Ω cm)	Total charge passed (Coulombs)	Non-steady state migration coefficient $\times 10^{-12}$ (m^2/s)
Excellent	> 50	<1000	<8
Good	10-50	1000-2000	8-16
Moderate	10-50	2000-4000	16-24
Poor	<10	>4000	>24

Tabelul 14: Criterii de clasificare a rezistenței la clorură pentru beton (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, p. 13)

4.2.11 Adâncimea de carbonatare

Înainte de testarea adâncimii de carbonatare sau de determinarea frontului de carbonatare, epruveta de beton trebuie stocată într-un nivel concentrat de CO_2 cu ajutorul incubatorului de laborator Sanyo Model MCO-17AIC. Perioada de depozitare în CO_2 a fost stabilită la 14 zile, cu un nivel de CO_2 de aproximativ 5% la o temperatură de 30°C .

Acest lucru se face pentru a accelera carbonatarea specimenului de beton în vederea obținerii unui rezultat utilizabil.

Din cauza unei scurgeri în incubatorul menționat, timpul se scurgea, iar grupul a decis o soluție de rezervă: să calculeze cantitatea de gheață carbonică, CO₂ în formă solidă, care ar putea înlocui nivelul de CO₂ controlat manual furnizat prin ventilație folosind legea gazului ideal și să stocheze speci­me­nele într-un nou incubator fără ventilație, *Votsch VCL 4003*.

Parametrii noi pentru depozitarea speci­menului de beton sunt: 14 zile, aproximativ 5% CO₂-, 20% umiditate și o temperatură de 20°C.

Calcularea cantității de CO₂ echivalentă cu 5% în noul incubator fără ventil de alimentare cu gaz CO₂ utilizând legea gazului ideal:

$$pV = nRT$$

Unde:

p- presiune, 101 kPa

V - Volum, litru/m³

n- cantitatea de substanță, mol

R- constanta gazului, R=0,082058

(L*atm)/(K*mol) T- temperatura, K

După ce cele 14 zile de carbonatare s-au încheiat, probele au fost scoase din echipament. După divizarea cuburilor, acestea au fost supuse unui indicator de pH, fenolftaleina. Indicatorul de pH a constat din 1% fenolftaleină (C₂₀H₁₄O₄), în apă. Apoi, indicatorul a fost pulverizat pe suprafața divizată a speci­menului - generând o zonă de culoare violet aprins pentru a trasa o linie între GPC carbonat și necarbonat. Apoi grupul a măsurat adâncimea prin următoarea metodă (Atiș, 2003):

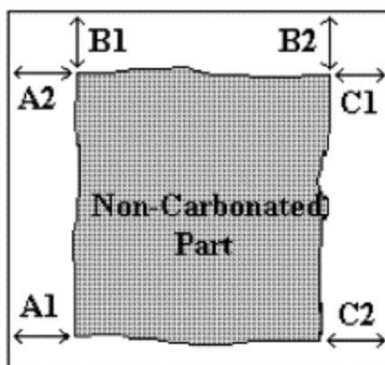
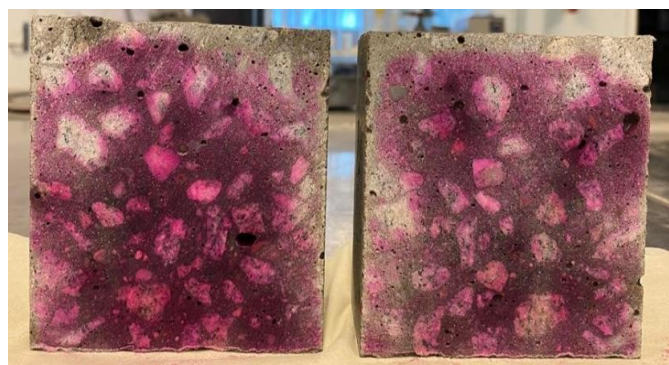


Figura 30: Principiul de măsurare a carbonării



accelerate, (Atiș, 2003)

Figura 29: Suprafața carbonată

Adâncimea de carbonatare D se calculează prin:

$$D = \frac{A1 + A2 + B1 + B2 + C1 + C2}{6}$$

Unde:

D- media celor 6 zone măsurate.

Există foarte puține teste standardizate care abordează testarea prin carbonare accelerată și modul în care ar trebui documentate rezultatele. Prin urmare, grupul alege să compare rezultatele propriilor teste cu rezultatele testelor documentate în (Atiș, 2003), concentrându-se pe CEM-II/A- S 42.5N datorită asemănărilor sale cu rețeta de geopolimer dezvoltată de el însuși (Atiș, 2003).

5 Rezultate

La revizuirea proprietăților GP5.2, grupul s-a concentrat în primul rând pe lotul călit în cuptor, datorită diferenței semnificative dintre proprietățile de călire bazate pe studiul literaturii.

Rezultatele sunt discutate în următoarele subsecțiuni.

5.1 Geopolimer

Grupul a elaborat în total 11 rețete, deși a fost utilizată o singură rețetă pentru restul cercetării, tabelul 9. Această rețetă a fost testată din diferite puncte de vedere, atât în stare proaspătă, cât și vindecată. Durabilitatea a fost, de asemenea, testată cu teste de clorură și carbonatare. Tabelul de mai jos, Tabelul 15, prezintă rezultatele rețetei alese de grup. GP5.2 a fost fabricat în două loturi, 22.03.23.

Rezultatele GP5.2 (întărite în cuptor, 80°C, 20 de ore)		
Proprietăți proaspete		
Procedura de testare	Valoare	Numărul anexei/tabelului
Raportul L/GB		0,55
Prăbușire		260mm
Flux		555mm
Temperatura		34,3°C
TAM		<i>Apendicele 20-24</i>

Vicat	Timp de setare inițială: 2h Timp de setare finală: 3h	<i>Anexa 16</i>
Conținutul de aer	2,9%	
Dimensiunea agregatelor	0-8mm și 8-16mm	<i>Teorie capitolul 2.3.2 dimensiunea agregatelor</i>
Conținutul de apă agregat	Nisip = 0,25% Pietriș = 0%	<i>Anexa 29</i>
Clasificarea granulometrică a agregatelor	<p>Fracție de pietriș:</p> <p><8mm = 6%</p> <p><10mm = 18%</p> <p><12,5mm = 26%</p> <p><16mm = 33%</p> <p><20mm = 16%</p> <p><25mm = 0%</p> <p><25mm = 0%</p> <p> </p> <p>Fracția de nisip:</p> <p><0,125mm = 5%</p> <p><0,25mm = 12%</p> <p><0,5mm = 25%</p> <p><1mm = 23%</p> <p><2mm = 15%</p> <p><4mm = 8%</p> <p><8mm = 8%</p> <p>>8mm = 3%</p>	<i>Curbele de sită sunt prezentate în: Apendicele 28 pentru pietriș Apendicele 27 pentru nisip</i>

Tabelul 15: Rezultatele GP5.2

La investigarea proprietăților proaspete ale betonului geopolimer, grupul a utilizat metode de testare standardizate bazate pe cele utilizate pentru betonul tradițional. Această abordare

poate duce la discrepanțe necunoscute, deoarece nu există metode standardizate pentru testarea betonului geopolimer în acest moment. Cu toate acestea, se presupune că eventualele discrepanțe nu sunt semnificative.

Examinând doar raportul de masă al GP5.2, proprietățile acestuia corespund celor ale unui beton clasificat ca B30, M60 (Maage, 2015, p. 156). Rezistența caracteristică a acestui beton este de 30 MPa, care este semnificativ mai mică decât rezistența obținută de GP5.2.

Proprietățile de lucrabilitate sunt esențiale atunci când se investighează proprietățile în stare proaspătă ale betonului, inclusiv capacitatea acestuia de a curge și de a umple formele și matrițele. În cadrul testării GP5.2, rezultatul testului de înclinare este S5, după cum se arată în tabelul 4, iar rezultatele testului de curgere sunt SF1, după cum se arată în tabelul 5. Aceste rezultate indică faptul că GP5.2 obține proprietăți bune de lucrabilitate.

După cum se observă din rezultatele testului Vicat din apendicele 16, timpul de întărire inițială a GP5.2 este de 2 ore, iar timpul de întărire finală este de 3 ore. Acest lucru se datorează temperaturii ridicate a GP5.2 în timpul turnării. La întărirea GP5.2 în cuptor, există o diferență semnificativă în dezvoltarea rezistenței ridicate timpurii comparativ cu GP5.2 întărit în mediu ambiant.

Atunci când evaluează rezultatele calorimetriei izoterme, grupul examinează relația dintre rata (P) și amploarea (Q) procesului. În timpul primei runde de teste TAM, grupul a selectat GP1.2 pe baza celui mai bun rezultat cu cea mai mare valoare Q și o valoare P simultan ridicată, dar întârziată, astfel cum se menționează în 4.2.3 Test calorimetric TAM, prezentat în apendicele 5. Printr-o rețetă modificată bazată pe GP1.2, pentru a obține o rezistență timpurie mai mare, grupul a optat pentru rețeta GP5.2 - cu un raport L/GB mai scăzut și cu SP inclus, care satisface proprietățile dorite, apendicele 8.

În cazul betonului obișnuit, conținutul de aer fără materialul L este de obicei de aproximativ 2%. Cu toate acestea, este o practică obișnuită creșterea conținutului de aer la $5 \pm 1,5\%$ pentru a proteja betonul de degradarea cauzată de expunerea la îngheț (Maage, 2015, p. 111). Pe baza acestui fapt, grupul a concluzionat că GP5.2 cu un conținut de aer de 2,4% satisface conținutul tipic de aer, dar agenții de antrenare a aerului pot fi necesari pentru a crește rezistența la îngheț a betonului.

La dezvoltarea geopolimerilor, proprietățile de întărire sunt, de asemenea, un factor

important care afectează aplicațiile lor, iar rezultatele testelor privind aceste proprietăți vor fi discutate în secțiunea următoare.

Proprietăți de întărire, (vulcanizat în cuptor la 80°C, 20 ore)		
Specificații cub	Densitate uscată	Valoare
1 zi, cub 1 23.03.23	$2365,3 \frac{kg}{m^3}$	$81,4 \frac{N}{mm^2}$
1 zi, cub 2 23.03.23	$2393,1 \frac{kg}{m^3}$	$84,5 \frac{N}{mm^2}$
7 zile, cub 1 29.03.23	$2371,0 \frac{kg}{m^3}$	$91,3 \frac{N}{mm^2}$
7 zile, cub 2 29.03.23	$2388,2 \frac{kg}{m^3}$	$88,3 \frac{N}{mm^2}$
28 de zile, cub 1 19.04.23	$2325,6 \frac{kg}{m^3}$	$90,2 \frac{N}{mm^2}$
28 de zile, cub 2 19.04.23	$2382,4 \frac{kg}{m^3}$	$90,3 \frac{N}{mm^2}$
Test rapid de migrare a clorurilor	D_{nssm} , coeficientul de migrație în regim non-staționar	Numărul anexei
Cilindru 1, diametru 100 mm, înălțime 50,6 mm	$15,39 * 10^{-12} \frac{m^2}{s}$	30

Test rapid de carbonatare	Densitate uscată	Adâncimea de carbonatare	Numărul anexe
28 de zile, cub 1 (CO ₂)	$2375,3 \frac{kg}{m^3}$	2,946mm	31
28 de zile, cub 2 (CO ₂)	$2376,5 \frac{kg}{m^3}$	4,833mm	31

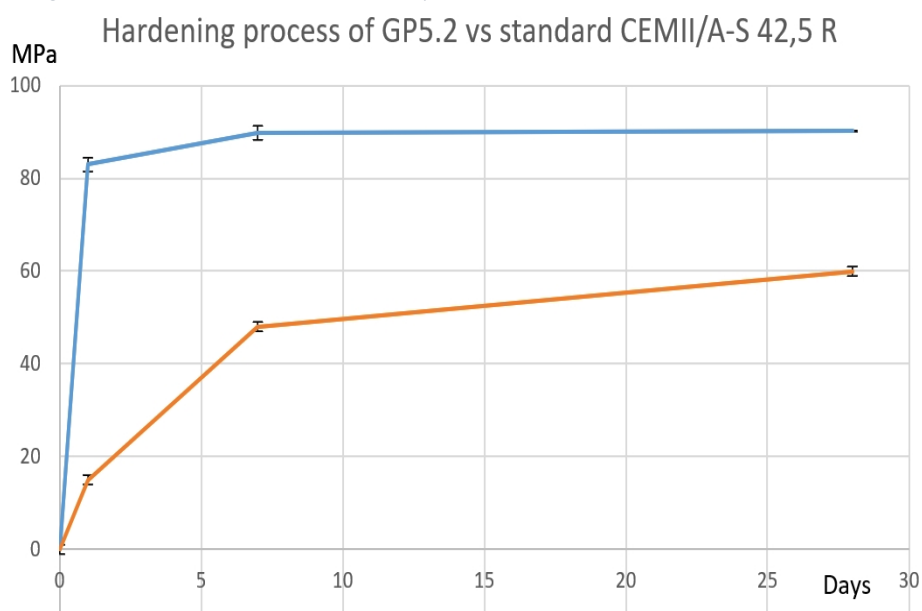
Tabelul 16: Proprietăți întărite

După cum se arată în figura 31 și în tabelul 16, rezistența timpurie a betonului GP5.2, atunci când este polimerizat în cuptor, este relativ ridicată, dar evoluția rezistenței este foarte stagnantă. După cum se vede în apendicele 26, rezistența betonului GP5.2 după o zi de întărire în mediu ambiant a fost cea mai scăzută,

12,9 MPa, în timp ce betonul GP5.2 vulcanizat în cuptor a fost la cel mai scăzut nivel, 81,4 MPa. Acest lucru se datorează faptului că rata de hidratare depinde puternic de nivelul de temperatură, 2.3.3 Amestecarea și întărirea betonului și modificarea distribuției granulometrice a FA la temperaturi ridicate, 2.2.2 Geopolimerul ca liant.

Rata de întărire a GP5.2 comparativ cu CEM - II/A-S 42.5R (Cemmac, n.red.):

Figura 31: Procesul de întărire a GP5.2 și CEMII/A-S 42.5 R



Capacitatea GP5.2 de a rezista la penetrarea clorurilor este indicată de valoarea D_{nssm} , calculată la $15,39 * 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$, appendicele 30, și de adâncimea medie de penetrare a clorurilor x_d de 12,4

mm. Acest rezultat este considerat "bun", ceea ce indică faptul că GP5.2 poate fi un beton adecvat

pentru clase de expunere exigente, tabelul 14. Acest lucru este foarte de dorit, deoarece "Modellageret", pentru care a fost destinat peretele modulului menționat la punctul 5.2, sunt expuse la clorurile din aer provenite din apa de mare din Glomma.

În timpul testului privind adâncimea de carbonatare pe GP5.2, adâncimea de carbonatare a fost măsurată pe 2 epruvete. Unul dintre specimene a atins o adâncime calculată (D) de 2,95 mm, în timp ce celălalt a atins o adâncime de 4,83 mm, appendicele 31 și figura 29. Comparând aceste rezultate din tabelul 17 de mai jos, grupul poate concluziona că cele mai slabe rezultate ale GP5.2 pentru rezistența la carbonatare sunt mai bune decât modelele de amestecuri M0-M4 (Atiș, 2003), RH=65%, 20°C, pe baza faptului că testul a fost efectuat în condiții ideale. Comparația a fost făcută și cu același proiect de amestec, dar la RH=100%. Aici, GP5.2 se comportă mai bine decât M0-M3 la cel mai slab rezultat, dar doar mai rău decât M4 cu cel mai bun rezultat. Acest lucru sugerează că un RH mai ridicat duce la o rezistență mai bună la penetrarea carbonării.

Table 5. Accelerated carbonation depth (mm) of concrete cured at 100% RH with 20 °C

Mix Name	3 days	7 days	28 days	3 months
M0	9.10	7.40	4.50	3.30
M1	13.30	10.90	6.50	4.60
M2	13.80	11.70	7.30	5.00
M3	8.70	8.40	3.20	1.80
M4	9.60	7.50	2.10	1.60

Table 4. Accelerated carbonation depth (mm) of concrete cured at 65% RH with 20 °C

Mix name	3 days	7 days	28 days	3 months
M0	9.60	8.50	6.50	5.00
M1	14.10	12.80	10.40	8.40
M2	14.90	13.40	11.30	8.90
M3	10.30	9.80	6.30	4.50
M4	9.80	9.30	5.70	3.80

Tabelul 17: Adâncimea de carbonatare accelerată (mm) a betonului comparabil (Atiș, 2003)

S-a observat că betonul geopolimeric avea o culoare verde puternică la demularea probelor întărite în mediul ambiant. Betonul părea să fie ceva mai închis la culoare decât betonul tradițional la câteva zile după demulare și a existat o diferență semnificativă în ceea ce privește ușurința cu care betonul s-a desprins din matrițele de plastic și de oțel. Pe baza observațiilor din figura 32 și figura 33, o cantitate substanțială de beton a rămas ferm aderentă la matrița de oțel. Acest lucru poate indica faptul că proprietățile de aderență ale GPC la oțel sunt afectate pozitiv.



Figura 32: Fotografie a unei matrițe de oțel standard, care arată modul în care GPC aderă la oțel



Figura 33: Fotografie a mulajului din plastic utilizat pentru cilindrii de testare a migrării clorurilor



Figura 34: Modul de eșec al GP5.2



Figura 35: Fotografie după demontare GP5.2

5.2 Utilizarea potențială a betonului geopolimer, revizuire BIM

Scopul acestui capitol este de a discuta potențialele utilizări ale GPC pe care grupul le-a identificat.

Tabelul 16 prezintă rezultatul rezistenței la compresiune a GP5.2 polimerizat în cuptor, la 1 zi după amestecare, care a indicat 81,4 MPa și 84,5 MPa. La examinarea procesului de întărire a GP5.2 din apendicele 16, care descrie timpul de întărire inițial și final, se poate concluziona că betonul se întărește relativ repede. Folosind acești doi parametri, grupul a considerat că rețeta geopolimerului ar putea fi adecvată pentru producerea de elemente prefabricate.

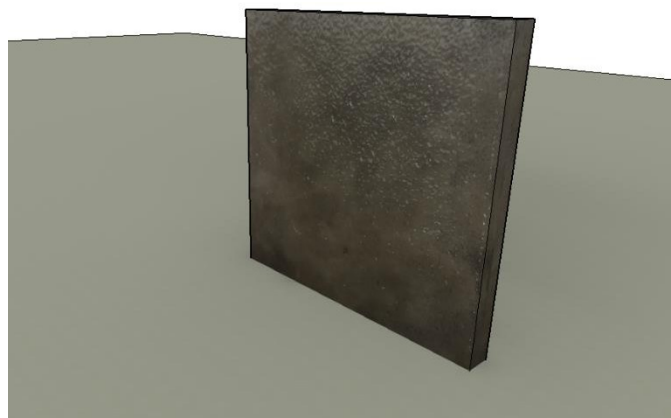
În acest context, grupul are o propunere a unui potențial perete exterior nestructural destinat "Modellageret" al FMV-Vest. Propunerea grupului este că un perete modular demontabil armat poate din cauza viitorului incert al clădirii după următorii 10 ani - cauzat de un nou plan de reglementare. Conceptul din spatele peretelui modular este că, după ce și-a îndeplinit scopul inițial, acesta poate fi reutilizat pentru o scop complet diferit sau ca un perete nou într-o clădire nouă



Figura 36: "Modellageret" astăzi

- reducerea emisiilor de CO₂ în ceea ce privește reabilitarea "Modellageret".

După ce a luat în considerare destinația inițială a peretelui modulului, grupul a discutat diverse moduri în care peretele ar putea fi reutilizat. Inițial, grupul a evaluat diverse posibilități prin care arhitecții



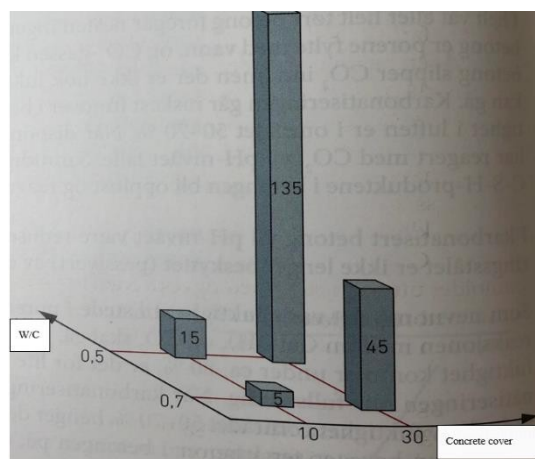
peisagiști ar putea reutiliza peretele
pentru straturi de flori, funcții de
separare în peisaj sau alte
detalii caracteristici. The idea is that the

Figura 37: Imagine de impresie realistă a peretelui modulului

modulele nu ar trebui demolate, ci mai degrabă utilizate în forma lor originală sau adaptate. Obiectivul principal al reutilizării este de a avea un aspect estetic plăcut, în care proprietățile mecanice sunt mai puțin relevante.

Prin continuarea recomandată a cercetării și dezvoltării peretelui modular, grupul vede oportunități pentru astfel de elemente reutilizabile. Acest lucru ar însemna că durata de viață a peretelui ar trebui să crească de la cerința actuală de 50 de ani pentru elementele prefabricate (Arkin, 2023).

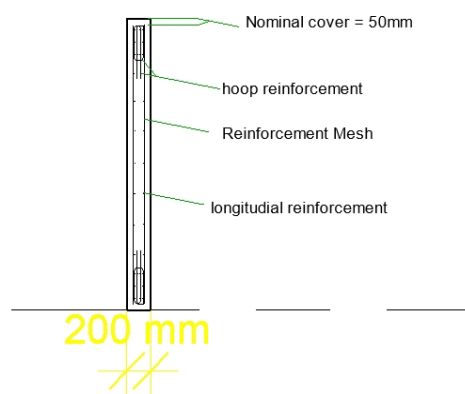
Pentru a atinge acest obiectiv, accentul ar trebui pus pe durabilitate. După cum s-a menționat la punctul teoretic 2.5 Durabilitate și armare, grosimea învelișului este esențială pentru coroziunea armăturii, care este, din nou, cel mai frecvent mecanism de deteriorare a structurilor din beton.



Prin urmare, învelitoarea de beton și armătura trebuie să fie calculate și justificate în funcție de destinația peretelui modularului.

Figura 38: Raportul dintre acoperirea cu beton și W/C (Maage, 2015, p. 220)

După evaluarea stării peretelui, acesta poate fi reutilizat într-o altă locație în care cerințele sunt egale sau mai mici. Deoarece peretele modularului în acest caz este un perete exterior neportant care va fi expus la clorurile din aer și situat în apropierea coastei, grupul presupune că învelișul de beton din construcție ar putea fi dimensionat în conformitate cu clasa de expunere XS1. În conformitate cu NS-EN 1992-1-1, aceasta presupune o acoperire de 50 mm. Deoarece peretele nu este portant, am recomanda o armare minimă, așa cum este descrisă în NS-EN 1992-1-1, pentru a minimiza fisurarea și a preveni cedarea fragilă, 2.5.2 Armare minimă. Din cauza lipsei standardelor în domeniul betonului



geopolimer, se

calculul armăturii și al învelișului de beton

Figura 39: Secțiune transversală a peretelui modulului

este dificil și recomandat pentru continuarea

muncă. Dimensiunile (lungime x înălțime x grosime) trebuie specificate într-o comandă

privind scopul principal al peretelui. Propunerea noastră pentru peretele modul care

va fi utilizat în "Modellageret", este o grosime de minimum 200 mm datorită învelitorii de beton. Lungimea și înălțimea trebuie specificate *după* măsurătorile arhitecturale ale "Modellageret" și înainte de începerea reabilitării. A se vedea figura 39 pentru o secțiune transversală propusă a peretelui modulului.

Figura 40 este un desen exclusiv de *propunere* pentru peretele modulului demontabil armat. Plasarea armăturii se bazează pe o imagine a unui perete prefabricat realizat de Heidelberg Materials Prefab Norge, apendicele 35. Figura 40 prezintă propunerea de proiectare a amplasării armăturii, însă amplasarea trebuie să fie proiectată în funcție de destinația peretelui, de ancorare și de forțele care vor fi aplicate peretelui.

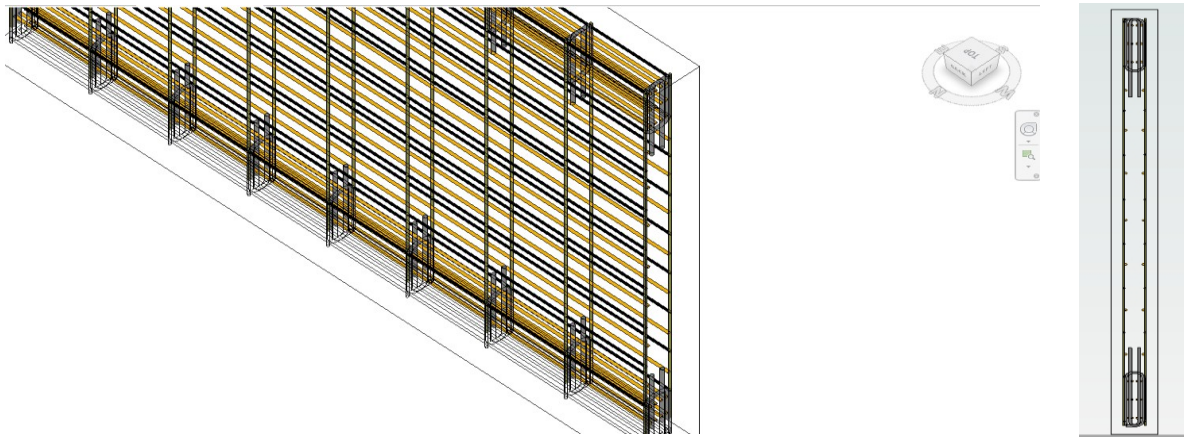


Figura 40: Desen conceptual al armăturii

În timpul proiectării unui astfel de element, trebuie luate în considerare ancorarea și proiectarea sa structurală, dimensiunea, producția, transportul, instalarea, fizica clădirii, cum ar fi izolarea și multe altele. Grupul a luat în considerare faptul că peretele modulului ar putea fi ancorat cu o soluție cu șuruburi, dar aceasta este o propunere pentru lucrări ulterioare. Factorii care sunt menționați mai sus trebuie luați în considerare la dimensionarea unui perete prefabricat, astfel încât acesta este doar un *concept*, iar punctele de mai sus sunt recomandate pentru dezvoltare și cercetare ulterioară. În cele din urmă, un fișier IFC existent, Figura 41, a fost modificat pentru a arăta conceptul de perete modular integrat în "Modellageret".

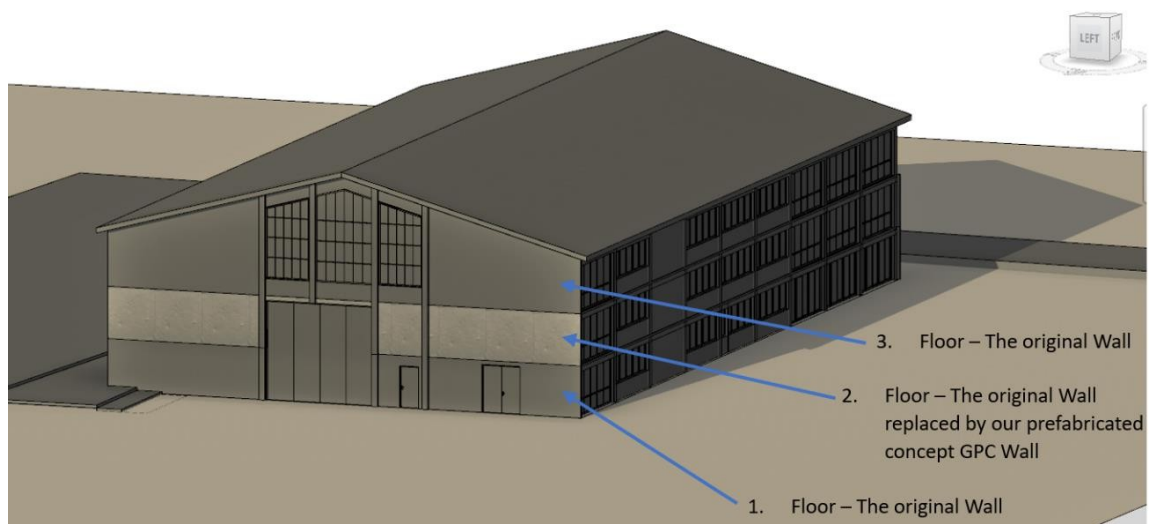


Figura 41: "Modellageret" cu un perete înlocuit cu un perete cu modul GPC

5.3 Studiu LCA

Datorită dorinței grupului de a reduce emisiile de CO₂ din industria construcțiilor, grupul a efectuat un studiu LCA al unui beton geopolimer dezvoltat de el însuși și l-a comparat cu un tip de beton cu un raport de masă similar. Sarcina a fost de a efectua un studiu LCA pe baza proceselor și datelor incluse în A1 și A3:

A1: Extracția materiilor prime

A3: Produs

Aceasta implică, în esență, întregul proces de producție a unui produs și tocmai aici grupul dorea să reducă impactul asupra mediului. Faza A2 a transportului nu a fost luată în considerare deoarece locația de producție a materiilor prime variază foarte mult. Transportul este un impact major asupra mediului, ceea ce ar da o impresie falsă atât GP5.2, cât și CEM-II, bazate pe extracția materiilor prime și producție (Statistisk sentralbyrå, 2019).

Grupul a decis să compare GP5.2 cu un amestec de beton tradițional: CEM-II/A-S 42.5N pe baza raportului său de masă relativ similar și a conținutului de GGBFS. Tabelul 18 de mai jos descrie combinația ciment - zgură, iar tabelul 19 reprezintă rețeta cu care am comparat:

TABLE 4: Standard composition of the tested cements according to EN 197-1:2000, m%.

Cement types	Constituents in standard composition of the tested cements, m%			
	Clinkers	Main GGBS	Fly ash	Minor Gypsum
CEM I 42,5 N	95–100	0	0	5
CEM II/A-S 42,5 N	85–94	15 (6–20)	0	5
CEM II/B-S 42,5 R	65–79	20 (21–35)	0	5
CEM III/A 32,5 N	35–64	60 (36–65)	0	5
CEM III/B 32,5 N-S	20–34	75 (66–80)	0	5
CEM V/A (S-V) 32,5 N	40–64	30 (18–30)	30 (18–30)	5

Tabelul 18: Raportul ciment zgură al rețetei comparate (Kopecskó & Balázs, 2017)

Mixture	w/c = 0.35		w/c = 0.45		w/c = 0.55	
	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)
Cement	440	440	440	440	440	440
water (w/c = 0.35)	154	154	198	198	242	242
River sand 0-1 mm (25 m%)	451	451	425	424	408	396
River sand 0-4 mm (20 m%)	361	361	340	339	327	317
River gravel 4-8 mm (55 m%)	993	993	934	932	898	871
Superplasticizer (1.15 m%)	5.06	5.06	1.76	1.76	0	0
AE (0.35 m%)	—	1.54	—	1.54	—	1.54
Sum	2404.06	2405.60	2338.76	2336.30	2315.00	2267.54

Tabelul 19: Rețeta utilizată pentru studiul LCA (Kopecskó & Balázs, 2017)

Acest studiu LCA reprezintă o abordare simplificată a rețetei GP5.2 pe care grupul a elaborat-o, tabelul 9, iar baza de date de la SimaPro a fost utilizată ca referință în analiză. Procesele care sunt excluse din baza de date SimaPro sunt selectate în urma revizuirii EPD-urilor și a informațiilor de pe internet. Proprietățile consumului de energie utilizate pot fi găsite în tabelul de mai jos.

Material	Energie utilizată în producție	Surse
CEM II/A-S 42,5 N cu 15% zgură granulată de furnal măcinată	0,85 kWh pentru ciment și 0,00705 kWh zgură pentru un total de 1 kg de amestec CEM II/A-S	(Cyr & Patapy, 2016, p. 5) (The International EPD System, 2019, p. 10)
GGBS	0,047 kWh/kg	(The International EPD System, 2019, p. 10)
Silicat de sodiu solid	1,5 kWh/kg	(Ramagiri, Chintha, Bandlamudi, Maeijer, & Kar, 2021)
Hidroxid de potasiu	4,81 kWh/kg	(Jiang, et al., 2021)

Sika Viscocrete	4,54 kWh/kg	(Federația Europeană a Asociațiilor de Adjuvanți pentru Beton , 2021)
FA	0 kWh/kg	Deșeuri de produse
Apă	0 kWh/kg	
Agregat 0-8	0,00226 kWh/kg și 0,0836 MJ/kg (motorină)	(Statens vegvesen, 2009)
Agregat 0-16	0,00226 kWh/kg și 0,0836 MJ/kg (motorină)	(Statens vegvesen, 2009)
Electricitate de la amestecare	62,4 kWh/m ³	Informații de la Heidelberg Materials
Electricitate din camera de încălzire (80°C)	15,55 kWh/m ³	Cameră termică, Colegiul universitar Østfold
Energia motorinei la amestecare	152,3 MJ/kg	Informații de la Heidelberg Materials

Tabelul 20: Valori cheie utilizate în studiul LCA

CEM-II /A-S 42.5N Beton:

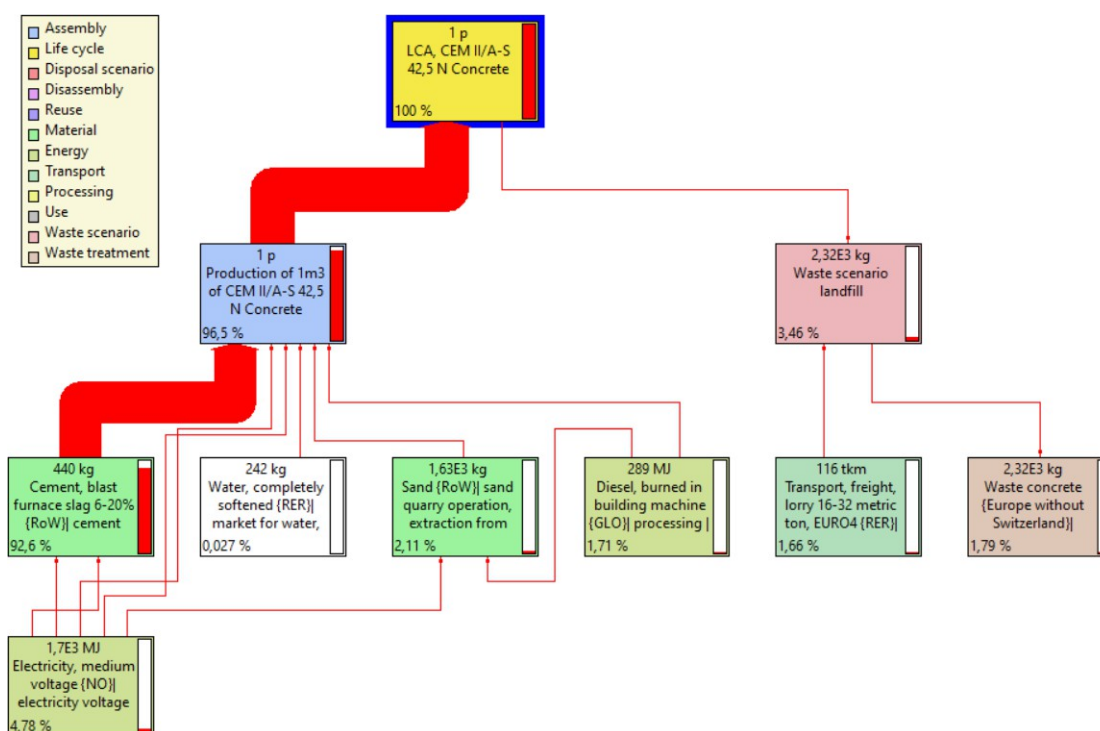


Figura 42: Rețeaua ciclului de viață a betonului CEM-II /A-S 42.5N

După cum arată lanțul LCA din figura 42, producția de OPC în sine constituie majoritatea emisiilor de CO₂ generate în timpul producției de beton tradițional - 92,6% din impactul asupra climei este contabilizat în această categorie. Grupul a anticipat că impactul OPC asupra mediului va fi ridicat și tocmai această categorie se dorește a fi redusă. După cum se demonstrează în apendicele 33, numai producția a 1 m³ de OPC reprezintă 386 kg de echivalent CO₂, exclusiv din GWP100 Fossil.

GP5.2 - beton geopolimer:

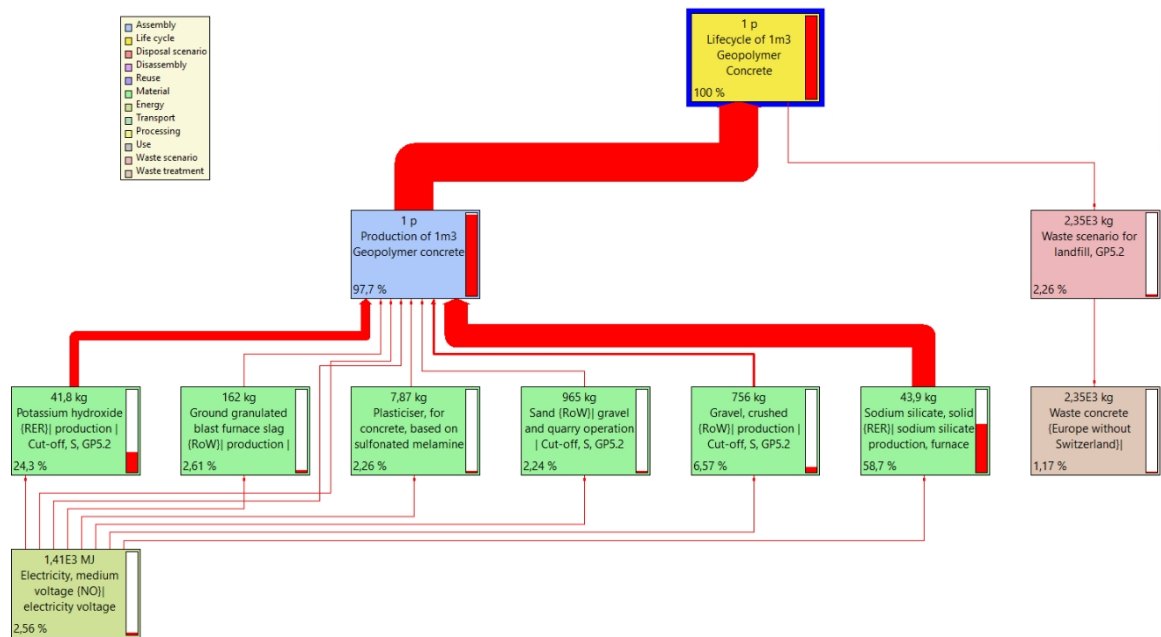


Figura 43: Rețeaua ciclului de viață GP5.2

Atunci când s-a efectuat o ACV pentru GP5.2 dezvoltat de noi, s-a constatat că producția de lianți, silicatul de sodiu și hidroxidul de potasiu, reprezintă 72,9% din impactul asupra climatei a 1 m³ de geopolimer produs. Acest lucru se datorează cererii mari de energie necesară pentru fabricarea acestor componente chimice.

Comparație

Atunci când compară direct producția GP5.2 și CEM-II/A-S 42,5N, grupul se concentrează pe două categorii, cu un accent principal pe emisiile de CO₂-equivalent și consumul de energie MJ.

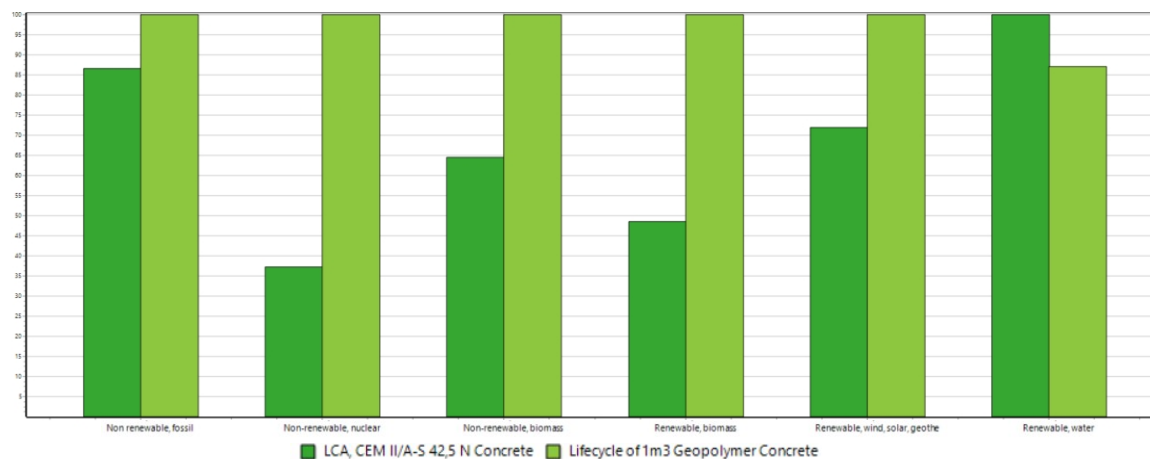


Figura 44: Consumul de energie

După cum se arată clar în figura 44 și figura 45, există un dezechilibru în comparația dintre echivalenții CO₂ și consumul de energie MJ în producția de 1 m³ de GP5.2 și CEM-II/A-S 42.5N.

Studiul LCA arată că producția GP5.2 consumă mult mai multă energie, consumând 5349,401 MJ, comparativ cu producția CEM-II /A-S 42.5N, care utilizează 4742,359 MJ, diferența fiind de 12,8% mai mare decât CEM-II/A-S 42.5N pe baza valorilor calculate în apendicele 32.

Cu toate acestea, există o diferență semnificativă în ceea ce privește cantitatea de CO₂ echivalent între producția de GP5.2 și CEM-II/A-S 42.5N.

După cum se arată în figura 45, nivelul total GWP100 al GP5.2 este calculat să fie de aproximativ 56% din producția de CEM-II/A-S 42.5N. Aceasta reprezintă o reducere de 44%, ceea ce reprezintă o diferență semnificativă dacă cantitatea de producție este mărită. Cantitatea totală de CO₂-echivalent în producția de CEM-II/A-S 42,5N este de 386,811 kg/m³ în comparație cu cantitatea totală considerabil mai mică de 216,890 kg/m³ a GP5.2.

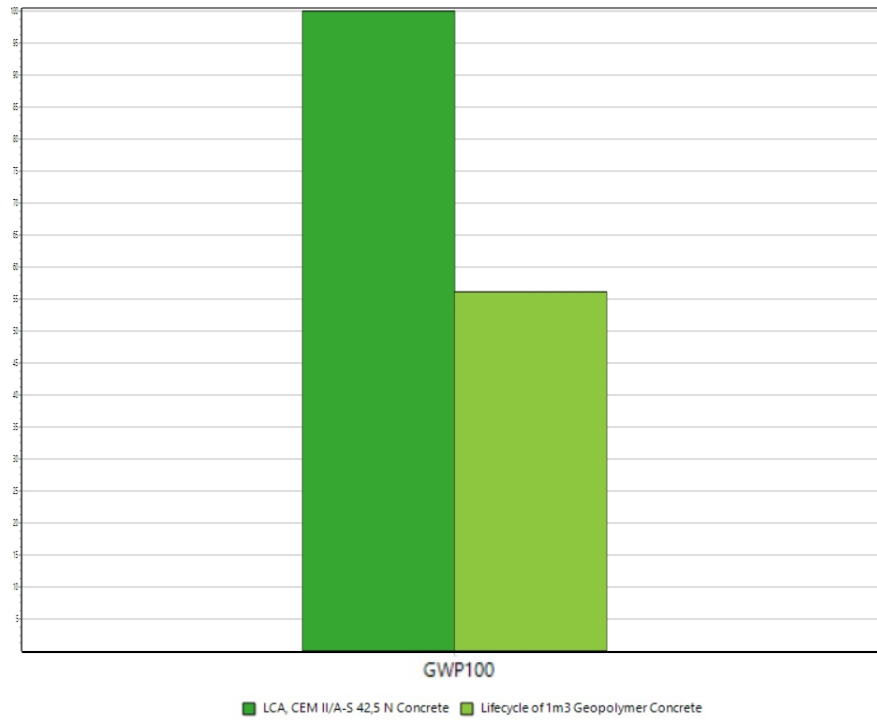


Figura 45: Emisiile de CO2 LCA

La producerea acestor tipuri de beton, obiectivul de reducere a nivelului de CO2 cu GP5.2 a fost atins. Cu toate acestea, există un consum foarte mare de energie în producerea activatorilor alcalini compuși chimic care înlocuiesc apa în betonul tradițional.

5.4 Surse de eroare și discuții

Metode de testare și rezultate

- Scopul tezei este de a compara betonul tradițional și GPC, iar metodele se bazează pe standarde tradiționale și nu sunt specifice GPC. Prin urmare, se bazează pe faptul că standardele disponibile privind GPC sunt rare.
- Din cauza modificării cabinetului de carbonatare și a incertitudinilor privind concentrația de CO₂- calculată pe baza legii gazului ideal, grupul nu poate legitima rata de carbonatare din acest test. Grupul recunoaște că legea gazului ideal reprezintă un model idealizat și poate să nu reflecte cu exactitate comportamentul gazelor din lumea reală. Cu toate acestea, este rezonabil să se deducă că testul de carbonatare rapidă produce rezultate autentice, având în vedere că camera este închisă ermetic, iar ecuația legii gazului ideal a fost calculată cu exactitate.
- Compararea proprietăților între GPC și betonul tradițional se bazează exclusiv pe literatura de specialitate și pe standarde. Acest lucru necesită teste extinse și cercetare empirică pentru a dezvolta atributele caracteristice. În ciuda lipsei de timp și a amplitudinii testelor efectuate în această teză, rezultatele menționate ar putea fi un indiciu.
- Factorii umani sunt inevitabili și trebuie întotdeauna luați în considerare.

Utilizarea potențială a betonului geopolimer, revizuire BIM

- Armarea și ancorarea peretelui modulului nu au fost nici dimensionate, nici proiectate, deoarece standardele disponibile privind GPC sunt rare. Datorită faptului că această teză s-a limitat la examinarea proprietăților GPC, s-a considerat prudent să se recomande o problemă separată dedicată dimensionării.

Studiu LCA

- Grupul a bazat studiul LCA pe biblioteca limitată de software oferită de SimaPro. Acest lucru poate duce la fluctuații pozitive sau negative ale rezultatelor.
- Consumul de energie este un alt aspect care variază considerabil și se bazează pe

informații obținute de pe internet. Pe parcursul studiului LCA, grupul a observat că soluțiile alcaline au avut un consum de energie semnificativ ridicat din cauza electrolizei. Pe baza teoriei colectate cu privire la GPC, a fost surprinzător faptul că consumul de energie a fost evaluat la astfel de niveluri.

6 Concluzie

Teza a început cu următoarea enunțare a problemei:

Scopul acestei teze este de a investiga durabilitatea și proprietățile unui beton geopolimer autodezvoltat, precum și de a compara emisiile de CO₂ din faza de producție față de betonul tradițional - cu scopul de a promova conștientizarea emisiilor în industria construcțiilor și a ingineriei utilizând BIM și LCA.

În concluzie, GPC autodezvoltat a indicat proprietăți proaspete și întărite bune prin procedurile de testare. Rezultatele contribuie la concluzia că proprietățile de durabilitate sunt cel puțin la fel de bune ca cele ale betonului tradițional, chiar depășindu-le în ceea ce privește unele caracteristici - având în vedere temperatura optimă de întărire. Prin testul de carbonatare rapidă și de migrare a clorurilor și cu acoperirea corectă a armăturilor, GPC ar depăși durata de viață dimensionată de 50 de ani. Atât prin testarea atributelor, cât și prin revizuirea BIM, grupul a concluzionat, în plus, că betonul autodezvoltat este adecvat pentru a fi utilizat ca perete modular reutilizabil și detașabil.

Studiul LCA a justificat obiectivul de reducere a emisiilor de CO₂ în faza de producție a GPC, în comparație cu betonul tradițional, cu aproape cincizeci la sută, deci un consum mai mare de energie. Prin utilizarea BIM și încorporarea rezultatelor LCA, proprietarul proiectului poate face diferența între mai multe materiale de construcție, ajutându-l să decidă care - pe baza emisiilor. "Modellageret" este un astfel de proiect care ar putea beneficia de acest lucru.

Luând în considerare toate acestea, GPC demonstrează proprietăți rafinate, în special în ceea ce privește proprietățile de întărire, promițând să depășească betonul tradițional, reducând în același timp semnificativ emisiile de CO₂, ceea ce îl face o alegere ideală pentru construcțiile orientate spre viitor.

7. Sugestii pentru activitatea viitoare

Pe parcursul acestei teze am descoperit mai multe provocări și incertitudini privind dezvoltarea produsului. Următoarele probleme ar putea fi interesante de analizat pentru a optimiza potențialul GPC orientat spre viitor.

Beton geopolimeric

- Este extrem de necesară cercetarea privind standardizarea proprietăților GPC, deoarece ar fi interesant să se dezvolte o comparație cuprinzătoare cu betonul tradițional.
- Se recomandă cercetarea lianților disponibili din cauza incertitudinilor privind utilizarea AF din centralele electrice pe bază de cărbune care se presupune că vor fi închise în viitor. S-ar putea ca trecerea la cenușa vulcanică, reziduurile miniere, cenușa din coji de orez sau alți lianți să se dovedească a avea proprietăți similare sau mai bune decât FA?
- La examinarea punctelor extreme privind rezistența la carbonatare și la cloruri, s-a observat că acestea ar putea fi legate de agregate. În consecință, ar fi interesant să se testeze agregate de alte dimensiuni și diferite. Ar fi aceasta diferită din cauza utilizării SF, deoarece ar putea reduce zona de tranziție interfacială?

Utilizarea potențială a betonului geopolimer, revizuire BIM

- Dimensionarea și proiectarea construcțiilor din GPC în Europa nu este practic fezabilă, din cauza lipsei standardelor. Acest lucru reprezintă o provocare pentru utilizarea GPC în proiectele actuale, deoarece grupul a întâmpinat exact această problemă atunci când a încercat să calculeze armătura minimă - deoarece aceasta este legată exclusiv de betonul tradițional.
- Pentru a promova reutilizarea, este esențial să se prelungească durata de viață a structurilor din beton. În plus, pentru a atinge obiectivul reutilizării, merită explorate diverse opțiuni de ancorare și plasare a armăturilor pentru elementele prefabricate din beton. Astfel, ancorarea cu șuruburi a fost sugerată ca mijloc de

a face demontabile elementele de beton, o condiție prealabilă pentru reutilizarea lor completă. Proiectarea acestor opțiuni sus-menționate ar genera o problemă de cercetare extrem de interesantă.

Studiu LCA

- În urma studiului LCA, s-a observat că soluțiile alcaline au un consum de energie semnificativ ridicat din cauza electrolizei. Este posibilă înlocuirea soluțiilor alcaline actuale cu un produs mai puțin consumator de energie sau scăderea raportului L/GB pentru a reduce cantitatea de soluții alcaline, cu proprietăți similare sau mai bune?
- Pe baza experienței dobândite prin utilizarea software-ului LCA, ar fi de apreciat să se dispună de detalii opționale extinse și cuprinzătoare, care ar putea îmbunătăți și mai mult credibilitatea rezultatelor studiului LCA. Pentru a obține aceste detalii, ar fi interesant și recomandabil să se mărească baza de date pentru a găzdui noi utilizatori ai software-ului. În cele din urmă, acest lucru este menit să consolideze mesajul privind conștiința ecologică.

8 Referință

- Abushad, M., & Sabri, M. D. (2017, 7 iulie). Studiu comparativ al rezistenței la compresiune a betonului cu cenușă zburătoare. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Retrieved from <https://www.irjet.net/archives/V4/i7/IRJET- V4I7534.pdf>
- Ahmed, M., Verma, M., Rahman, I., Mallick, J., Dev, N., & Nigam, M. (2022, aprilie 7). Beton geopolimeric: A Material for Sustainable Development in Indian Construction Industries. *Crystals*. doi:<https://doi.org/10.3390/cryst12040514>
- Ali, K. A. (2020, 10 septembrie). Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector. *sustainability*, p. 12. doi:<https://doi.org/10.3390/su12187427>
- Anre, A. (2020, 27 iunie). *Ce este acoperirea din beton pentru armătură?* Retrieved from Prodyogi: https://www.prodyogi.com/2020/06/what-is-concrete-cover-for-reinforcement.html?utm_content=cmp-true
- Arkin, D. (2023, 9 ianuarie). *Cât de mult durează betonul? Adevărul despre betonul prefabricat*. Retrieved from <https://premierprecast.com/concrete-lifespan/#:~:text=Precast%20concrete%20has%20strict%20design%20parameters%20and%20is,the%20reasons%20for%20precast%20concrete%20to%20last%20longer%3F>
- Armentrout, D. L., & Belkowitz, J. S. (2009, ianuarie). O CERCETARE A NANO SILICIULUI ÎN PROCESUL DE HIDRATARE A CIMENTULUI. Extras din [researchgate.net/publication/264882831_An_investigation_of_nano_silica_in_the_cement_hydration_process](https://www.researchgate.net/publication/264882831_An_investigation_of_nano_silica_in_the_cement_hydration_process)
- Atiș, C. (2003, aprilie). Carbonatarea accelerată și testarea betonului fabricat cu cenușă zburătoare. *Construction and building materials*, pp. 147-152. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)
- Autodesk. (n.red.). *Building Information Modeling*. Retrieved from

<https://www.autodesk.com/industry/aec/bim>

- Autodesk. (n.red.). *Revit: BIM-programvare for designere, byggere og utførere*. Retrieved from <https://www.autodesk.no/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RVT>
- Betongfokus. (2019, 27 martie). *Geopolymerbetong, hva er nå det?* Retrieved from <https://www.betongfokus.no/2019/03/27/geopolymerbetong/#:~:text=Geopolymere r%20baserer%20seg%20p%C3%A5%20mindre%20prosesserte%20mineraler%20med,en%20del%20praktiske%20utfordringer%20med%20%C3%A5%20bruke%20geopolymerbetonger.>
- BNP Media. (2021, 29 ianuarie). Retrieved from <https://browningday.com/news/lca-stages-matter-when-tracking-embodied-carbon/>
- Institutul de Cercetare în Construcții. (n.red.). *Testarea materialelor*. Retrieved from <http://www.buildingresearch.com.np/services/mt/mt1.php>
- Învățarea BYJU. (2023). *Scrieți ecuația chimică pentru a reprezenta disocierea ionică a hidroxidului de sodiu în mediu apos*. Retrieved from <https://byjus.com/question-answer/write-the-chemical-equation-to-represent-the-ionic-dissociation-of-sodium-hydroxide-in-aqueous-medium/>
- CBI Norge. (n.red.). *Betydningen av varmekapasiteten i isolasjonsmaterialet*. Retrieved from <https://www.cbinorge.no/celluloseisolasjon/hva-er-celluloseisolasjon-betydningen-av-varmekapasiteten-i-isolasjonsmaterialet?fbclid=IwAR2Li6NroqkGpF1Nnys0EgZLw5tfNFAyeqH2-GJColWVlfGI4hjOFymnUpM>
- Cemmac. (n.d.). *CEM II/A-S 42,5 R Ciment Portland - zgură*. Retrieved from <http://www.cemmac.sk/dev/language/en/cement-cem-ii-a-s-425r/?fbclid=IwAR2bSFjRUtytcqnKSo38GYIKknaqJnaeknJ5HNk1D0Vy6bf6H-Q3YcADSIU>
- CEN. (2012, 30 aprilie). *Încercări pentru proprietățile geometrice ale agregatelor - Partea 1: Determinarea distribuției dimensionale a particulelor - Metoda de cernere*. Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/100b983f-85a4-4a80-934c->

e93c584bdb4/en-933-1-2012

- Cong, P., & Cheng, Y. (2021, 25 mai). Progrese în materialele geopolimerice: O revizuire cuprinzătoare. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (Ediția în limba engleză)*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021, iunie). Progrese în materialele geopolimerice: O revizuire cuprinzătoare. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, pp. 283-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Cyr, M., & Patapy, C. (2016). Efecte sinergice ale căilor de activare a granulatului măcinat. *HAL open science*, p. 5. Retrieved from <https://hal.science/hal-01344929/document>
- Deb, P., & Sarker, P. (2016, 14 septembrie). Efectele cenușii volante ultrafine asupra fixării, rezistenței și porozității geopolimerilor întăriți la temperatura camerei. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 1-5. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001745)
- Dhanya, B. S., Santhanam, M., Pillai, R., & Gettu, R. (2014, ianuarie). Evaluarea comparativă a diferitelor metode electrice utilizate pentru a evalua transportul clorurilor în beton. pp. 7-13. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/324361434_COMPARATIVE_EVALUATION_OF_VARIOUS_ELECTRICAL_METHODS_USED_TO_ASSESS_CHLORIDE_TRANSPORT_IN_CONCRETE
- Diagne, M., Ibrahima, D., & Gueye, O. (2021, 29 iunie). Influența tipurilor de umpluturi asupra prelucrabilității, sângerării, rezistenței la compresiune și gradului de compactare a betonului hidraulic. *Cercetare științifică*. doi:[10.4236/msa.2021.126019](https://doi.org/10.4236/msa.2021.126019)
- Duran Atiş, C. (2003, aprilie). Construcții și materiale de construcții. *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*, pp. 147-152. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)
- PARDOSEALĂ CU PLĂCI EPOXIDICE. (2021, 19 mai). *BS 6319-2 : Cum să verificați rezistența la compresiune a pardoselilor din rășină*. Retrieved from <https://www.epoxytileflooring.com/2021/05/bs-6319-2-how-to-check->

compressive.html

- Federația Europeană a Asociațiilor de Adjuvanți pentru Beton . (2021). *Adaosuri pentru beton Plastifianți și superplastifianți*. Retrieved from <http://www.efca.info/download/plasticisers-and-superplasticisers-epd-2015/>
- Fadhil, M. N., Haruna, S., Mohammed, B. S., & Sha'aban, I. G. (2017, 17 noiembrie). Metode de întărire a betonului geopolimeric: O revizuire. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. doi:<https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- FN-Sambandet. (2023, 21 martie). *Klimaendringer*. Retrieved from <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>
- Gagg, C. R. (2014, 10 februarie). Cimentul și betonul ca material ingineresc: O evaluare istorică și o analiză a studiului de caz. *Engineering Failure Analysis*, p. 1. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- GCP. (n.red.). *Zgură de furnal măcinată și granulată: Chimia sa și utilizarea cu adaosuri chimice*. Retrieved from <https://ca.gcpat.com/en/solutions/products/strux-synthetic-macro-fibers/ground-granulated-blast-furnace-slag-its-chemistry>
- Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). *EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements la Brisbane West*. Retrieved from https://www.wagner.com.au/media/1512/bwwa-efc-pavements_2015.pdf
- Gregory, J., & Logan, A. (2021, 8 ianuarie). *Beton*. Retrieved from MIT Climate Portal: <https://climate.mit.edu/explainers/concrete>
- Hardjito, D., & Tsen, M. (2008). Rezistența și stabilitatea termică a mortarului geopolimeric pe bază de cenușă zburătoare. *A treia conferință internațională*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/42428614_Strength_and_Thermal_Stability_of_Fly_Ash_Based_Geopolymer_Mortar
- Materiale Heidelberg. (n.red.). *Herdetehnologi*. Retrieved from <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/sites/default/files/assets/document/bb/1>

1/herdeteknologi_lav.pdf

- Materiale Heidelberg. (n.red.). *Sementproduksjon og CO2*. Retrieved from <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/sementproduksjon-co2>
- Helseth, L. E. (2021, 7 noiembrie). *Monomer*. Retrieved from Store Norske Leksikon: <https://snl.no/monomer>
- Jahren, P. (2012). *Betong - Mangfold og muligheter*. Trondheim: Akademika forlag.
- Jiang, H., Wang, L., Gao, B., Li, Y., Guo, Y., Zhuo, M., . . . Li, Y. (2021, 15 octombrie). Anolitul contează: Către o reducere electrochimică a CO2 foarte eficientă. *Chemical Engineering Journal*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129923>
- Ketana, N. S., Reddy, V. S., Rao, M. S., & Shrihari, S. (2021, 21 octombrie). Efectul diferiților parametri asupra prelucrabilității și proprietăților de rezistență ale betonului geopolimer. *E3S - Web of Conferences*. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901102>
- Kontrollrådet. (2018, 22 martie). *Betongens historie*. Retrieved from <https://kontrollbetong.no/aktuelt/betongens-historie/>
- Kopeckó, K., & Balázs, G. (2017, august). Beton cu legare îmbunătățită a clorurilor și rezistivitate la cloruri prin amestecuri de cimenturi. *Advances in Materials Science and Engineering*. doi:10.1155/2017/7940247
- LCA. (n.red.). *Miljøpåvirkninger EN 15804 +A2*. Retrieved from <https://lca.no/miljopavirkninger/>
- LCA Norge. (n.red.). *Hva er LCA?* Retrieved from <https://lca.no/hva-er-lca/>
- Evaluarea ciclului de viață. (2020, 17 iulie). *Evaluarea ciclului de viață (LCA) explicată*. Retrieved from <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
- MATEST. (n.red.). *Vicatronic, aparat Vicat din fibră de carbon*. Retrieved from <https://www.matest.com/en/product/e044n-vicatronic-automatic-computerized-tropicalized-vicat-recording-apparatus>

- Mavračić, J., Mocanu, F. C., Deringer, V. L., Csányi, G., & Elliott, S. R. (2018, 15 mai). *Similaritate între fazele amorfe și cristaline: The Case of TiO₂*. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jpcelett.8b01067>
- McKenna Group. (n.red.). *The Advantages & Disadvantages of Using BIM*. Retrieved from <https://mckenna.group/2021/02/08/advantages-disadvantages-bim/>
- Meyer, R. W. (2021). *avbinding (størkning)*. Retrieved from Store Norske Leksikon: https://snl.no/avbinding_-_størkning
- Mishra, G. (n.red.). *Testul de înclinare a betonului pentru lucrabilitate: Procedură și rezultate*. Retrieved from <https://theconstructor.org/concrete/concrete-slump-test/1558/>
- Multiconsult. (n.red.). *LCA og klimagassregnskap*. Retrieved from <https://www.multiconsult.no/tjenester/lca-og-klimagassregnskap/>
- Muwashee, R. S., & Al-Jameel, H. A. (2021). Evaluarea influenței fumului de siliciu asupra proprietăților selectate ale mortarului de ciment. *Journal of Physics Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1973/1/012172
- Maage, M. (2015). *Betong - Regelverk, teknologi og utførelse*. (M. Maage, Ed.) Bergen: Byggenæringens Forlag AS.
- Centrul Național pentru Informații Biotehnologice. (2023, 10 februarie). *Hidroxid de sodiu*. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14798>
- Neville, A., & Aïtcin, P.-C. (1998, martie). Beton de înaltă performanță - O prezentare generală. *Materiale și structuri*. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02486473>
- Nitka, M., & Tejchman, J. (2020, 19 septembrie). Calcule DEM comparative ale procesului de fractură în beton luând în considerare agregate reale unghiulare și sferice artificiale. *Engineering Fracture Mechanics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107309>
- Grupul Nordic BIM. (n.red.). *Building Information Modeling: BIM i går, i dag og i morgen*.

Retrieved from <https://www.nordicbim.com/no/alt-om-bim-bygningsinformasjonsmodellering-fra-vugge-til-grav>

- Nordtest. (1999). *NT Build 492*. Retrieved from <https://salmanco.com/wp-content/uploads/2018/10/NT-Build-492.pdf>
- Parshwanath, R. N., Nataraja, M. C., & Lakshmanan, N. (2011, noiembrie). O introducere în betonul geopolimer. *ResearchGate*, p. 1. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/285666741_An_introduction_to_geopolymer_concrete
- Patil, S. V., Karikatti, V. B., & Chitawadagi, M. (2018, august). GeopolymerConcrete pe bază de zgură de furnal granulată (GGBS) - revizuire. *Jurnalul internațional de știință și inginerie avansată*. doi:<https://doi.org/10.29294/IJASE.5.1.2018.789-885>
- Pavement Interactive. (n.red.). *Moisture Content*. Retrieved from <https://pavementinteractive.org/reference-desk/materials/aggregate/moisture-content/>
- Pemat. (n.red.). *ZK 50 HE Detalii tehnice*. Retrieved from https://www.pemat.de/wp-content/uploads/2018/04/zk50he_zyklos_td_e.pdf
- Pilehvar, S., Duy Cao, V., Szczotok, A. M., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., . . . Kjøniksen, A.-L. (2018, 2 aprilie). Proprietățile fizice și mecanice ale geopolimerului de cenușă zburătoare și zgură. *Construction and Building Materials*, pp. 28-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.016>
- Ramagiri, K. K., Chintha, R., Bandlamudi, R. K., Maeijer, P. K., & Kar, A. (2021). Cradle-to-Gate Life Cycle and Economic Assessment of Sustainable Concrete Mixes- Alkali-Activated Concrete (AAC) and Bacterial Concrete (BC). *Infrastructuri*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/7/104>
- Rodriguez, J., Ortega, L. M., & Casal, J. (1997, 31 august). Capacitatea portantă a structurilor de beton cu armături corodate. *Construction and Building Materials*. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00043-3)

- Ross, J. H., Genedy, M., Juenger, M. C., & van Oort, E. (2022, 25 octombrie). Recuperarea permeabilității prin autovindecare a geopolimerilor pe bază de cenușă zburătoare de clasă F. *CEMENT*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100048>
- Saeed, A., Najm, H. M., Hassan, A., Sabri Sabri, M. M., Qaidi, S., Mashaan, N. S., & Ansari, K. (2022, 21 noiembrie). Proprietăți și aplicații ale compozitelor geopolimerice: A review Study of Mechanical and Microstructural Properties. *materiale*, pp. 5-9. doi:<https://doi.org/10.3390/ma15228250>
- Saha, A. K. (2018, ianuarie). Efectul cenușii zburătoare de clasă F asupra proprietăților de durabilitate ale betonului. *Sustainable Environment Research*, 28(1), pp. 25-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Saleh, H. M., & Eskander, S. B. (2020). Materiale inovatoare pe bază de ciment pentru protecția și restaurarea mediului. *Materiale noi în ingineria civilă*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00018-1>
- Samferdsel og infrastruktur. (2019, 27 ianuarie). *Geopolymerbetonger, hva er nå det?* Retrieved Mars 9, 2023, from <https://www.samferdselinfra.no/geopolymerbetonger-hva-er-na-det/>
- Seehusen, J. (2021, 21 iunie). *Vi bruker betong nok til å bygge 32 søyler til månen hvert år*. Retrieved from Teknisk Ukeblad: <https://www.tu.no/artikler/vi-bruker-betong-nok-til-a-bygge-32-soyler-til-manen-hvert-ar-br/509660>
- Setina, J., Gabrene, A., & Juhnevica, I. (2013). Efectul aditivilor puzzolanici asupra structurii și durabilității chimice a. *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*,, p. 1006. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/82052144.pdf#:~:text=With%20a%20continuing%20supply%20of%20moisture%2C%20the%20lime,SiO2%20%3D%203CaO%20%20C2%B7%20SiO2%20%2B%203H2O%20%281%29>
- SimaPro. (n.d.). *Despre SimaPro*. Retrieved from <https://simapro.com/about/>

- Singh, B. P., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015, 15 iunie).
Beton geopolimeric: O trecere în revistă a unor evoluții recente. *Construction and Building Materials*, p. 79. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Singh, M., Siddique, R., & Singh, J. (2022). Coal Fly Ash. *Sustainable Concrete made with Ashes and Dust from Different Sources*, pp. 1-29.
doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824050-2.00012-7>
- SINTEF. (2010). *Tilsetningsstoffer for betong*. Retrieved from
https://www.byggforsk.no/dokument/590/tilsetningsstoffer_for_betong
- Standard Norge. (2004). Eurocod 2 - Proiectarea structurilor de beton - Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri. *NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021*.
Retrieved from
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1365301>
- Standard Norge. (2006). Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer (ISO 14044:2006). *NS-EN ISO 14044:2006*. Extras din
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=195484>
- Standard Norge. (2013). Beton - Specificații, performanțe, producție și conformitate. *NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2022*. Retrieved from
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1447838>
- Standard Norge. (2016). Sementprøving - Del 3: Bestemmelse av størkningstid og volumbestandighet. *NS-EN 196-3:2016*. Retrieved from
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=877507>
- Standard Norge. (2019). Prøving av fersk betong - Del 1: Prøvetaking og vanlig utstyr. *NS-EN 12350-1:2019*. Retrieved from
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1106510>

- Standard Norge. (2019). Prøving av fersk betong - Del 5: Utbredelsesmål. *NS-EN 12350-5:2019*. Retrieved from <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1106514>
- Standard Norge. (2022, 23 decembrie). *Organisering og digitalisering av informasjon om byggverk - ISO 19650-serien*. Retrieved from Fagområder: bygg, anlegg og eiendom: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/digital-byggeprosess/iso-19650-serien/>
- Standard Norge. (2022). Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry. *ASTM C1679:22*. Retrieved from <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1502984>
- Statens vegvesen. (2009). *Metode for beregning av energiforbruk*. Retrieved from <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/193232?show=full>
- Statistisk sentralbyrå. (2019, 28 august). *Transport står for 30 prosent av klimautslippene i Norge*. Retrieved from <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/transport-star-for-30-prosent-av-klimautslippene-i-norge>
- Taffase, W. Z., & Espinosa-Leal, L. (2023, 9 aprilie). Modele de regresie multițintă pentru prezicerea rezistenței la compresiune și a rezistenței la clor a betonului. *Journal of Building Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106523>
- Cutia cu instrumente de inginerie. (n.red.). *Capacitatea termică*. Retrieved from https://www.engineeringtoolbox.com/heat-capacity-d_338.html?fbclid=IwAR18smygbe5Zyu-_2228KaSyA0VMjThho2u9jTtFyp5rlXaONvYgzQ2uJpQ
- Sistemul internațional EPD. (2019). *EPD de zgură granulată de furnal medie măcinată*. JSW. Retrieved from <https://www.environdec.com/library/epd1415>

Thue, J. V. (2019, 11 septembrie). *korngradering*. Retrieved from Store Norske Leksikon:
<https://snl.no/korngradering>

Programul Națiunilor Unite pentru Mediu. (2021). *Raportul privind starea globală 2021*. Retrieved from https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf

Vegdirektoratet. (2014, iunie). Statens Vegvesen, HB-R210 - Laboratieundersøkelser. Vegdirektoratet. Retrieved from <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r210-laboratorieundersokelser-2016.pdf>

Verma, M., & Dev, N. (2021, februarie). Efectul raportului dintre zgura granulată măcinată de furnal și cenușa zburătoare și condițiile de întărire asupra proprietăților mecanice ale betonului geopolimer. *Structural Concrete*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/349428153_Effect_of_ground_granulated
Raportul dintre zgura de furnal și cenușa de muște și condițiile de întărire asupra proprietăților mecanice ale betonului geopolimer

Wadsö, L. (2005). *Calorimetria izotermală a cimentului*. Retrieved from https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/08/09IsothermalCalorimetry_000.pdf

WAGNERS. (n.red.). *CLĂDIREA INSTITUTULUI PENTRU SCHIMBĂRI GLOBALE (GCI)*. Extras din <https://www.wagner.com.au/main/our-projects/global-change-institute-gci-clădire/>

9 Anexă

Apendicele 1: 14.02 23 - Prima rețetă a dezvoltării rețetei; GP1.1, GP1.2, GP2.1, GP2.2, GP3.1, GP3.2, GP4.1 și GP4.2

Series 14/2/2023							
GP1.1				GP1.2			
60FA/40GGBFS	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33GGBFS	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	10,0	0,40	10,00	Fly ash	10,0	0,40	10,00
Slag	6,8		6,80	Slag	6,8		6,80
Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10	Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10
NaOH	2,7		2,70	KOH	2,7		2,70
Extra water	1,7	0,50	1,70	Extra water	1,7	0,50	1,70
SUM	23,6		23,6	SUM	23,6		23,6
Molarity NaOH	mol/liter		14	Molarity KOH	mol/liter		14

Series 14/2/2023							
GP2.1				GP2.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Faktisk oppmålt [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Faktisk oppmålt [g]
Fly ash	16,8	0,40	16,79	Fly ash	16,8	0,40	16,80
Slag	8,4		8,40	Slag	8,4		8,40
Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00	Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00
NaOH	4,0		4,00	KOH	4,0		4,00
Extra water			0,00	Extra water			0,00
SUM	35,2		35,2	SUM	35,2		35,2
Molarity NaOH	mol/liter		14	Molarity KOH	mol/liter		14

Series 14/2/2023							
GP3.1				GP3.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	10,0	0,40	10,00	Fly ash	10,0	0,40	10,00
Slag	6,8		6,80	Slag	6,8		6,80
Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10	Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10
NaOH	2,7		2,70	KOH	2,7		2,70
Extra water	1,7	0,50	1,70	Extra water	1,7	0,50	1,70
SUM	25,3		25,3	SUM	25,3		25,3
Molarity NaOH	mol/liter		10	Molarity KOH	mol/liter		10

Series 14/2/2023							
GP4.1				GP4.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	16,8	0,40	16,79	Fly ash	16,8	0,40	16,80
Slag	8,4		8,40	Slag	8,4		8,40
Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00	Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00
NaOH	4,0		4,00	KOH	4,0		4,00
Extra water			0,00	Extra water			0,00
SUM	35,2		35,2	SUM	35,2		35,2
Molarity NaOH	mol/liter		10	Molarity KOH	mol/liter		10

Apendicele 2: 16.02.23 - Masa proiectată a rețetei pentru testul TAM, (nemăsurat= N/M)

	GP1.1		GP1.2		GP2.1		GP2.2	
Recipe (R)/ actual (A)	R	A	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,37g	N/M	2,37g	N/M	2,864g	N/M	2,864g	N/M
m_{GGBFS}	1,613g	N/M	1,613g	N/M	1,432g	N/M	1,432g	N/M
$m_{Na_2SiO_3}$	0,972g	N/M	0,972g	N/M	1,023g	N/M	-	N/M
m_{NaOH}	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M	-	N/M
m_{KOH}	-	-	0,640g	N/M	-	-	0,640g	-
m_{H_2O}	0,403g	N/M	0,403g	N/M	-	N/M	-	N/M
	GP3.1		GP3.2		GP4.1		GP4.2	
Recipe(R)/ actual(A)	R	A	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,37g	N/M	2,37g	N/M	2,8644g	N/M	2,8644g	N/M
m_{GGBFS}	1,613g	N/M	1,613g	N/M	1,4322g	N/M	1,4322g	N/M
$m_{Na_2SiO_3}$	0,972g	N/M	0,972g	N/M	1,023g	N/M	1,023g	N/M
m_{NaOH}	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M	-	-
m_{KOH}	-	-	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M
m_{H_2O}	0,403g	N/M	0,403g	N/M	-	-	-	-

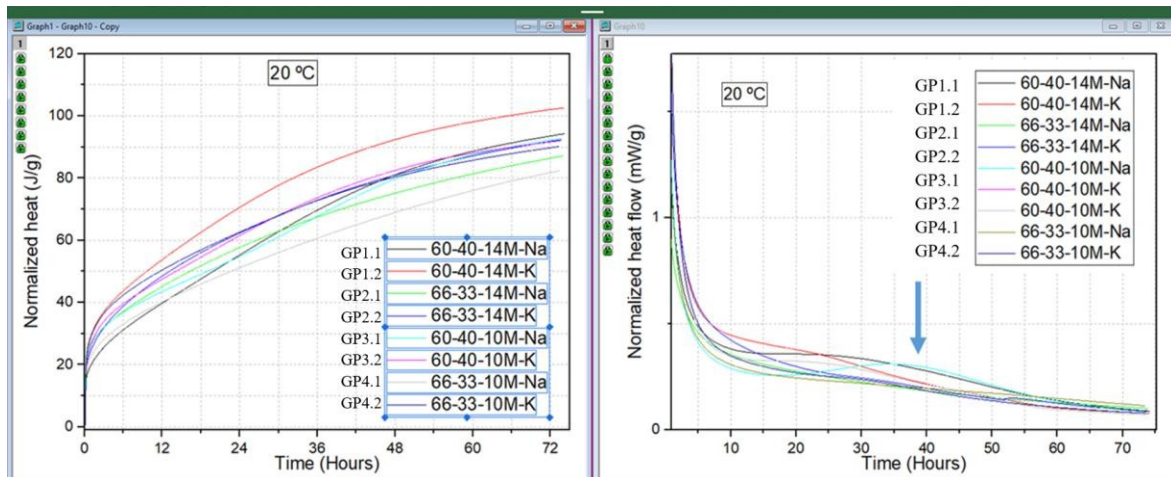
Apendicele 3: 16.02.23 - Masa totală în fiole

	GP1.1	GP1.2	GP2.1	GP2.2	GP3.1	GP3.2	GP4.1	GP4.2
Ampoule nr.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
m_{Ampoules}	6,120g	6,398g	5,990g	6,492g	6,066g	6,058g	6,410g	6,419g

Apendicele 4: 16.02.23 - Masa de referință - apă, m_{ref} și masa măsurată

	m_{ref} (water)	Measured mass
GP1.1 – Ampoule B1	1,538g	1,538g
GP1.2 – Ampoule B2	1,610g	1,611g
GP2.1 – Ampoule B3	1,193g	1,190g
GP2.2 – Ampoule B4	1,270g	1,270g
GP3.1 – Ampoule B5	1,538g	1,539g
GP3.2 – Ampoule B6	1,610g	1,602g
GP4.1 – Ampoule B7	1,193g	1,190g
GP4.2 – Ampoule B8	1,270g	1,275g

Anexa 5: 21.02.23 - Testul TAM inițial, GP1.1-GP4.2

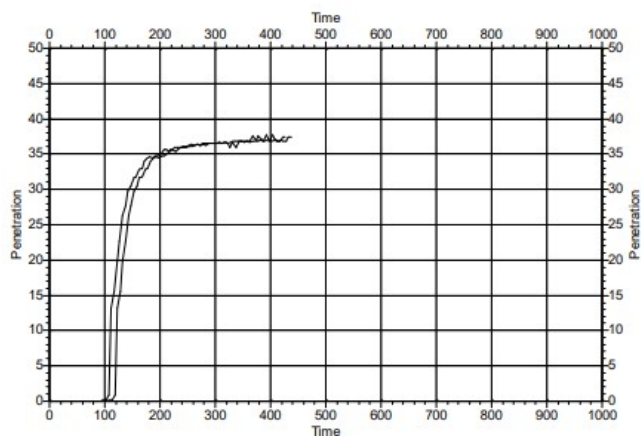


Anexa 6: 22.02.23 - Flux de mortar, 15 lovituri/15 secunde

Recipe	Values from cross measuring	Final flow
GP1.1	$\frac{21cm + 22,5cm}{2}$	21,75cm
GP1.2	$\frac{22,3cm + 22,5cm}{2}$	22,4cm
GP3.1	$\frac{21cm + 22,5cm}{2}$	22,5cm

CERTIFICATE

TEST NUMBER : 01	DATE OF TEST : 24/02/2023	FINAL SETTING : NO
KIND OF TEST : EN196-3:2005	SPECIMEN TIME : 13:42:00	TIME [m] : 5
POINTS MOVE [mm]	START DELAY[m]: ---	
30 4.00	1ST PEN TIME : 13:55:00	
24 5.25	SPECIMEN TYPE : C2	
18 5.25	WATER CONT.[%]: 50.0	
12 5.25	TEMPERATUR[°C]: 22.7	
2 5.25	HUMIDITY[%] : 24.2	
OPERATOR CODE : CJ	FALL TYPE : FREE	
CUSTOMER CODE : GP11	TIME TYPE : FIXED	



Anexa 8: 24.02.23 - Crearea GP5.2, modificarea GP1.2

GP5.2	Amount, mass
FA	270g
GGBFS	180g
Na ₂ SiO ₃	135,7g
KOH (14M)	89,3g
Sand	1350g
H ₂ O	10g
SP viscocrete, Sika® (2% of total binder)	9g

Anexa 9: 24.02.23 - Flux de mortar, 15 lovituri/15 secunde

	Flow	Slump
GP5.2	140mm	33mm

Apendicele 10: 24.02.23 - Rezistența la compresiune, 1 zi, cuburi de 50 mm x 50 mm x 50 mm, mortar

Recipe	Applied force	Force per surface area
GP1.1	10,9kN	4,36 $\frac{N}{mm^2}$
GP1.2	29,2kN	11,68 $\frac{N}{mm^2}$
GP3.1	12,2kN	4,88 $\frac{N}{mm^2}$

Apendicele 11: 28.02.23 - Rezistența la compresiune, 4 zile, cuburi de 50 mm x 50 mm x 50 mm, mortar

GP5.2 – 4 day test, compressive strength			
Nr.	Density, dry	Applied force	Force per surface area
1	$2357,6 \frac{kg}{m^3}$	107,8kN	$43,04 \frac{N}{mm^2}$
2	$2354,6 \frac{kg}{m^3}$	76,9kN	$30,76 \frac{N}{mm^2}$
3	$2348,8 \frac{kg}{m^3}$	99,8kN	$39,92 \frac{N}{mm^2}$

Cubul nr. 2 nu a fost plasat în centrul zonei de compresiune, rezultând o aplicare neperpendiculară a forței. Acest lucru a condus probabil la o rezistență mai scăzută la compresiune.

Apendicele 12: 28.02.23 - Rezistența la compresiune, 1 zi, cuburi de 50 mm x 50 mm x 50 mm, mortar

Compressive strength, 5 days			
Nr.	Recipe	Density	Force per surface area
2	GP1.1	$2236,8 \frac{kg}{m^3}$	$27,6 \frac{N}{mm^2}$
3	GP1.1	$2226,4 \frac{kg}{m^3}$	$28,08 \frac{N}{mm^2}$
2	GP1.2	$2199,2 \frac{kg}{m^3}$	$26,08 \frac{N}{mm^2}$
3	GP1.2	$2230,4 \frac{kg}{m^3}$	$31,64 \frac{N}{mm^2}$
2	GP3.1	$2188,8 \frac{kg}{m^3}$	$20,44 \frac{N}{mm^2}$
3	GP3.1	$2226,4 \frac{kg}{m^3}$	$22,68 \frac{N}{mm^2}$

Apendicele 13: 28.03.25 - Crearea amestecului pentru testul de curgere a mortarului și a cuburilor de 50 mm x 50 mm

	GP1.2-0,45	GP1.2-0,50
FA	270g	270g
GGBFS	180g	5,974g
Na ₂ SiO ₃	108,56g	108,56g
KOH	71,44g	71,44g
H ₂ O	45g	22,5g
Sand	1350g	1350g
SP - flube	-	9g

Anexa 14: 28.02.23 - Flux de mortar, 15 lovituri/15 secunde

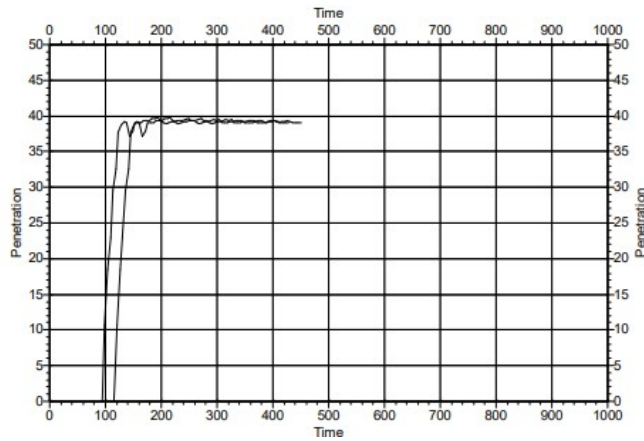
Recipe	Values from cross measuring	Final flow
GP1.2-0,45	$\frac{14,5cm + 14,5cm}{2}$	14,5cm
GP1.2-0,50	$\frac{11,1cm + 11,5cm}{2}$	11,3cm

Anexa 15: 01.03.23 - Crearea amestecului de pastă GP5.2 pentru testul Vicat

GP5.2 paste mix	
FA	270,0g
GGBFS	180,0g
Na ₂ SiO ₃	135,7g
KOH	89,3g
H ₂ O	10,0g
SP - viscocrete	9,0g

CERTIFICATE

TEST NUMBER : 02	DATE OF TEST : 01/03/2023	FINAL SETTING : NO
KIND OF TEST : EN196-3:2005	SPECIMEN TIME : 15:14:00	TIME [m] : 5
POINTS MOVE [mm]	START DELAY[m]: ---	
30 4.00	1ST PEN TIME : 15:40:00	
24 5.25	SPECIMEN TYPE : C2	
18 5.25	WATER CONT.[%]: 52.0	
12 5.25	TEMPERATUR[°C]: 23.3	
2 5.25	HUMIDITY[%] : 22.1	
OPERATOR CODE : CJ	FALL TYPE : FREE	
CUSTOMER CODE : GP52	TIME TYPE : FIXED	



Anexa 17: 01.03.23 - Masa proiectată la testul TAM

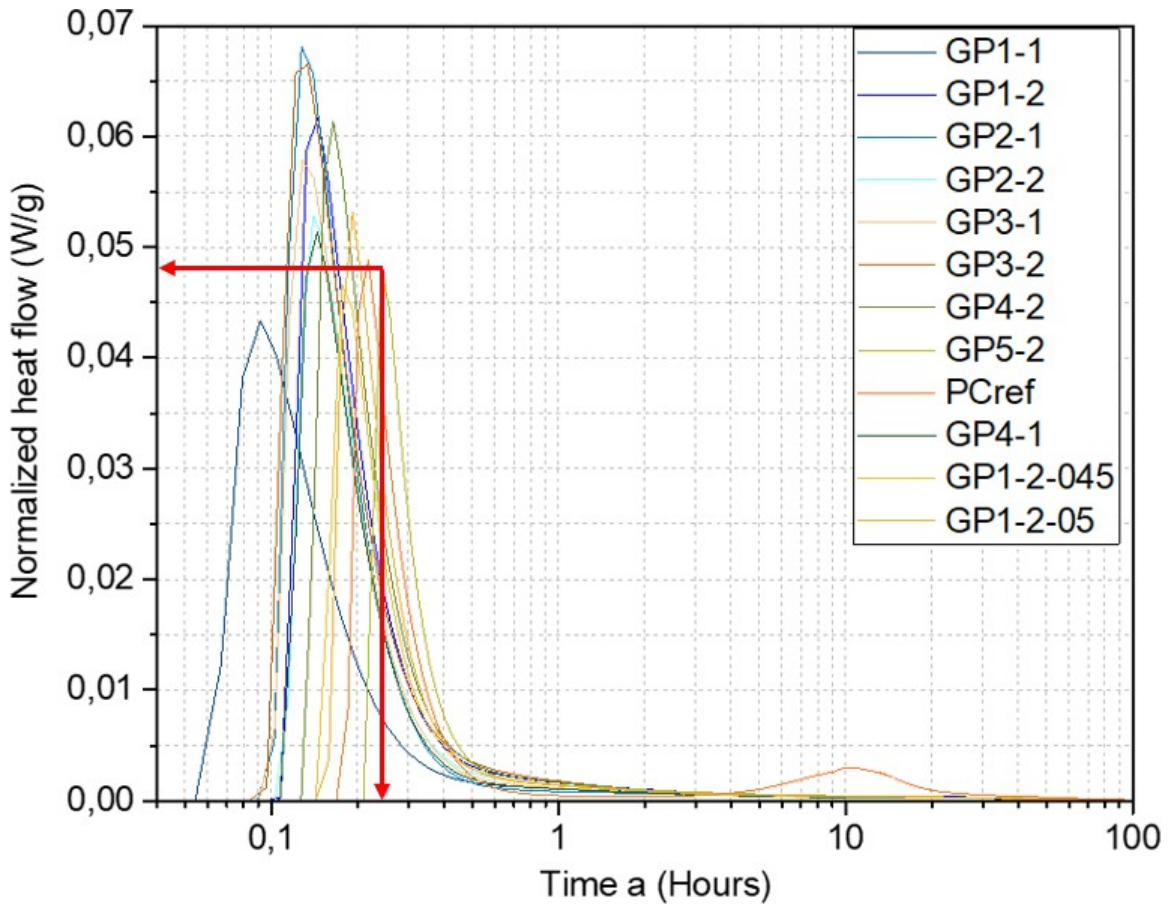
	GP5.2		GP1.2-0,45		GP1.2-0,50	
Recipe (R)/ actual (A)	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,334g	2,330g	2,449g	2,450g	2,400g	2,400g
m_{GGBFS}	1,556g	1,560g	1,633g	1,630g	1,600g	1,600g
$m_{Na_2SiO_3}$	1,173g	1,178g	0,985g	0,986g	1,965g	0,965g
m_{NaOH}	-	-	-	-	-	-
m_{KOH}	0,772g	0,790g	0,648g	0,650g	0,635g	0,629g
m_{H_2O}	0,086g	0,085g	0,204g	0,208g	0,400g	0,400g
$m_{SP\ visco}$	0,076g	0,073g	-	-	-	-
$m_{SP\ flube}$	-	-	0,082g	0,083g	-	-

Apendicele 18: 01.03.23 - Masa totală în fiole

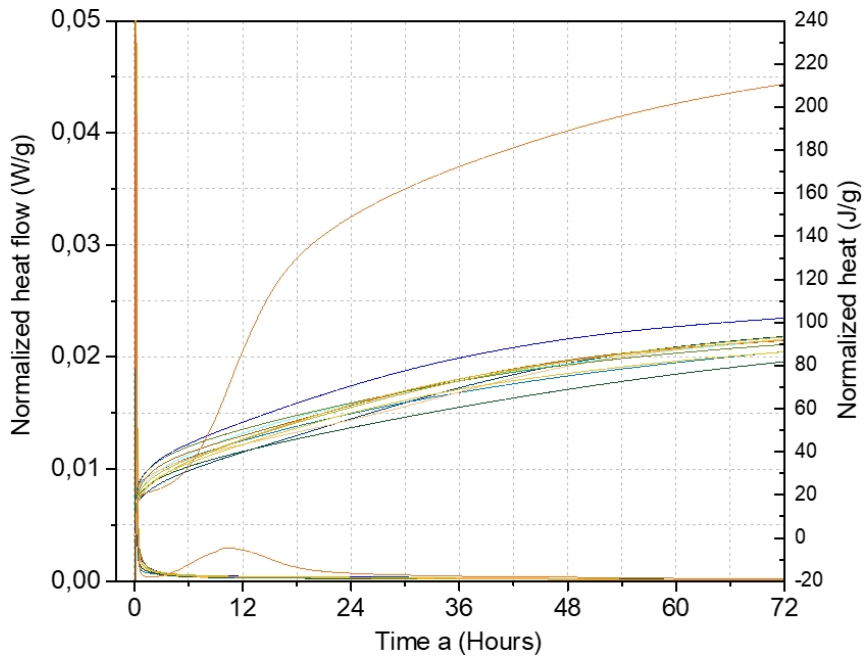
	GP5.2	GP1.2-0,45	GP1.2-0,50
Ampoule nr.	A1	A4	A5
$m_{ampoules}$	5,314	5,974g	6,021g

Compressive strength test, beams 40mmx40mm					
Recipe	Nr	Date of mixing	Curing age	Density	MPa
GP1.1		23.02.23	7	2282,7 kg/m ³	31,3
GP1.2		23.02.23	7	2275,5 kg/m ³	31,6
GP3.1		23.02.23	7	2271,6 kg/m ³	21,0
GP5.2		24.02.23	7	2289,3 kg/m³	44,9
GP1.2-0,5	1	28.02.23	1	2320,0 kg/m ³	18,6
GP1.2-0,5	2	28.02.23	1	2266,7 kg/m ³	42,1
GP1.2-0,5		28.02.23	7	2327,7 kg/m ³	19,4
GP1.2-0,45	1	28.02.23	1	1955,4 kg/m ³	9,9
GP1.2-0,45	2	28.02.23	1	1966,8 kg/m ³	9,3
GP1.2-0,45		28.02.23	7	2029,7 kg/m ³	18,3

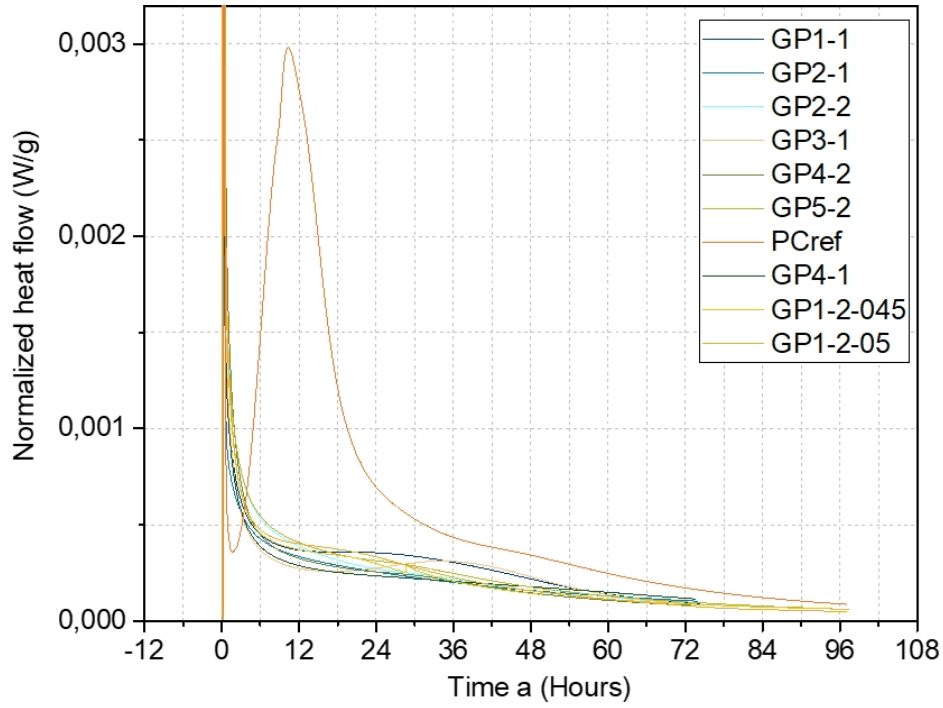
Anexa 20: 01.03.23 - Rezultatele TAM ale tuturor rețetelor în comparație, fluxul de căldură normalizat



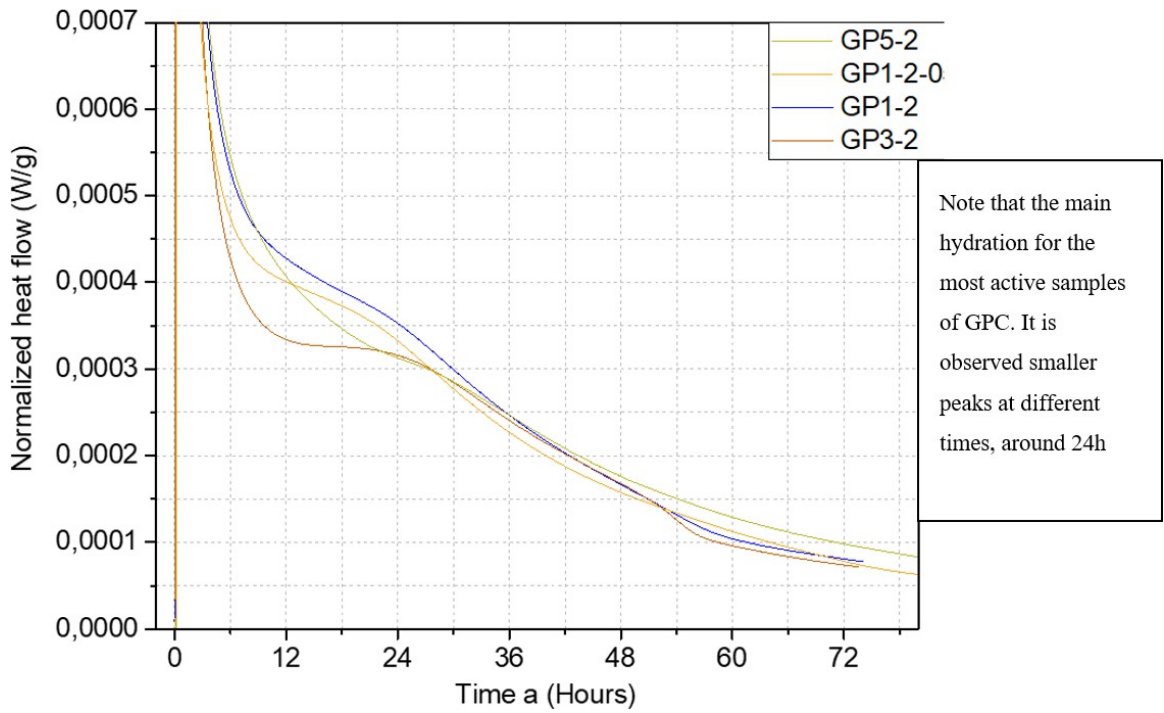
Anexa 21: 01.03.23 - Rezultatele TAM ale tuturor rețetelor în comparație, fluxul de căldură normalizat și căldura normalizată



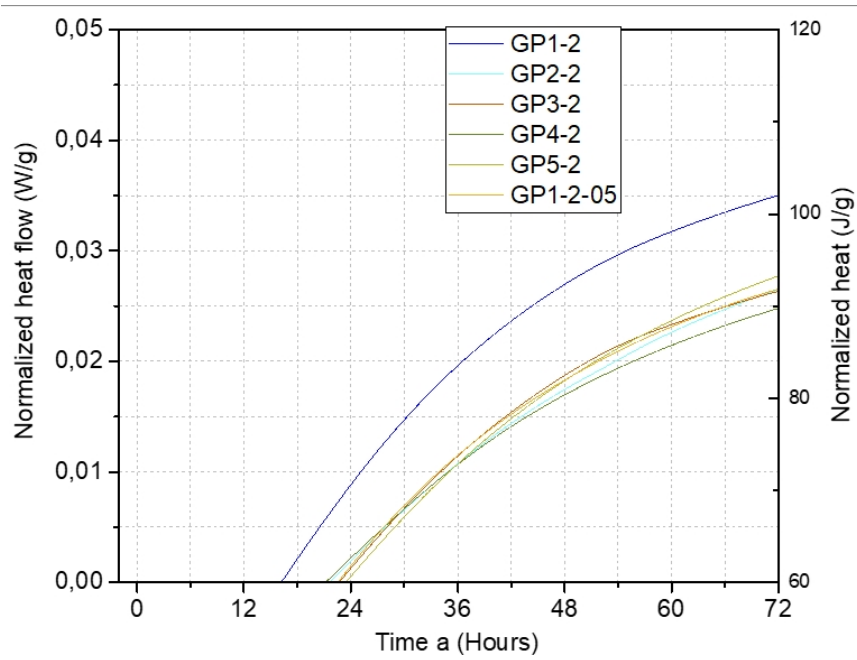
Anexa 22: 01.03.23 - Rezultatele TAM ale rețetelor în comparație, fluxul de căldură normalizat



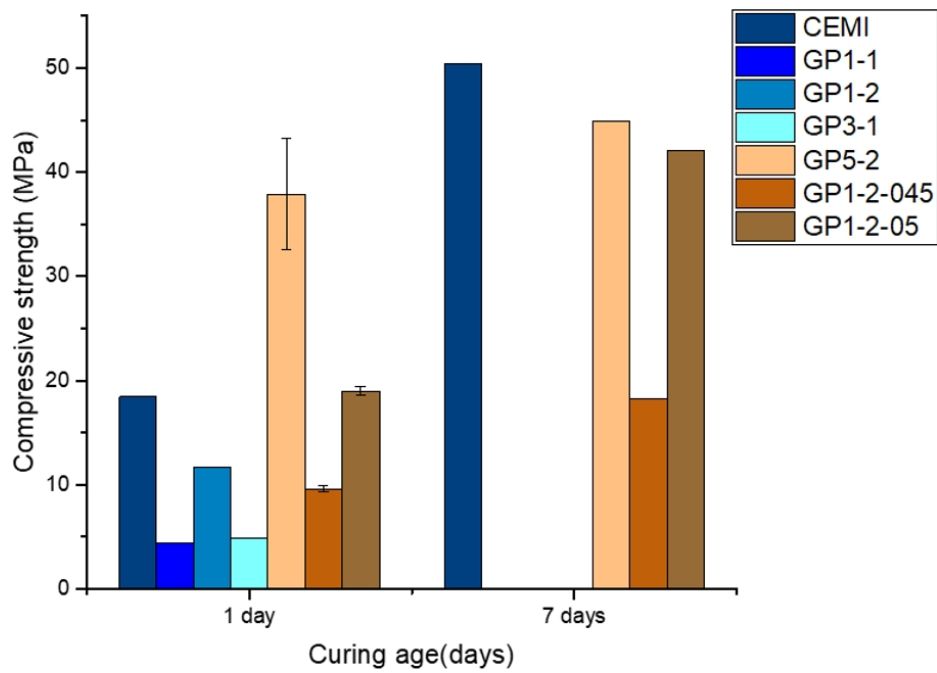
Anexa 23: 01.03.23 - Rezultatele TAM ale rețetelor în comparație, fluxul de căldură normalizat



Anexa 24: 01.03.23 - Rezultatele TAM ale rețetelor în comparație, fluxul de căldură normalizat



Anexa 25: 01.03.23 - Rezultatele rezistenței la compresiune a rețetelor în comparație

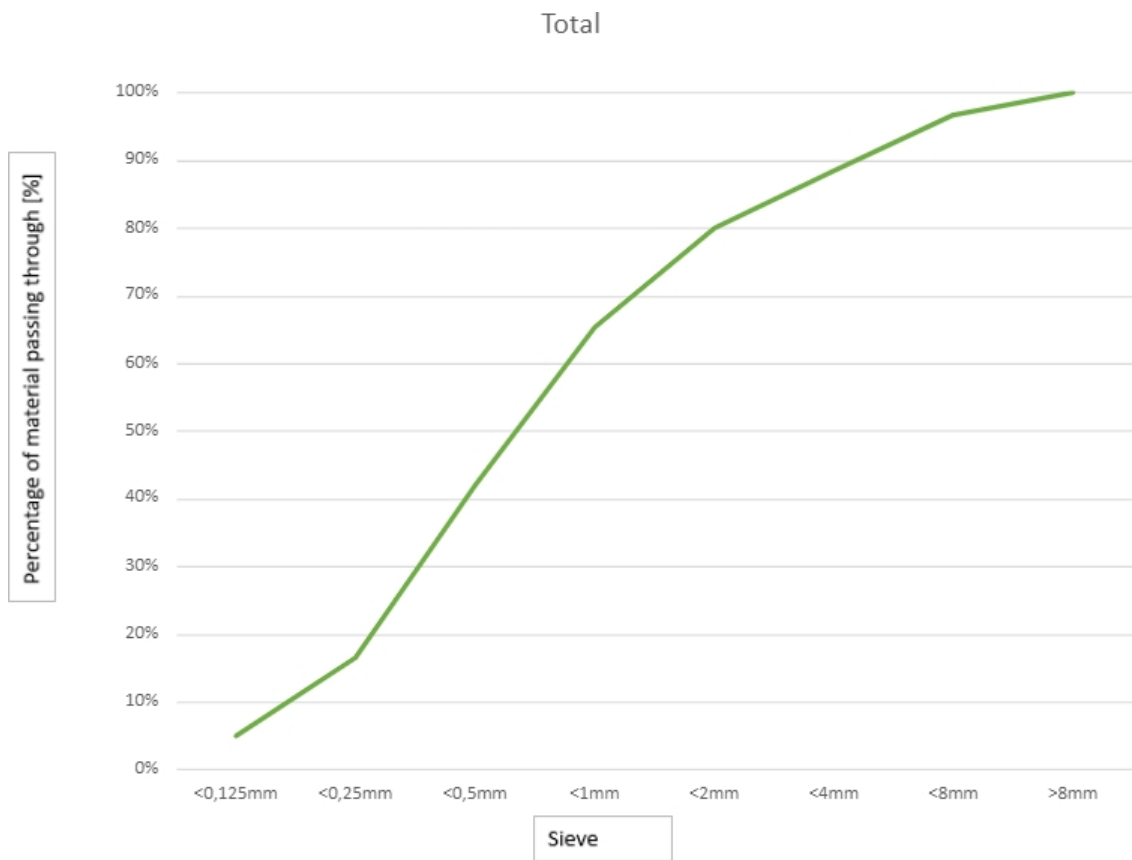


Apendicele 26: 22.03.23 - Rezistența la compresiune a GP5.2, vindecat la aer

Compressive strength date	Curing age	Number	Strength	Notes
23.03.23	1	1	$12,9 \frac{N}{mm^2}$	Not centered
23.03.23	1	2	$13,9 \frac{N}{mm^2}$	Flaked off on one side, 6mm
29.03.23	7	1	$34,4 \frac{N}{mm^2}$	Flaked off on one side, 2mm
29.03.23	7	2	$38,8 \frac{N}{mm^2}$	
19.04.23	28	1	$54,5 \frac{N}{mm^2}$	Moist on the bottom
19.04.23	28	2	$54,7 \frac{N}{mm^2}$	

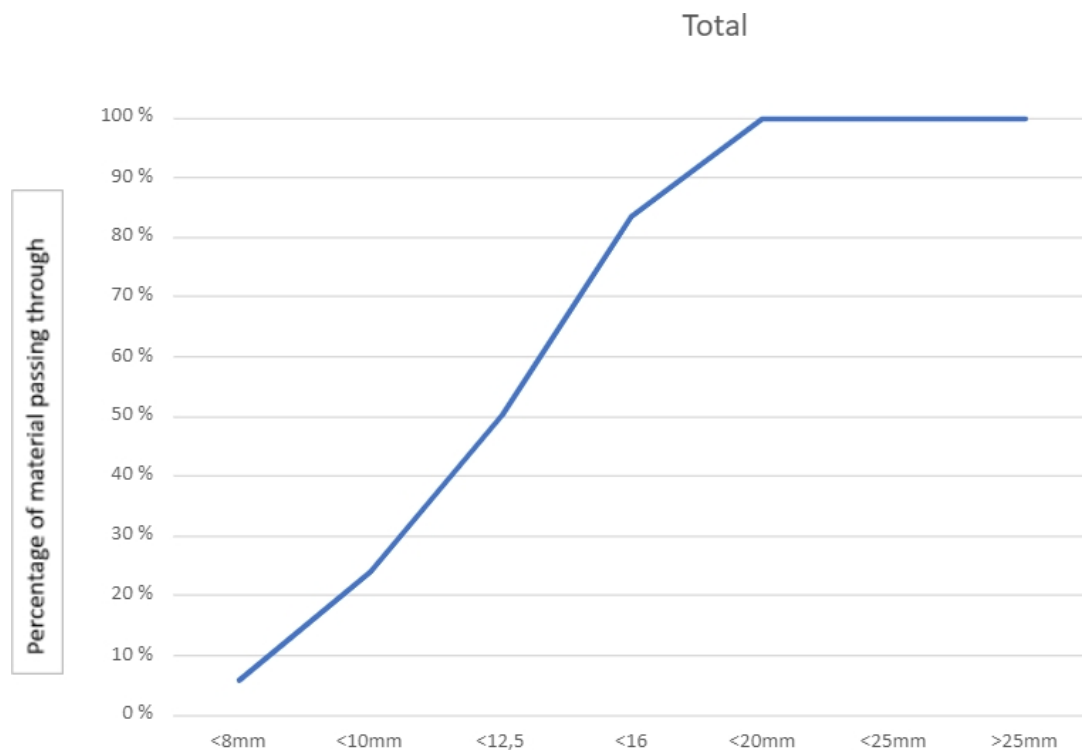
Apendicele 27: 22.03.23 - Cernerea agregatelor, 0-8 mm

Fraksjoner	Weight empty sieve [g]	Weight sand [g]	Measured sand [g]	Ratio sand/empty	Total
<0,125mm	1356	1406	50	5 %	5 %
<0,25mm	646	762	116	12 %	17 %
<0,5mm	590	842	252	25 %	42 %
<1mm	652	884	232	23 %	65 %
<2mm	732	878	146	15 %	80 %
<4mm	840	924	84	8 %	89 %
<8mm	974	1056	82	8 %	97 %
>8mm	954	986	32	3 %	100 %
Sum after sieving			994	100 %	



Apendicele 28: 22.03.23 - Cernerea agregatelor, 8-16 mm

Fraksjoner	Weight empty sieve [g]	Weight sand [g]	Measured sand [g]	Ratio sand/empty	Total
<8mm	1375,8	1551,5	175,7	6 %	6 %
<10mm	954,7	1498,1	543,4	18 %	24 %
<12,5	1060,9	1852,4	791,5	26 %	50 %
<16	1075,7	2074,1	998,4	33 %	84 %
<20mm	1368,2	1861,8	493,6	16 %	100 %
<25mm	1367	1367	0	0 %	100 %
>25mm	1257,9	1257,9	0	0 %	100 %
Sum after sieving			3002,6	100 %	



Apendicele 29: 22.03.23 - Conținutul de apă în agregate

0-8 mm conținut de apă în agregat:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M_3)} * 100 = \frac{1900 - 1896}{1900 - 300} * 100 = 0,25\%$$

8-16 mm conținut de apă în agregat:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M_3)} * 100 = \frac{3500 - 3500}{3500 - 300} * 100 = 0\%$$

Apendicele 30: Testul a început la 19.04.2023 și a avut o durată de 24 de ore înainte de măsurarea valorilor prezentate mai jos la 20.04.2023

Penetrarea clorurilor

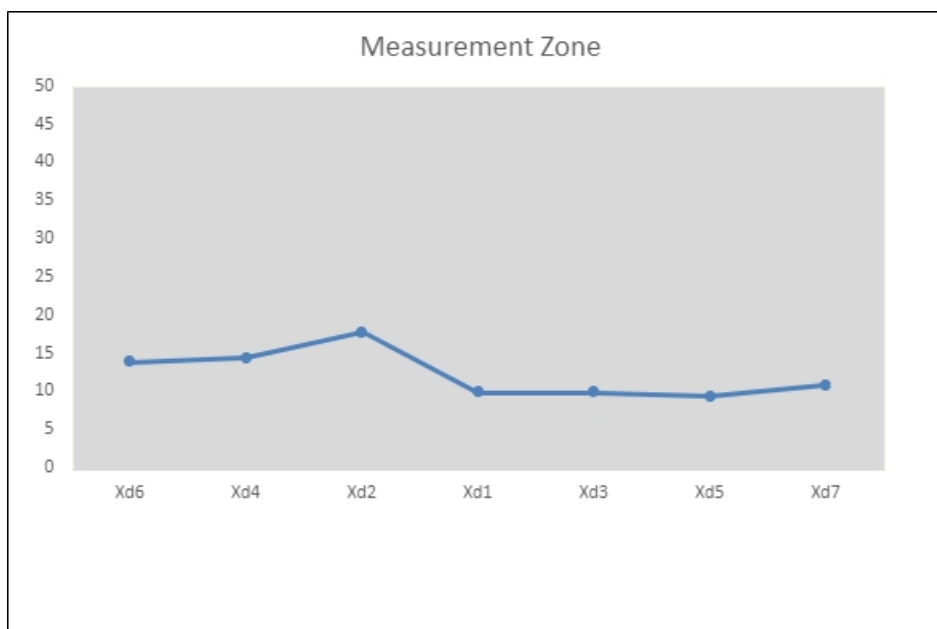
Preset conditions
10 V
24Hours
225mA

Measured values	Catholyte°C	Anolyte°C	Voltage
Start	15,2	24,5	225mA, 10V
Finish	18,2	19,3	217mA, 10,6V

Results of measured depths in GP5.2 in mm.

Xd6	Xd4	Xd2	Xd1	Xd3	Xd5	Xd7
14	14,5	17,9	10	10	9,5	11

Ilustrarea adâncimilor de penetrare a clorurilor în zona de măsurare (mm)



Coeficient de migrație non-staționară:

$$D_{nssm} = 0,0239 \frac{(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right)$$

Unde:

D_{nssm} - Coeficient de migrație în stare nestaționară, $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

U- Valoarea absolută a potențialului extern aplicat între cei doi electrozi. V
=10,6V

T- Valoarea medie a temperaturilor inițială și finală în anolit, °C. T=21,9°C

L- Grosimea probei, mm. L=50,6 mm

x_d - Valoarea medie a adâncimilor de penetrare, mm.

$x_d=12,4 \text{ mm}$ t- Durata încercării, ore. t=24h

$$\begin{aligned} &= D_{nssm} 0,0239 \frac{(273+21,9) \cdot 50,6}{(10,6-2) \cdot 24} \cdot \left(12,4 - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273+21,9) \cdot 50,6 \cdot 12,4}{10,6-2}} \right) \\ &= D_{nssm} 15,39 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \end{aligned}$$

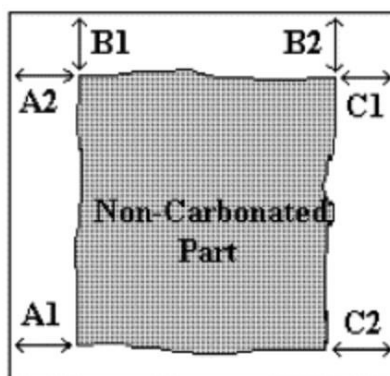
Coeficientul de migrație nestaționară (D_{nssm}) al amestecurilor de beton studiate, raport apă/ciment de 0,55:

Rezultatele vârstei de carbonatare:

Următoarea formulă este o formulă bazată pe *intuiție* și este o *propunere* privind modul de determinare a vârstei unei probe de beton, dintr-un test de carbonatare rapidă (Duran Atiș, 2003), pe baza:

- Concentrația de carbon în aer, 421PPM
- Concentrația de carbon în cameră, 50000PPM
- Durata procedurii de testare, 14 zile
- 1 an = 365 de zile

$$\frac{50000PPM}{421PPM} \times \frac{14 \text{ days}}{365 \text{ year}} = 4,56 \text{ years}$$



Ilustrarea zonelor de măsurare, la măsurarea adâncimii clorurilor.

Măsurători: 2 cuburi, vindecate în cuptor.

Cubul #1	Cubul #2
A1: 1,5 mm	A1: 3,37mm
A2: 0mm	A2: 4,03mm
B1: 7,26mm	B1: 7,48mm

B2: 3,67mm	B2: 6,5 mm
C1: 1,49mm	C1: 2,61mm
C2: 4,06mm	C2: 4,62mm
D: 2,946mm	D: 4,83mm

Apendicele 32: Consumul de energie în procesul de producție

	Impact category	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer
<input checked="" type="checkbox"/>	Non renewable, fossil	MJ	2,61E3	3,01E3
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, nuclear	MJ	210	564
<input checked="" type="checkbox"/>	Non-renewable, biomass	MJ	0,259	0,401
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, biomass	MJ	47,1	97
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, wind, solar, geothe	MJ	85	118
<input checked="" type="checkbox"/>	Renewable, water	MJ	1,79E3	1,56E3

Apendicele 33: Echivalent CO2

Se	Impact category	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer
<input checked="" type="checkbox"/>	GWP100 - fossil	kg CO2-eq	386	216
<input checked="" type="checkbox"/>	GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	0,593	0,599
<input checked="" type="checkbox"/>	GWP100 - land transformation	kg CO2-eq	0,218	0,291

Apendicele 34: Materialele din fiecare rețetă utilizate pentru comparația LCA

No	Process	Project	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer Concrete
1	Cement, blast furnace slag 6-20% (RoW) cement production, blast fu	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	kg	440	x
2	Diesel, burned in building machine (GLO) processing Cut-off, S	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	MJ	289	296
3	Electricity, medium voltage (NO) electricity voltage transformation fr	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	GJ	1,7	1,41
4	Flygeaske GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	243
5	Gravel, crushed (RoW) production Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	756
6	Ground granulated blast furnace slag (RoW) production Cut-off, S, t	GP5.2 LCA analysis	kg	x	162
7	Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde	GP5.2 LCA analysis	kg	x	7,87
8	Potassium hydroxide (RER) production Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	41,8
9	Sand (RoW) gravel and quarry operation Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	965
10	Sand (RoW) sand quarry operation, extraction from river bed Cut-of	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	1,63	x
11	Sodium silicate, solid (RER) sodium silicate production, furnace proce	GP5.2 LCA analysis	kg	x	43,9
12	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 (RER) transport, freig	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	tkm	116	x
13	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 (RER) transport, freig	GP5.2 LCA analysis	tkm	x	117
14	Waste concrete (Europe without Switzerland) treatment of waste con	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	2,31	x
15	Waste concrete (Europe without Switzerland) treatment of waste con	GP5.2 LCA analysis	ton	x	2,35
16	Waste scenario for landfill, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	ton	x	2,35
17	Waste scenario landfill	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	2,32	x
18	Water, completely softened (RER) market for water, completely soft	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	kg	242	x
19	Water, completely softened (RER) market for water, completely soft	GP5.2 LCA analysis	kg	x	91,2
20	Water, completely softened (RoW) market for water, completely soft	GP5.2 LCA analysis	kg	x	39,3

Apendicele 35: Fotografie în direct a consolidării unui perete de modul solid real

