

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

REZUMAT AL TEZEI DE DOCTORAT

ASPECTE PRIVIND PROIECTAREA
ECRANELOR DE ETANȘARE

Conducător științific

Prov. univ. dr. ing. Anton CHIRICĂ

Student doctorand

drd. ing. Cristian-Ștefan BARBU

Aprilie 2024

CUPRINS

Cuprinsul figurilor	3
Cuprinsul tabelelor.....	3
1 Introducere	4
2 Stadiul cunoașterii.....	4
2.1 Istoric și generalități	4
2.2 Beton plastic.....	5
2.2.1 Amestecul de materiale.....	6
2.2.2 Procedura de obținere a amestecului.....	8
2.2.3 Încercări de laborator pentru determinarea caracteristicilor fizice și mecanice ..	8
3 Analiza raportului apă-ciment-bentonită	12
3.1 Obiectivele studiului de laborator	12
3.2 Confecționarea probelor și metodologia de testare	13
3.2.1 Componentele amestecului	13
3.2.2 Confecționarea probelor.....	13
3.2.3 Determinarea vâscozității.....	14
3.2.4 Determinarea coeficientului de permeabilitate	14
3.2.5 Determinarea rezistenței la compresiune	15
3.3 Rezultatele studiului de laborator.....	15
3.4 Concluzii preliminare asupra studiului de laborator	20
4 Studiul influenței cantității de nisip standardizat adăugat în amestecul apă-ciment-bentonită.....	21
4.1 Obiectivele studiului de laborator	21
4.2 Confecționarea probelor și metodologia de testare	21
4.3 Rezultatele studiului de laborator.....	22
5 Stabilirea parametrilor pentru amestecurile cu raportul optim de nisip standardizat-parte solidă.....	26
5.1 Obiectivele studiului de laborator	26
5.2 Confecționarea probelor și metodologia de testare	26
5.3 Rezultatele încercărilor	27
5.4 Discuții asupra rezultatelor.....	28
5.4.1 Rezistența la compresiune.....	28
5.4.2 Coeficientul de permeabilitate	30
5.4.3 Vâscozitate.....	32
6 Concluzii și contribuții originale	34
Bibliografie	36

CUPRINSUL FIGURILOR

Fig. 2.1: Reprezentare a ecranului de etanșare sub construcția geotehnică [2]	5
Fig. 2.2: Reprezentare a deformațiilor unui ecran din beton plastic [26]	6
Fig. 2.3: Reprezentare a valorilor rezistenței la compresiune monoaxială întâlnite în literatură [2].....	9
Fig. 2.5: Rezultatele încercării de compresiune triaxială la diferite eforturi radiale [33].....	10
Fig. 2.6: Reprezentare a influenței conținutului de bentonită asupra rezistenței mecanice	10
Fig. 2.8: Variația coeficientului de permeabilitate funcție de rezistența la compresiune a betonului plastic [2]	11
Fig. 3.1: Restrângerea domeniului de interes pentru realizarea studiului	13
Fig. 3.2: Variația vâscozității pe domeniul studiat și marcarea probelor segregate	15
Fig. 3.3: Variația rezistenței la compresiune pe domeniul studiat	16
Fig. 3.4: Variația coeficientului de permeabilitate pe domeniul studiat	17
Fig. 3.5: Rezultatele încercărilor asupra probelor de beton plastic - vâscozitate vs rezistența la compresiune	17
Fig. 3.6: Variația rezistenței la compresiune în funcție de raportul apă-ciment	18
Fig. 3.7: Variația rezistenței la compresiune în funcție de raportul apă-bentonită	18
Fig. 3.8: Variația vâscozității în funcție de raportul apă-ciment.....	19
Fig. 3.9: Variația vâscozității în funcție de raportul apă-bentonită.....	19
Fig. 3.10: Limitarea domeniului de studiu pe baza rezultatelor încercărilor	20
Fig. 4.1: Reprezentarea pe diagrama ternară a amestecurilor utilizate în cel de-al doilea studiu de laborator	21
Fig. 4.5: Aspectul unei grupări de probe după testare	22
Fig. 4.8: Variația coeficientului de permeabilitate pe domeniul de studiu în funcție de valoarea raportului nisip:solide	23
Fig. 4.9: Variația rezistenței la compresiune nedrenate pe domeniul de studiu în funcție de valoarea raportului nisip:solide	24
Fig. 4.10: Variația vâscozității pe domeniul de studiu în funcție de valoarea raportului nisip:solide	25
Fig. 5.4: Distribuția rezistenței la compresiune pe domeniul de studiu restrâns	27
Fig. 5.6: Distribuția coeficientului de permeabilitate pe domeniul de studiu restrâns	28
Fig. 5.10: Rezistența la compresiune în funcție de raportul apă-ciment.....	29
Fig. 5.11: Rezistența la compresiune în funcție de raportul bentonită-ciment	29
Fig. 5.12: Rezistența la compresiune în funcție de raportul apă-bentonită.....	30
Fig. 5.13: Coeficientul de permeabilitate în funcție de raportul apă-ciment	31
Fig. 5.14: Coeficientul de permeabilitate în funcție de raportul bentonită-ciment.....	31
Fig. 5.15: Coeficientul de permeabilitate în funcție de raportul apă-bentonită	32
Fig. 5.16: Vâscozitatea în funcție de raportul apă-ciment	32
Fig. 5.17: Vâscozitatea în funcție de raportul bentonită-ciment.....	33
Fig. 5.18: Vâscozitatea în funcție de raportul apă-bentonită	33
Fig. 6.1: Abac baricentric.....	35

CUPRINSUL TABELELOR

Tab. 2: Valori ale rapoartelor dintre materialele amestecului, extrase din literatura de specialitate.....	12
--	----

1 INTRODUCERE

Teza de doctorat își propune să analizeze evoluția parametrilor fizico-mecanici ai amestecurilor apă-bentonită-ciment care stau la baza preparării suspensiilor de injecție, betoanelor plastice sau altor materiale cu rol de obstrucție a curgerii apei în pământ.

Având în vedere caracterul ternar al amestecului, în cadrul tezei de doctorat s-a propus reprezentarea baricentrică a componentelor (apă-bentonită-ciment), iar această diagramă a fost folosită ca suport pentru reprezentarea proprietăților fizico-mecanice analizate, într-un mod intuitiv. Ca urmare a domeniilor largi de variație acolo unde a fost necesar a fost folosită reprezentarea logaritmică normalizată a unor parametri (vâscozitate și permeabilitate). Folosind reprezentarea baricentrică a fost pusă în evidență și distribuția statistică a erorilor de determinare, care a arătat și gardul de încredere în parametrii obținuți, ținând cont de variația largă a valorilor de bază analizate.

Variația parametrilor fizico-mecanici în funcție de rețetă constituie o importantă informație de plecare în proiectarea structurilor ecranelor de etanșare oferind limite între care se pot alege parametrii de dimensionare, totodată facilitând întocmirea listelor de cantități privind consulul de liant și bentonită.

2 STADIUL CUNOAȘTERII

2.1 Istoric și generalități

Ecranele de etanșare sunt o variantă de pereți îngropați, care au început să fie utilizați în jurul anilor 1970 în Statele Unite ale Americii. Realizarea acestor bariere implică excavarea pământului din tranșee și amestecul cu lianți sau înlocuirea acestuia cu material de umplutură. În funcție de dimensiunile amplasamentului, cea mai economică și utilă modalitate de excavare a tranșeei este prin folosirea excavatoarelor standard sau cu braț lung, care pot atinge adâncimi de 20m. În cazul în care există limitări cu privire la spațiul disponibil, pentru excavarea tranșeei poate fi folosită și cupa graifăr care este utilizată în construcția pereților mulați. Cea mai importantă caracteristică a barierelor bentonitice este cea legată de continuitatea construcției: de la început până la sfârșit, excavația decurge într-o manieră continuă astfel asigurând cele 2 cerințe principale legate de impermeabilizare și dimensiunea barierei. [1]

Ecranele de etanșare sunt folosite ca mijloace de control al fluxului vertical de apă subterană, atât în cazul mediilor curate, cât și în cazul celor contaminate. De asemenea, astfel de structuri pot fi folosite la construcția sau repararea barajelor de pământ. Mecanismul de cedare care poate apărea la barajele de pământ este constituit de infiltrarea apei subterane prin baza rambleului. În acest fel, se produce o deteriorare a valorilor parametrilor de forfecare cauzând alunecarea masivului de pământ. Prin crearea unui ecran etanș până într-un strat teoretic impermeabil se oprește fluxul de apă care poate cauza cedarea structurii.

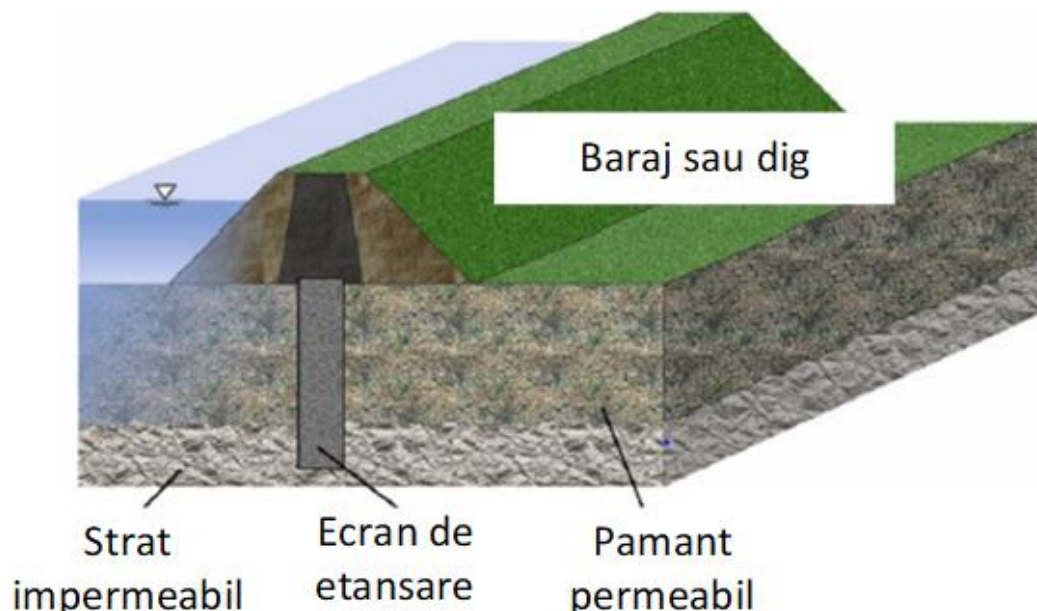


Fig. 2.1: Reprezentare a ecranului de etanșare sub construcția geotehnică [2]

De asemenea, astfel de structuri sunt folosite pentru reabilitarea structurilor geotehnice îmbătrânite, care și-au depășit perioada de viață și care necesită îmbunătățiri pentru a-și menține funcționalitatea.

Ecranele de etanșare reprezintă o modalitate economică și eficientă pentru remedierea infiltrațiilor sau pentru etanșarea siturilor contaminate. Pentru construcția barierelor, în funcție de cerințele geotehnice generate de amplasament, poate fi folosită o gamă variată de materiale.

2.2 Beton plastic

Conform normativelor europene în vigoare, betonul plastic este definit ca un material cu rezistență scăzută, cu un modul de elasticitate redus, capabil să preia întinderi mai mari decât betonul normal. De regulă, în compoziția acestui beton este introdusă o cantitate mică de ciment și este folosit un raport mare apă ciment. De asemenea, amestecul mai poate conține bentonită și/sau alte materiale precum cenușă și alți aditivi. Acest tip de beton trebuie produs conform specificațiilor speciale de proiectare astfel încât să respecte cerințele de permeabilitate, deformabilitate, și lucrabilitate impuse. Pentru betonul plastic nu există o limitare a raportului apă-ciment. [25]

Normativul american definește betonul plastic ca fiind o variație a betonului tradițional, în care bentonita reprezintă un înlocuitor parțial al cimentului. Betonul plastic a fost dezvoltat în principal pentru folosirea la construcția digurilor sau în pământuri moi, unde este cerută o deformabilitate mai ridicată din cauza tasărilor sau a încovoierilor și unde rezistența nu este cerința principală de proiectare. [10]

Acest tip de material este folosit și în zonele în care este prezentă activitatea seismică datorită capacității de preluare a eforturilor de întindere induse de mișcările pământului. Utilizarea acestui tip de beton implică o alegere atentă a rețetei în ceea ce privește cantitățile de material din amestec, caracteristicile acestora dar implică și un program riguros de încercări de laborator care să determine proprietățile fizico-mecanice ale amestecului dar și soluții alternative în vederea optimizării soluției alese. De asemenea, pentru controlul execuției și verificarea ipotezelor de calcul, pot fi realizate încercări in-situ care să ateste calitatea lucrărilor.

Ecranele din beton plastic se pot construi prin tehnologii similare celor de realizare a pereților molați. Tranșeea este excavată prin intermediul unor utilaje echipate cu tije grele la capătul cărora se află o cupă graifăr acționată hidraulic sau prin intermediul unor hidrofaze. Pentru a fi asigurată stabilitatea pereților tranșeei, este folosit noroiul bentonitic, astfel fiind împiedicată prăbușirea acestora. Pasul următor îl constituie turnarea betonului plastic. Betonul este turnat prin intermediul pâlniilor de betonare, începând de la partea inferioară a tranșeei, evitând astfel segregarea materialului. Pâlniile sunt retrase pe măsură ce acest proces avansează.

Betonul plastic este astfel caracterizat prin capacitatea de deformare sub efectul încărcărilor, ceea ce reprezintă un avantaj atunci când este formulată cerința pentru ductilitate sau atunci când sunt estimate eforturi de întindere generate de încărcări inegale de-a lungul peretelui sau de activitatea seismică. De asemenea, un alt avantaj este și probabilitatea mai mică de cedare sau fisurare a materialului care ar produce o creștere a permeabilității. [26]

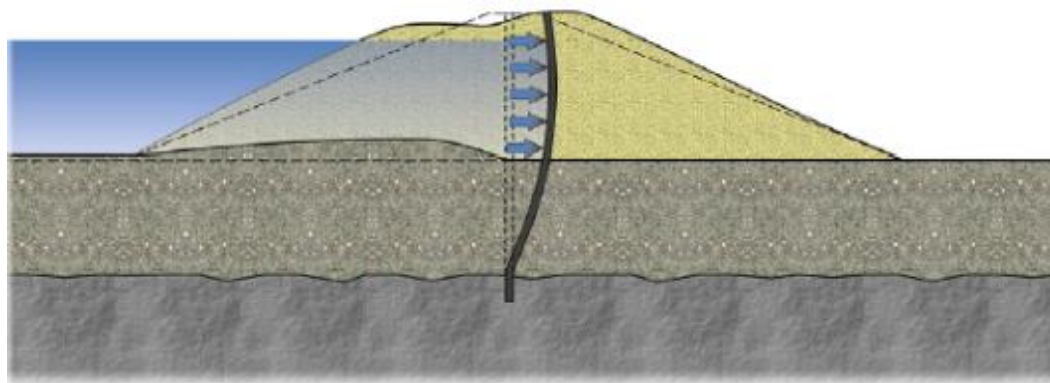


Fig. 2.2: Reprezentare a deformațiilor unui ecran din beton plastic [26]

2.2.1 Amestecul de materiale

Rețeta pentru acest tip de beton este similară celei pentru betonul tradițional. Elementul suplimentar îl constituie bentonita, care este adăugată cu scopul de a îmbunătăți atât permeabilitatea cât și ductilitatea ecranului. În funcție de specificațiile fiecărui proiect, există posibilitatea de a varia raportul dintre materialele utilizate în amestec. Pe lângă materialele de bază (ciment, bentonită, apă, nisip sau pietriș) pot fi folosiți aditivi care să îmbunătățească lucrabilitatea materialului sau care să îi întârzie timpul de priză.

2.2.1.1 Cimentul

Cimentul este un liant hidraulic, și anume un material anorganic fin, măcinat care, amestecat cu apă formează o pastă care face priză și se întărește datorită reacțiilor și proceselor de hidratare și care, după întărire își menține rezistența și stabilitatea chiar și sub apă. Cimentul dozat corespunzător și amestecat cu agregate și apă trebuie să fie capabil să producă beton sau mortar care să își mențină lucrabilitatea pentru o perioadă de timp suficientă, și după perioade de timp bine definite, trebuie să atingă niveluri de rezistență specificate. Cimenturile sunt constituite din diferite materiale și sunt statistic omogene în compoziție ca rezultat al asigurării calității proceselor de producție și manipulare. [27]

2.2.1.2 Agregate minerale

În vederea obținerii unei curbe granulometrice potrivite pentru rețeta de beton, trebuie avute în vedere următorii factori:

- forma agregatelor: agregatele rotunde sunt preferabile în favoarea celor colțuroase în ceea ce privește curgerea betonului;
- dimensiunea agregatelor: agregatele cu dimensiuni mari oferă o lucrabilitate ridicată dar măresc riscul de producere al segregărilor;
- proporția de material fin: utilizarea unei cantități mai mari din acest tip de material poate duce la realizarea unui amestec mai vâscos și poate compromite lucrabilitatea betonului din cauza necesității unui volum mai mare de apă care, în consecință, ar duce la un dozaj mai mare de aditivi. [30]

Agregatele joacă un rol important în amestecul de materiale pentru obținerea betonului plastic. Prin alegerea dimensiunilor potrivite poate fi redusă tendința de segregare a betonului. Lucrabilitatea materialului poate fi îmbunătățită prin utilizarea agregatelor rotunde provenite din bazinele râurilor și prin limitarea dimensiunii agregatului la 25.4mm (1 inch). Raportul dintre agregatele mari și cele fine are un impact în ceea ce privește densitatea peretelui, dar și a rezistenței acestuia. În general, este folosit un raport de 1:1. [10]

Normativul austriac ONORM B4452 limitează dimensiunea maximă a agregatelor la 22mm, dar notează că utilizarea unor particule mai mari de 16mm este rară. De asemenea, este menționat faptul că o atenție specială trebuie acordată riscului de segregare și deformabilitate a betonului plastic atunci când dimensiunea maximă a agregatului este mai mare de 8mm și că procentul de particule fine trebuie ales astfel încât să fie asigurată lucrabilitatea materialului. [31] [2].

În literatura de specialitate au fost folosite agregate cu dimensiunea maximă de 12mm [32], 4.75÷9.50, 9.5÷19.00mm [4] [33], până la 20.00mm. [34]

2.2.1.3 Bentonită

Bentonita este o denumire utilizată pentru materialele cu originea în argila naturală și care sunt compuse în principal din mineralul argilos denumit montmorillonit. [35] Bentonita se referă la orice material care este alcătuit din minerale ce aparțin grupului smectite și a cărui proprietăți sunt dictate de acest tip de minerale. Caracteristicile grupului de minerale smectitice sunt: capacitatea mare de schimb de cationi, o arie specifică mare, potențial de umflare mare și permeabilitate redusă. [36]

Cele mai frecvent întâlnite tipuri de bentonită sunt cele sodice sau calcice, acestea fiind caracterizate de tipul de cation extern care este adsorbit de suprafața particulei de argilă în timpul procesului de formare a mineralului sau, în cazul bentonitei tratate, în timpul procesării. Bentonita sodică este folosită mai des decât cea calcică datorită capacității superioare de umflare și a permeabilității reduse. [37] [38]. Chiar dacă bentonita calcică are o capacitate mai mică de umflare și o permeabilitate mai ridicată, unii cercetători au sugerat faptul că aceasta ar fi mai stabilă decât bentonita sodică atunci când este expusă la compușii chimici ai fluidelor. [36].

În cazul betonului plastic, bentonita din compoziție acționează ca un agent stabilizator și previne segregarea betonului, creând un amestec omogen. Proprietățile bentonitei sunt: plasticitatea și capacitatea schimbării de ioni, care contribuie la uniformitatea amestecului

molecular al aranjamentului, crește plasticitatea și reduce permeabilitatea [39]. Bentonita are un potențial de umflare de până la 300% după amestecul cu apa, această proprietate făcând ca bentonita saturată să fie utilizabilă la execuția betonului plastic pentru a elimina efectele negative ale absorbției mari de apă în cazul utilizării bentonitei uscate [40]. Pentru a satura bentonita, raportul apă-bentonită ar trebui să fie de minim 3 și saturarea acesteia ar trebui efectuată cu cel puțin 24 de ore înainte de producerea betonului plastic. Amestecul de bentonită și apă trebuie făcut prin intermediul unor lame speciale care să asigure saturarea completă și omogenitatea pastei [41].

2.2.2 Procedura de obținere a amestecului

Una dintre modalitățile de amestecare a părților ce compun betonul plastic constă în hidratarea inițială a bentonitei într-un interval de timp de până la 24 de ore. După trecerea acestei perioade, este adăugat cimentul, iar mai apoi agregatele. [2] [4] [5] [32]. O altă procedură implică hidratarea prealabilă a bentonitei cu o parte din apa utilizată în amestec, ca mai apoi să fie introduse celelalte componente. De asemenea, este posibilă hidratarea pe o durată de 8 ore a bentonitei și adăugarea ulterioară a unui amestec uscat de agregate și ciment. Procedurile diferite de amestec generează diferențe în materie de proprietăți mecanice dar și în materie de valori ale coeficienților de permeabilitate. Hidratarea bentonitei nu ține numai de tipul bentonitei, ci și de metoda și utilajele folosite în crearea amestecului. [2]

Amestecul materialelor poate fi realizat și în condiții uscate, astfel nefiind necesară hidratarea prealabilă a bentonitei. Această metodă prezintă două aspecte importante:

- imediat ce apa a fost introdusă în amestec, pasta trebuie imediat malaxată astfel încât să se producă hidratarea bentonitei și să se asigure omogenitatea amestecului;
- cantitatea de bentonită uscată trebuie controlată cu atenție și introdusă încet în amestec astfel încât să aibă suficient timp pentru a absorbi apa; întreaga cantitate de bentonită nu trebuie introdusă deodată în amestec pentru a evita producerea de acumulări de material nesaturat ceea ce ar duce la crearea unui material inefficient. [41]

Beneficiul utilizării bentonitei în stare uscată constă în economisirea timpului, dar și înlăturarea unor impedimente de ordin tehnologic întrucât nu ar mai fi necesară hidratarea și păstrarea prealabilă a noroiului bentonitic pentru o perioadă de până la 24 de ore. După cum a fost descoperit în studii anterioare, rezistența la compresiune și întindere a betonului plastic este aceeași indiferent dacă bentonita utilizată a fost hidratată sau nu, iar pentru perioade de atingere a maturității mai îndelungate diferențele devin nesensibile. În cazul permeabilității, au fost înregistrate valori ușor mai ridicate pentru betonul plastic în care a fost utilizată bentonita uscată. [41]

2.2.3 Încercări de laborator pentru determinarea caracteristicilor fizice și mecanice

Utilizarea corectă a unui material cu funcțiunile deținute de betonul plastic implică determinarea unei serii de parametrii fizici și mecanici care să asigure cerințele de performanță din faza de proiectare. Proprietățile betonului plastic pot fi adaptate în funcție de condițiile din amplasament și în funcție de exigențele structurale care trebuie îndeplinite.

2.2.3.1 Încercarea de compresiune monoaxială

Caracterizarea betonului plastic poate fi începută de la încercarea de compresiune monoaxială. Conform normativelor de producere a betonului, raportul apă-ciment este un factor important

în stabilirea clasei materialului, deci a rezistenței la compresiune: odată cu scăderea raportului apă-ciment este constatată creșterea rezistenței la compresiune. [42]

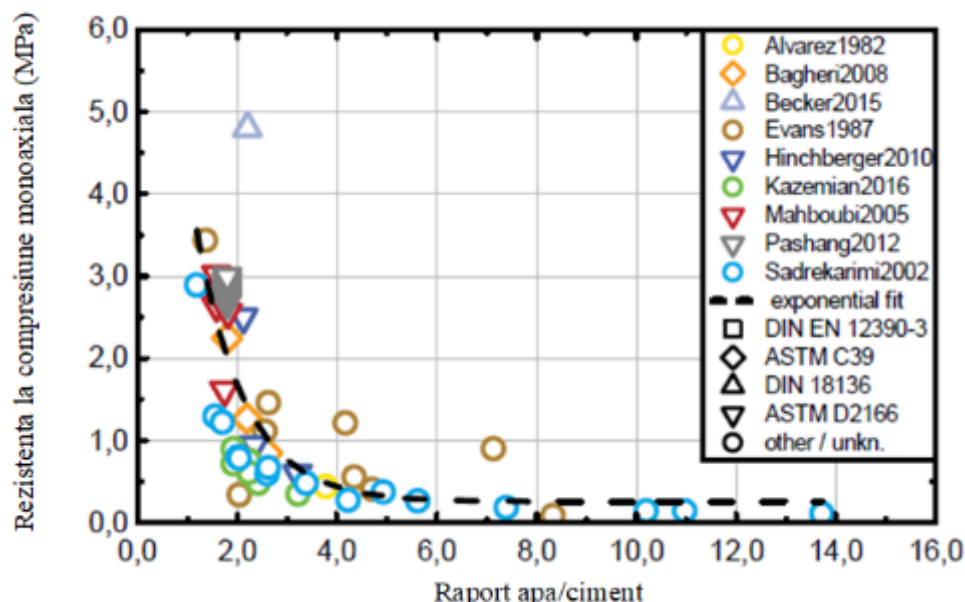


Fig. 2.3: Reprezentare a valorilor rezistenței la compresiune monoaxială întâlnite în literatură [2]

În Fig. 2.3 sunt prezentate rezultatele unor diverse lucrări de cercetare privind încercările de compresiune monoaxială asupra unor rețete diverse de beton plastic, ajuns la maturitate (28 de zile). Se poate observa, după cum era cunoscut în cazul betoanelor, faptul că odată cu creșterea raportului apă-ciment se constată o scădere a rezistenței la compresiune a materialului, deși influența bentonitei se traduce printr-o modificare a disponibilității apei din amestec de a hidrata cimentul. Cu alte cuvinte, se observă scăderea rezistenței betonului plastic cu creșterea raportului apă-ciment dar comportarea generală este guvernată și de cantitatea de bentonită.

2.2.3.2 Încercarea de compresiune triaxială

În literatura de specialitate au fost elaborate studii care cuprind încercări de compresiune triaxială pe diferite rețete de beton plastic. Încercările de compresiune triaxială au rolul de a evidenția relația efort-deformație în condiții statice sub anumite eforturi impuse.

Încercările efectuate au fost de tip CU (consolidat-nedrenat) [32] [33] sau de tip CD (consolidat-drenat) [43]. Anterior determinării parametrilor de cedare ai probelor, acestea au fost saturate, astfel determinându-se și coeficientul de permeabilitate. Probele utilizate au fost pregătite anterior efectuării încercărilor în mod similar cu probele de pământ: epruvetele au un raport înălțime:diametru egal cu 2, sunt protejate prin intermediul unei membrane și au la capete pietre poroase. În timpul încercărilor au fost măsurate atât eforturile impuse, cât și deformațiile rezultate și presiunea apei din pori.

Asupra probelor încercate a fost observată influența presiunii din celulă. A fost constatată creșterea modului de elasticitate dar și rezistența la compresiune a probelor odată cu presiunea la care este efectuată încercarea [43]. De asemenea, mecanismul de cedare al probei este influențat de presiunea de consolidare. Probele care sunt încercate la o presiune mică au un comportament casant la cedare, în timp ce pentru valori mai mari ale presiunilor de consolidare, comportamentul probelor este unul ductil, materialul prezentând întinderi cu până la 8-9% mai mari pentru eforturile de cedare. [33]

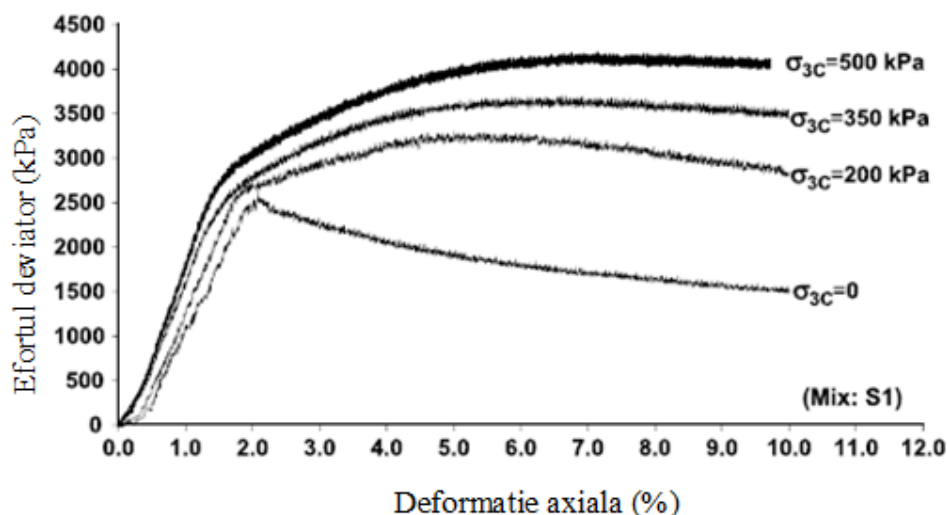


Fig. 2.4: Rezultatele încercării de compresiune triaxială la diferite eforturi radiale [33]

Crescând conținutul de bentonită, vârful și panta părții liniare a curbei efort-deformație devin mai reduse. Acest fapt se datorează rolului bentonitei de a slăbi legăturile formate între particulele de ciment și agregate, de asemenea, reducând și viteza de hidratare a cimentului din probă. Astfel, rezistența la compresiune și modulul de elasticitate a betonului plastic crește odată cu cantitatea de ciment introdusă în amestec sau scade în funcție de cantitatea de bentonită. [43] [44]

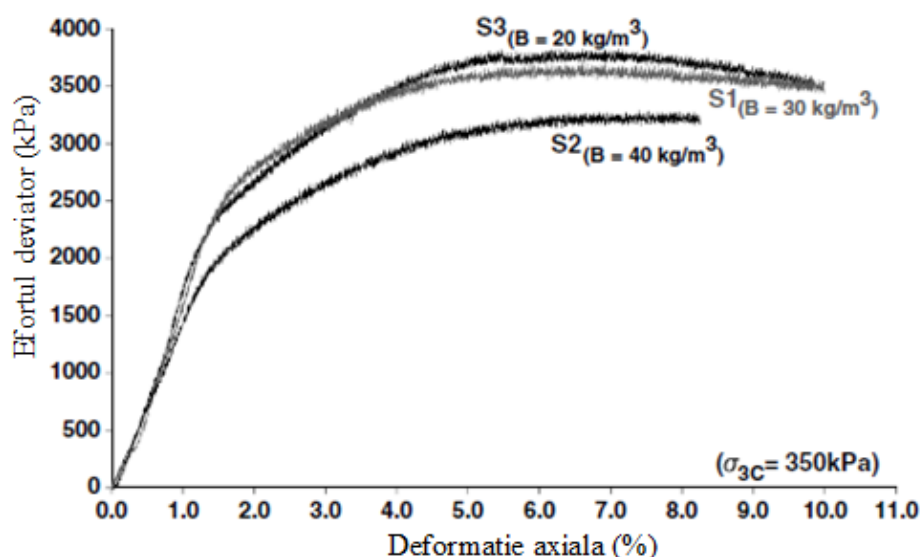


Fig. 2.5: Reprezentare a influenței conținutului de bentonită asupra rezistenței mecanice

2.2.3.3 Conductivitatea hidraulică

Scopul structurilor din beton plastic este de asigurare a etanșeității siturilor contaminate, oprirea sau devierea fluxului de apă subterană sau remedierea unor infiltrații la nivelul digurilor sau a barajelor din pământ. Astfel, având în vedere funcționalitățile structurilor, caracteristica cu cea mai mare importanță este constituită de comportamentul hidraulic al materialului.

Permeabilitatea betonului este în strânsă conexiune cu porozitatea materialului (dimensiunile și distribuția porilor) și cu raportul apă/ciment utilizat în fabricarea betonului.

Pentru respectarea unor cerințe speciale privind asigurarea impermeabilității, este important ca raportul apă/ciment utilizat în amestec să fie redus la minim, în același timp fiind păstrate cerințele de consistență ale betonului. În practică, pentru a atinge un anumit grad de impermeabilitate a betonului este necesar și un control al clasei de rezistență a acestuia, în corelație și cu raportul apă/ciment care trebuie redus cât mai mult. Raportul apă/ciment considerat în proiectarea compoziției trebuie să satisfacă cerințele betonului în materie de clasă de rezistență, durabilitate și grad de impermeabilitate. [45]

Permeabilitatea materialelor precum betonul plastic este mai mare decât permeabilitatea betoanelor clasice. În cazurile în care este cerut un modul de elasticitate redus dar și o permeabilitate redusă a materialului, satisfacerea ambelor criterii este dificilă. Din cauza valorilor mari ale raportului apă-ciment, permeabilitatea amestecurilor este mare. Valorile coeficienților de permeabilitate ale betonului plastic se situează în intervalul 10^{-8} ÷ 10^{-10} m/s. [4] [9].

Considerând rezistența scăzută la compresiune și valorile coeficienților de permeabilitate, betonul plastic poate fi supus încercărilor geotehnice. În Fig. 2.6 sunt prezentate rezultate din literatură în care sunt corelate valori ale coeficientului de permeabilitate funcție de rezistența la compresiune a betonului plastic.

Coeficientul de permeabilitate al probelor de beton plastic crește odată cu scăderea rezistenței la compresiune. Acest fenomen poate fi atribuit unei porozități mai mari a materialului care crește odată cu mărirea raportului apă-ciment, în consecință reducând rezistența la compresiune. [2]

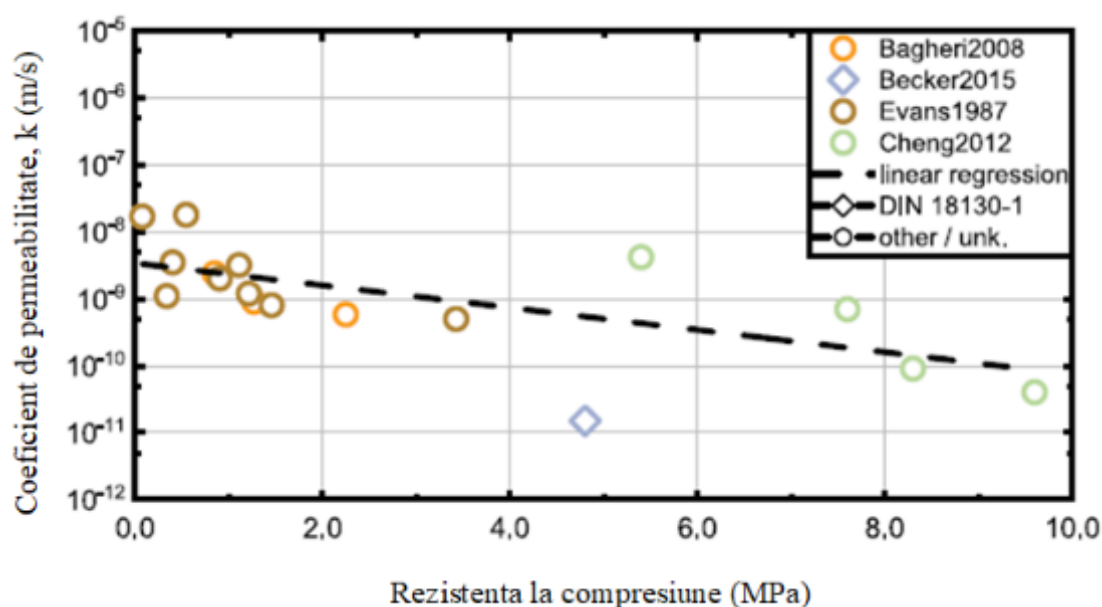


Fig. 2.6: Variația coeficientului de permeabilitate funcție de rezistența la compresiune a betonului plastic [2]

3 ANALIZA RAPORTULUI APĂ-CIMENT-BENTONITĂ

În literatura de specialitate, diverși autori au utilizat la fabricarea probelor rapoarte variate între elementele constitutive ale amestecului. Aceste valori au stat la baza elaborării prezentului studiu de laborator. În studiu s-a încercat o acoperire cât mai profundă a variației rapoartelor dintre materiale, dar considerând influența importantă pe care cantitatea de bentonită o are asupra rezistenței la compresiune dar și a capacității de retenție a apei (fapt demonstrat și în cadrul prezentului studiu de laborator), proporția de bentonită folosită în amestecurile de beton plastic a fost limitată la 30%.

Tab. 1: Valori ale rapoartelor dintre materialele amestecului, extrase din literatura de specialitate

Literatura de specialitate	Raport apă-ciment	Raport apă-bentonită	Raport bentonită-ciment
Studiul prezent	1.25÷3.65	2.00÷10.40	0.175÷1.25
Shepherd et al, 2020 [26]	3.30÷10.00	-	0.10÷0.24
Fadaie et al, 2019 [41]	1.60÷2.00	8.00÷20.00	0÷0.40
Pisheh et al, 2018 [33]	1.80	6.30÷10.20	0.14÷0.29
US Dept. of Interior, 2014 [10]	1.00÷2.78	6.67÷13.90	0.10÷0.22
Hinchberger et al, 2010 [32]	1.70÷2.35	12.50÷18.20	0.20÷0.30
Bagheri et al, 2008 [4]	1.80÷2.60	13.00	0.14÷0.23

3.1 Obiectivele studiului de laborator

Acest studiu propune o abordare diferită în ceea ce privește evaluarea proprietăților fizico-mecanice (vâscozitate, permeabilitate, rezistență la compresiune) ale betonului plastic și reprezentarea grafică a proporțiilor procentuale ale materialelor componente. Reprezentarea amestecurilor este făcută pe un subdomeniu al unei diagrame ternare pe care componentele sunt exprimate sub formă de procente. Proprietățile materialului (vâscozitate, permeabilitate și rezistența la compresiune) sunt prezentate ca noduri ale unei grile care corespunde amestecurilor posibile.

Prezentul studiu constă în fabricarea și încercarea în laboratorul geotehnic a 52 de probe de beton plastic. Comportarea acestui material este guvernată în principal de relația dintre conținutul de apă-bentonită-ciment. Pentru prevenirea fisurării materialului, la fabricarea probelor a fost utilizat nisip standardizat, descris în standardul EN 196-1 – Metode de testare al cimentului, în raport 1:1 cu partea solidă a amestecului (bentonită și ciment).

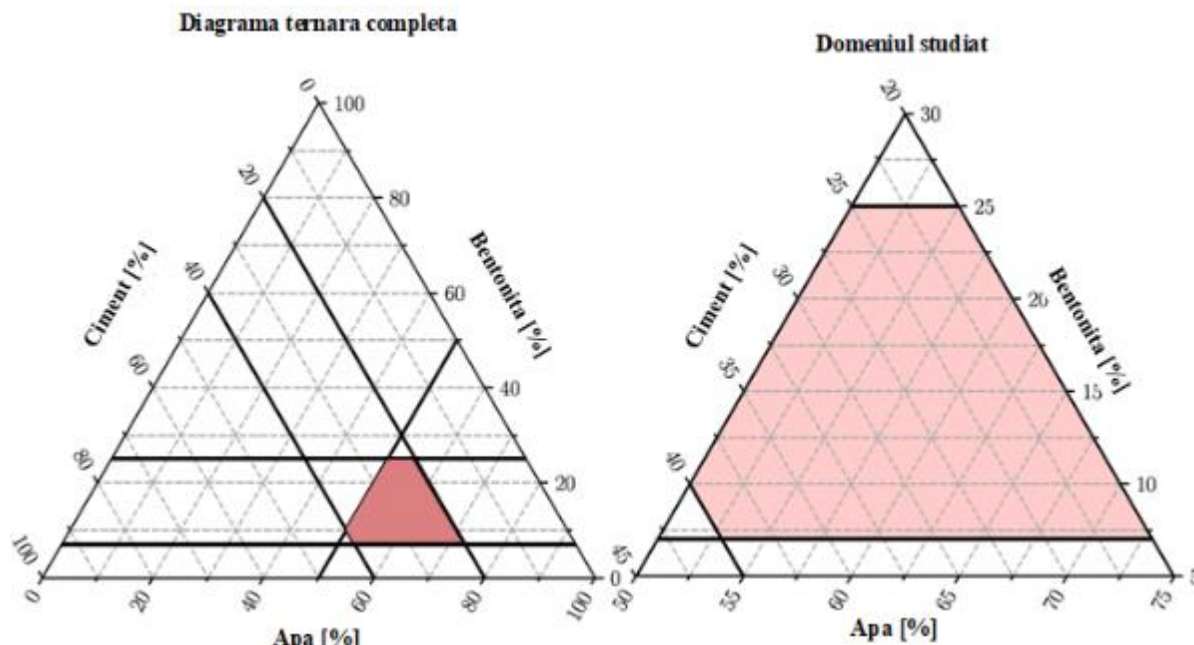


Fig. 3.1: Restrângerea domeniului de interes pentru realizarea studiului

3.2 Confecționarea probelor și metodologia de testare

3.2.1 Componentele amestecului

Pentru pregătirea probelor a fost utilizat ciment Portland cu rezistență inițială ridicată, având rezistența la compresiune de 42.5MPa (CEM IIA 42.5R). Cimentul folosit la fabricarea probelor nu a fost aditivat sau îmbunătățit pentru creșterea performanțelor. Pentru confecționarea probelor a fost utilizată bentonită sodică, care în mod uzual este întrebuințată la prepararea fluidelor de foraj. Bentonita sodică are capacitatea de a mări vâscozitatea fluidului de foraj și are proprietăți hidroizolante. Conform recomandărilor standardului EN 196-1:2016 privind metodele de testare a cimentului, pentru pregătirea probelor a fost utilizat nisip standardizat.

În afara acestui tip de nisip nu au fost folosite agregate de altă natură sau dimensiuni diferite. Folosirea nisipului a fost motivată de încercarea de a preveni fisurarea probelor în timpul procesului de hidratare a betonului plastic. În rețeta fiecărui amestec, raportul nisip-liant hidraulic (ciment și bentonită) a fost de 1:1. În ciuda faptului că nisipul influențează comportamentul general al betonului plastic, relația dintre cantitatea de nisip și cea de bentonită și ciment este bijectivă. Mai mult decât atât, într-o reprezentare baricentrică 4D, din cauza variației liniare, cantitatea de nisip, creează un plan.

3.2.2 Confecționarea probelor

În urma studiului literaturii de specialitate au fost identificate trei opțiuni de obținere a amestecului de componente. Una dintre ele, mai des întâlnită presupune hidratarea prealabilă a bentonitei cu 24 de ore înainte de a adăuga cimentul și agregatele [2] [4] [5] [32]. O altă posibilitate este constituită de hidratarea în avans a bentonitei cu o parte din cantitatea totală de apă folosită în amestec și apoi, introducerea celorlalte componente. Ultima opțiune este amestecarea componentelor uscate (ciment, bentonită și nisip) și apoi, introducerea apei.

Conform unui studiu, performanțele betonului plastic în ceea ce privește permeabilitatea și rezistența la compresiune nu sunt afectate de faptul că bentonită a fost sau nu hidratată în avans. Mai mult decât atât, pentru intervale mai mari de timp, după atingerea maturității materialului, diferențele devin nesesizabile. [41]

După cântărirea fiecărei componente a fost realizat amestecul uscat astfel încât materialele să fie distribuite într-o manieră uniformă. În cazul în care bentonita nu ar fi fost distribuită în întreaga masă a amestecului, există posibilitatea ca, la adăugarea apei, să se formeze acumulări de material care să ducă la realizarea unui amestec eterogen cu concentrări de zone nehidratate. Distribuția neuniformă a amestecului afectează atât procedura de confecționare a probei (zone de segregare sau zone cu cavități) cât și performanțele materialului. În urma realizării corespunzătoare a amestecului solid a fost adăugată cantitatea necesară de apă. În continuare, amestecul a fost malaxat până la obținerea unei paste de consistență uniformă. Materialul rezultat a fost turnat în ștanțe cilindrice din plastic cu diametrul de 50mm și înălțimea de 100mm, potrivite pentru testarea ulterioară a materialului în aparatul de compresiune triaxială. Prealabil turnării materialului, pe interiorul ștanțelor a fost dispus un strat fin de ulei tehnic cu scopul de a favoriza decofrarea ușoară a betonului plastic. Programul de testare al probelor a fost început după 28 de zile de la confecționarea acestora astfel încât materialul fabricat să își atingă clasa.

Pentru valori extreme ale fiecărei componente a fost observat un comportament nefavorabil, fapt care indică suficiența extinderii gamei de valori. Conținutul excesiv de bentonită a condus la obținerea unui material sfărâmișor, în timp ce o cantitate mai mare de ciment a redus lucrabilitatea amestecului. Un conținut ridicat de apă a cauzat fisurarea probelor și sedimentarea agregatelor, în ciuda asigurării unui grad de lucrabilitate ridicat al materialului

3.2.3 Determinarea vâscozității

Determinarea vâscozității a fost realizată imediat după turnarea betonului plastic în formele cilindrice. Această încercare a fost efectuată utilizând un vâscozimetru rotațional Haake Viscotester 7 Plus. Viscozimetrul măsoară rezistența amestecului asupra tijelor rotaționale care pot avea diferite geometrii (acestea sunt alese în funcție de consistența materialul testat). Rezistența obținută dictează vâscozitatea amestecului. Considerând pasta supusă încercării ca fiind un fluid cvasi-newtonian, din panta $\tau-\dot{\gamma}$ rezultă vâscozitatea dinamică a materialului.

Proba de beton plastic în stare proaspătă a fost încercată utilizând viscozimetrul dinamic. În cadrul încercării au fost folosite mai multe viteze de rotații a tijei aparatului, variind de la 0.1 rot/min la 100 rot/min. Valoarea vâscozității a fost aleasă în funcție de gradul de încredere al măsurării, acesta fiind indicat de aparat. S-a preferat utilizarea valorilor primelor trepte de încercare din cauza susceptibilității unor probe la căderea materialului din suspensie, imediat după turnarea în formele cilindrice.

3.2.4 Determinarea coeficientului de permeabilitate

Coeficientul de permeabilitate al probelor de beton plastic a fost determinat în aparatul de compresiune triaxială, utilizând metoda cu gradient constant. Coeficientul de permeabilitate reprezintă valoarea raportului dintre viteza de filtrație v și gradientul hidraulic sub care se face curgerea, respectiv:

Încercarea de permeabilitate prin metoda cu gradient constant este realizată prin aplicarea unui flux de apă prin probă la o presiune constantă. În cadrul studiului de laborator, în celulă a fost

păstrată o presiune constantă de 300kPa, în timp ce apa a fost introdusă prin probă antigrațională, de jos în sus, cu o presiune constantă de 280kPa. În timpul încercării a fost măsurat în mod continuu volumul de apă introdus. Volumul de apă evacuat este înregistrat prin intermediul unei biurete digitale.

3.2.5 Determinarea rezistenței la compresie

Rezistența la compresie monoaxială a materialului încercat a fost determinată în același aparat, după finalizarea încercării pentru determinarea permeabilității. În timpul acestei încercări asupra probei nu au mai fost aplicate presiuni suplimentare (e.g. presiune radială). Rezistența la compresie monoaxială a fost determinată urmând prescripțiile STAS 8942/6-72: Teren de fundare – Încercarea pământurilor la compresie monoaxială și EN 17892-7:2018 – Unconfined compression test.

Conform STAS 8942/6-76, încercarea de compresie monoaxială constă în aplicarea continuă asupra probei a unei încărcări axiale cu scopul de a obține:

- p_c rezistența la compresie monoaxială;
- ϵ , deformația axială specifică. [55]

Încercarea de compresie monoaxială poate fi realizată în două moduri:

- cu o viteză de deformație axială constantă și cu măsurarea eforturilor rezultate;
- cu eforturi impuse și cu măsurarea deformațiilor axiale rezultate. [55]

3.3 Rezultatele studiului de laborator

Vâscozitatea materialului în stare proaspătă a fost măsurată utilizând un vâscozimetru rotațional. Din panta $\tau-\gamma'$ rezultă vâscozitatea dinamică a amestecului, în condițiile în care acesta este considerat ca fiind cvasi-newtonian. Variația viscozității este semnificativă, fiind cuprinsă între $0.68 \div 401.87 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. În Fig. 3.2 este prezentată variația vâscozității pe domeniul studiat. Această reprezentare poate fi utilizată pentru evaluarea lucrabilității amestecului în stare proaspătă. Se poate observa faptul că prin limitarea vâscozității la $5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ este prevenit fenomenul de segregare. Lucrabilitatea betonului în stare proaspătă este considerată acceptabilă pentru valori de până la $100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, deși un comportament ideal ar fi caracterizat de aproximativ $50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Pentru sporirea lucrabilității, în amestec pot fi introduși aditivi super plastifianți.

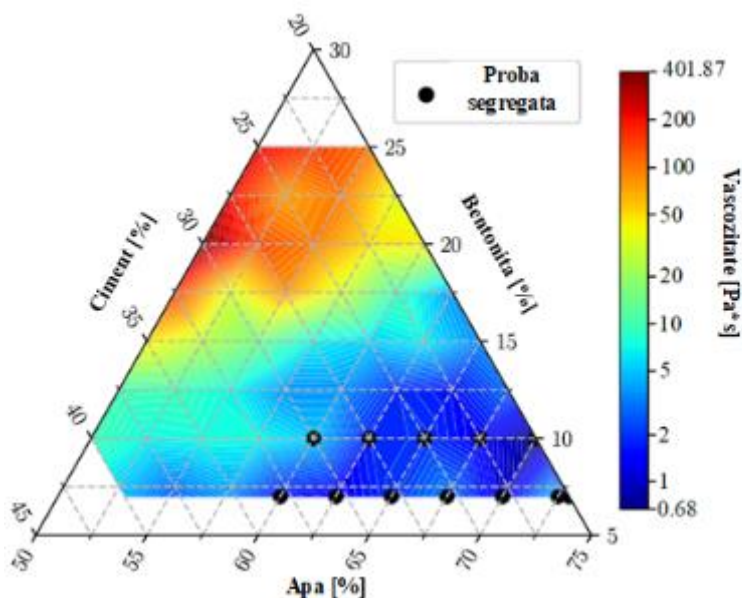


Fig. 3.2: Variația vâscozității pe domeniul studiat și marcarea probelor segregate

În Fig. 3.3 este remarcat faptul că rezistența la compresiune a betonului plastic este afectată în mod negativ de un conținut de bentonită mai mare de 17%, diferența de valori fiind cel puțin dublă față de probele cu un conținut mai ridicat de ciment. De asemenea, după efectuarea încercărilor, această limită de conținut de bentonită a dictat și mecanismul de cedare al materialului, probele cu un conținut de bentonită mai mare de 17% comportându-se similar cu un pământ, în timp ce restul probelor au prezentat un comportament similar cu cel al unui beton slab.

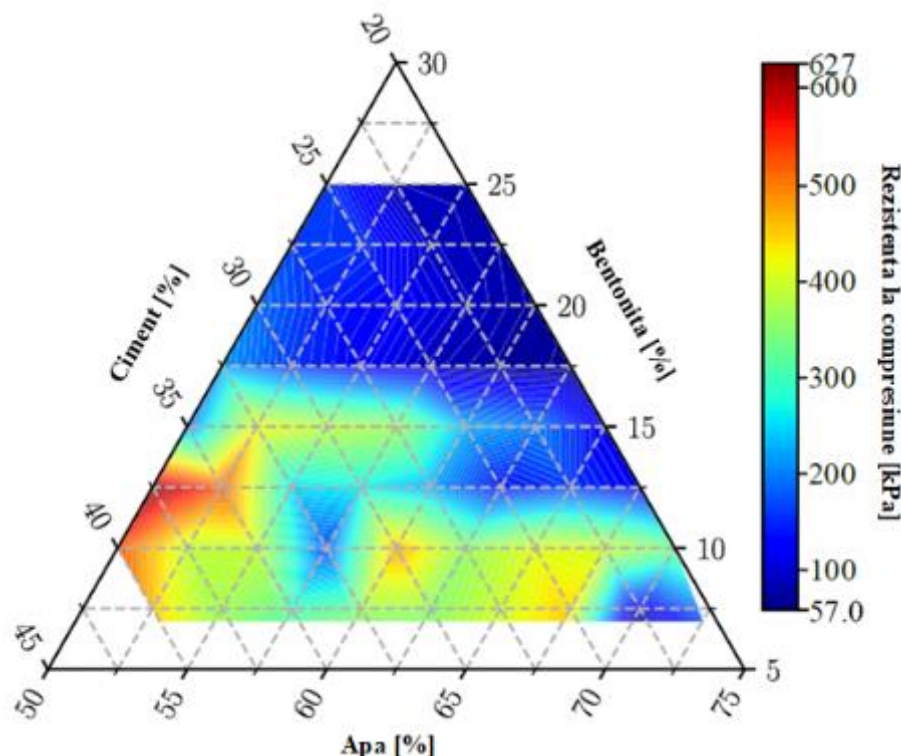


Fig. 3.3: Variația rezistenței la compresiune pe domeniul studiat

În Fig. 3.4 prezentând variația coeficientului de permeabilitate, aceeași limită de aproximativ 17% conținut de bentonită indică schimbarea comportamentului hidraulic al betonului plastic. Pe grafic poate fi observată o scădere de până la 5 ori a valorii coeficientului de permeabilitate în jurul acestei zone de separare.

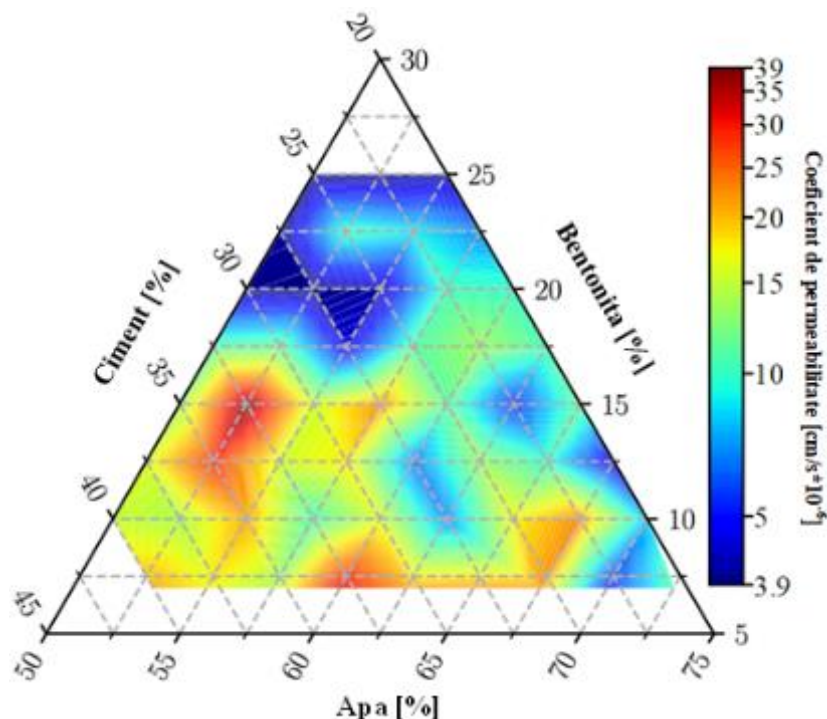


Fig. 3.4: Variația coeficientului de permeabilitate pe domeniul studiat

Creșterea cantității de bentonită utilizată la fabricarea betonului plastic (punctele marcate în Fig. 3.5 cu galben) generează o rezistență la compresiune mult inferioară (de până la 5 ori mai mică) față de probele în care materialul dominant este cimentul. În schimb vâscozitatea atinge valori de până la 1.5 ori mai mari decât cele măsurate pentru celelalte probe. Variația rezistenței la compresiune a acestui material a fost documentată în literatură de specialitate [32] [34] [44], informațiile deja valabile confirmând rezultatele obținute în cadrul studiului de laborator.

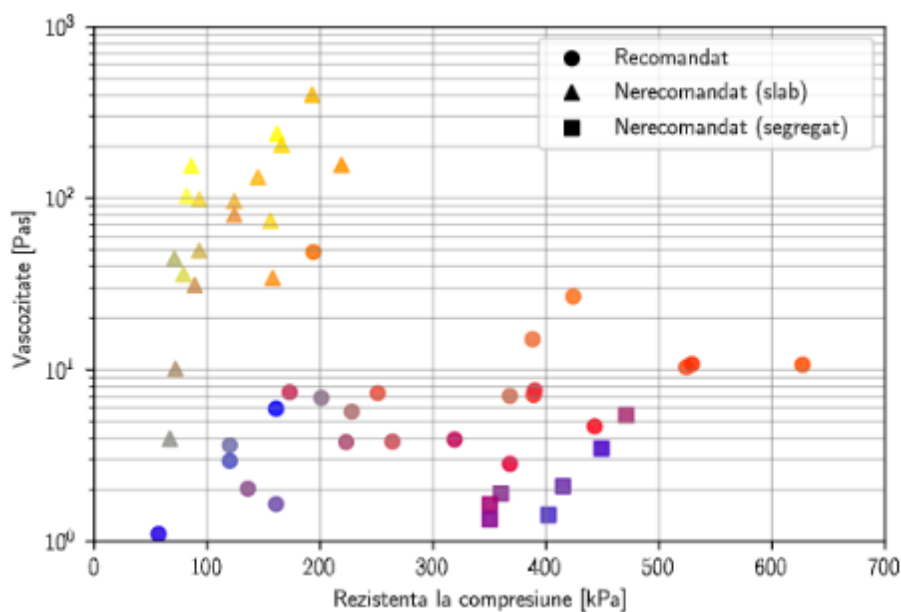


Fig. 3.5: Rezultatele încercărilor asupra probelor de beton plastic - vâscozitate vs rezistența la compresiune

În Fig. 3.6 și Fig. 3.7 este prezentată variația rezistenței la compresiune funcție de rapoartele cantitative de apă-ciment, respectiv apă-bentonită. În ambele cazuri, este evidențiată influența celei de-a treia componente asupra comportării materialului. În Fig. 3.6 probele cu un conținut de bentonită mai mare de 17.5% sunt marcate cu culoarea galbenă, valorile rezistenței la

compresiune fiind limitate la aproximativ 200kPa. Acest fenomen este cauzat de capacitatea bentonitei de a slăbi legăturile de cimentare. În Fig. 3.7, probele dominate de prezența bentonitei sunt caracterizate de un raport apă-bentonită mai mic de 4. Amestecurile guvernate de prezența bentonitei sunt grupate în ambele reprezentări, sugerând influența negativă a acesteia asupra rezistenței la compresiune.

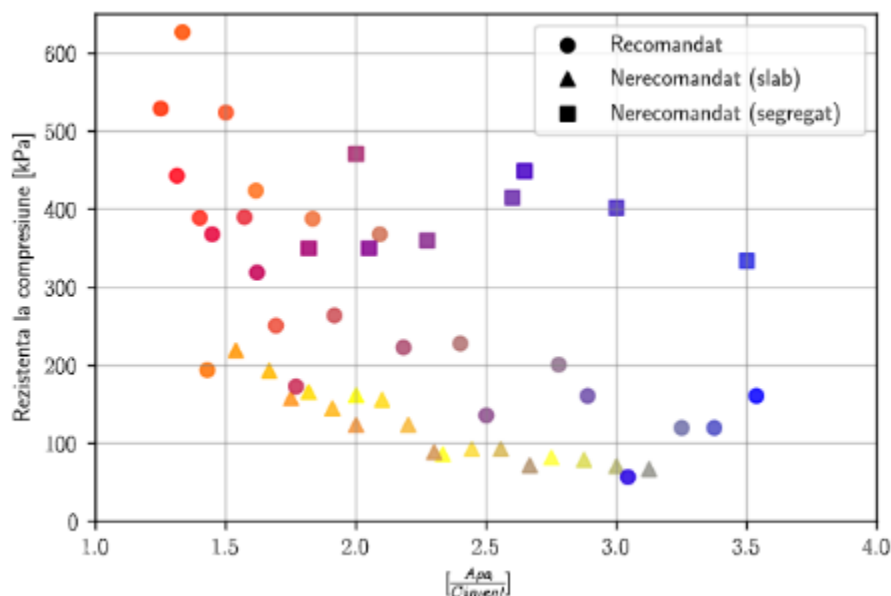


Fig. 3.6: Variația rezistenței la compresiune în funcție de raportul apă-ciment

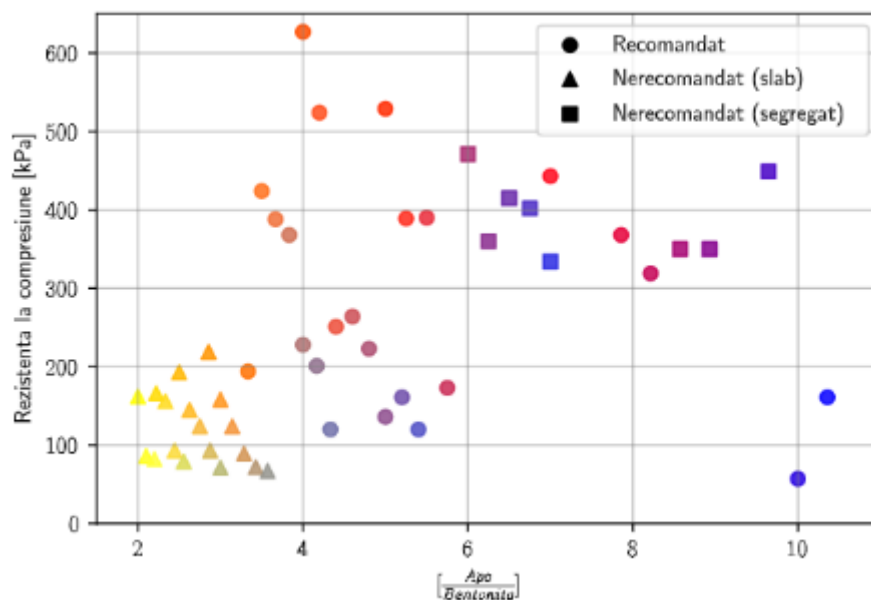


Fig. 3.7: Variația rezistenței la compresiune în funcție de raportul apă-bentonită

În afara faptului că o cantitate mai mare de bentonită generează un amestec mai vâscos, în aceeași măsură, aceasta influențează în mod negativ legăturile de cimentare. Astfel, utilizarea în exces a bentonitei afectează rezistența la compresiune a betonului plastic. De asemenea, utilizarea bentonitei în cantități excesive nu numai că nu reduce coeficientul de permeabilitate al materialului, ci îl afectează și mai drastic. Acest fenomen este generat de necesitatea unei cantități mai mari de apă pentru hidratarea bentonitei. Utilizarea unei cantități mai mari de apă are ca efect o porozitate excesivă a betonului plastic. Variația vâscozității față de rapoartele apă-ciment și apă-bentonită sunt prezentate în Fig. 3.8 și Fig. 3.9. În aceste reprezentări este evidențiat faptul că vâscozitatea materialului în stare proaspătă este influențată de conținutul de apă și de bentonită al amestecului.

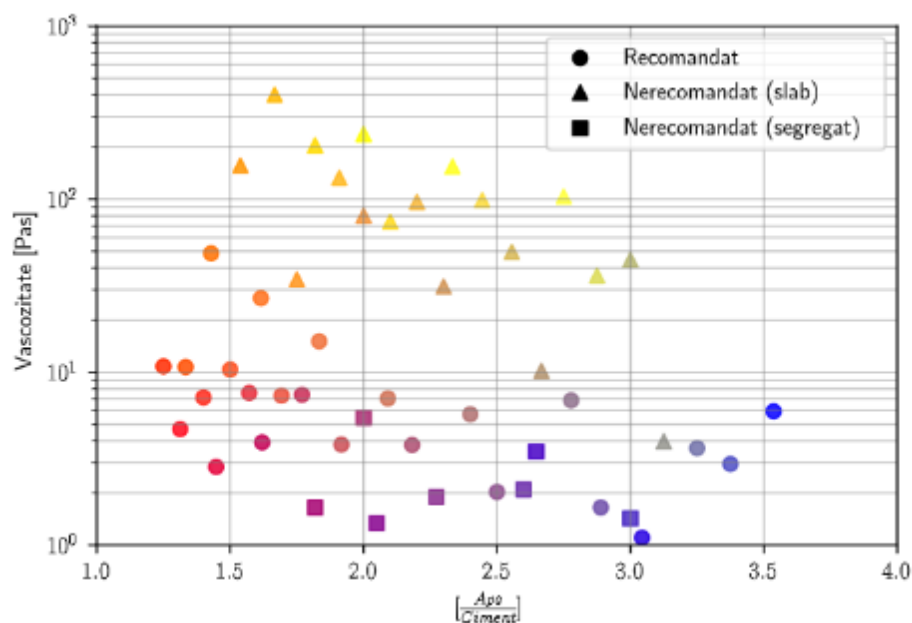


Fig. 3.8: Variația vâscozității în funcție de raportul apă-ciment

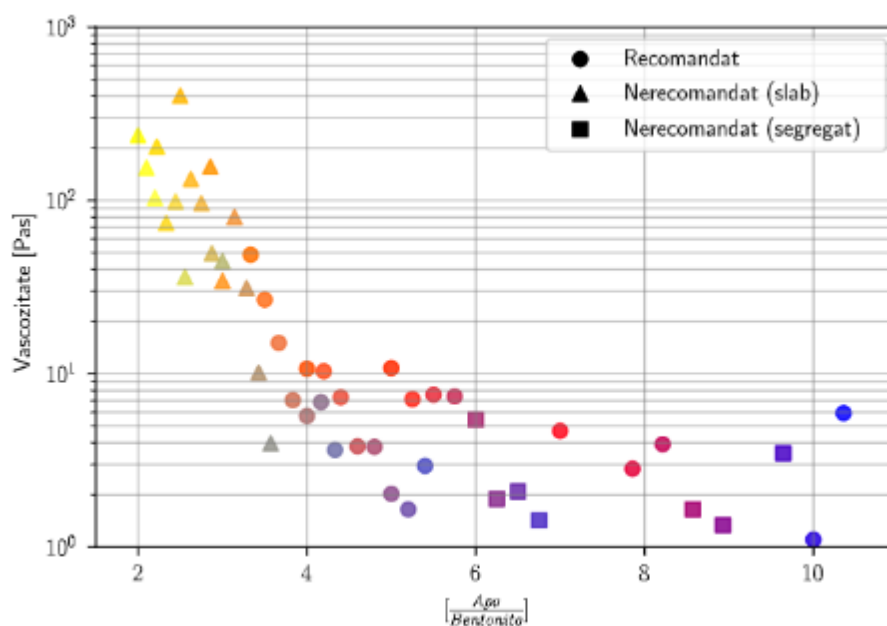


Fig. 3.9: Variația vâscozității în funcție de raportul apă-bentonită

3.4 Concluzii preliminare asupra studiului de laborator

Studiul de laborator a fost influențat de factori precum: mărimea domeniului studiat, numărul mare de probe care au fost încercate, durata perioadelor de încercare dar și intervalul de timp necesar probelor de beton plastic să ajungă la maturitate. Din aceste motive, pentru fiecare amestec a fost confecționată câte o singură probă. În consecință, există posibilitatea ca în cazul unor rezultate să nu existe suficientă acuratețe. În ciuda acestui fapt, rezultatele obținute în acest prim studiu de laborator permit restrângerea domeniului de studiu (vezi Fig. 3.10). Probele care au fost confecționate în a doua parte a cercetării au fost alese din domeniul de studiu restrâns prezentat în Fig. 3.10.

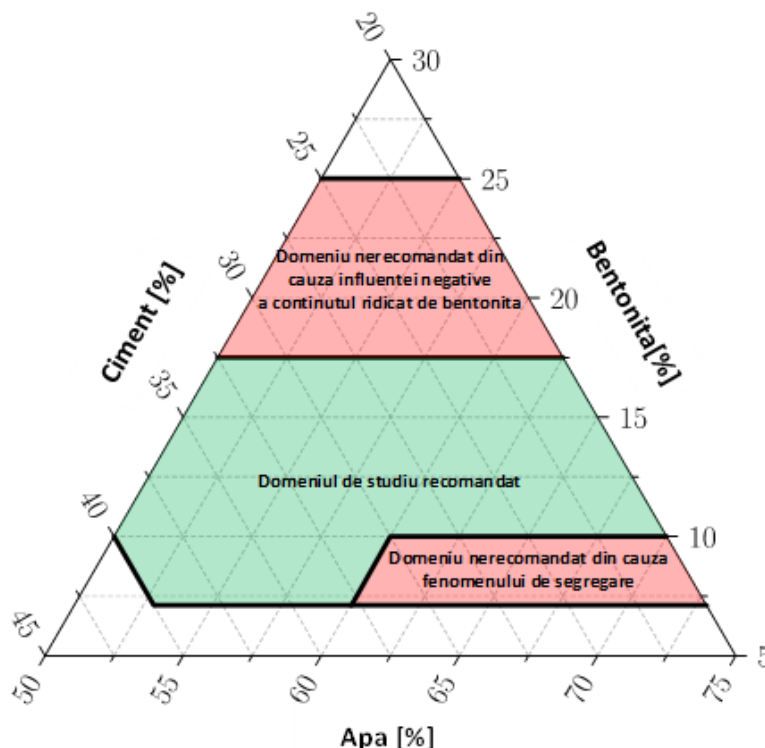


Fig. 3.10: Limitarea domeniului de studiu pe baza rezultatelor încercărilor

4 STUDIUL INFLUENȚEI CANTITĂȚII DE NISIP STANDARDIZAT ADĂUGAT ÎN AMESTECUL APĂ-CIMENT-BENTONITĂ

4.1 Obiectivele studiului de laborator

Obiectivul propus pentru cel de-al doilea studiu de laborator este de a determina cantitatea suficientă de nisip standardizat din amestec care să prevină consecințele fenomenelor de contracție și hidratare ale liantului dar care, în același timp, să nu intervină asupra proprietăților mecanice și de retenție a apei ale amestecului. Pentru determinarea influenței cantității de nisip asupra amestecului au fost folosite patru rapoarte nisip standardizat-parte solidă, pornind de la 0.5:1 ajungând până la un raport de 4:1. Utilizând raportul 0.5:1 a fost înjumătățită cantitatea de nisip folosită în prima parte a studiului, astfel acoperind limita inferioară a cantității de nisip care ar putea fi folosită pentru realizarea amestecului. Așadar, pe suprafața optimă a diagramei ternare au fost alese unsprezece amestecuri apă-ciment-bentonită realizate și în prima parte a studiului. Pentru amestecurile alese au fost confecționate 4 probe, acestea fiind diferite prin raportul nisip standardizat-parte solidă utilizat: 0.5:1, 2:1, 3:1 și 4:1 (Fig. 4.1).

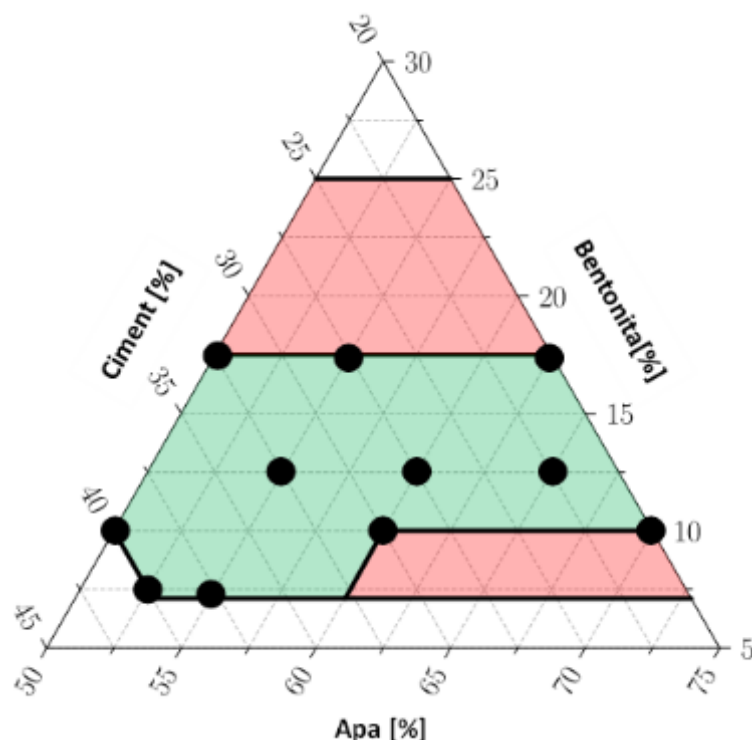


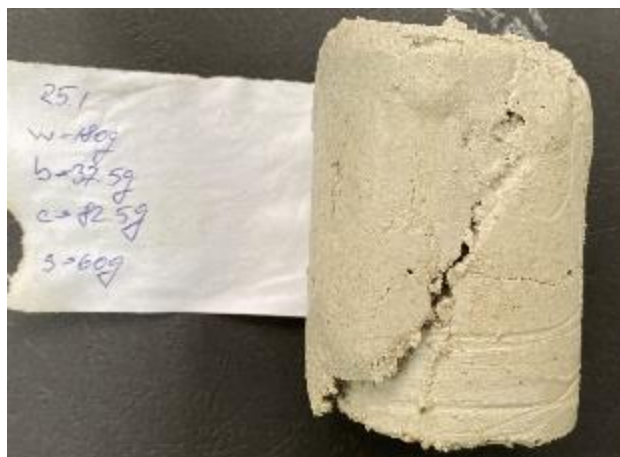
Fig. 4.1: Reprezentarea pe diagrama ternară a amestecurilor utilizate în cel de-al doilea studiu de laborator

4.2 Confecționarea probelor și metodologia de testare

Probele au fost confecționate și testate într-o manieră similară ca cele realizate pentru prima parte a studiului de laborator.

În Fig. 4.2 sunt prezentate probe aparținând aceleiași grupări dar cu rapoarte nisip standardizat-parte solidă diferite. Poate fi observată o tranziție a mecanismului de cedare al materialului. În cazul acestor tipuri de probe, a căror comportament nu este guvernat de cimentul din amestec, pornind de la probele cu raport nisip-parte solidă de 0.5:1 până la probele cu raport 3:1 este observat un mecanism de cedare similar cu cel al pământurilor (cu plan de cedare sub un unghi

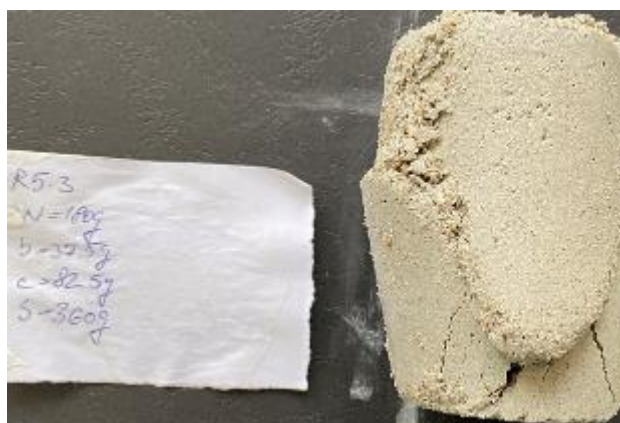
de 45°). Pentru proba cu valoarea raportului de 4:1 s-a constatat o cedare prin compresiune, specifică betoanelor slabe.



Raport 0.5:1



Raport 2:1



Raport 3:1



Raport 4:1

Fig. 4.2: Aspectul unei grupări de probe după testare

4.3 Rezultatele studiului de laborator

În Fig. 4.3÷Fig. 4.5 sunt prezentate variațiile parametrilor determinați în cadrul programului de testare (coeficient de permeabilitate, rezistență la compresiune și vâscozitate) pentru fiecare raport nisip-parte solidă utilizat, respectiv 0.5:1, 2:1, 3:1 și 4:1. În mod special, în reprezentările din Fig. 4.3b÷Fig. 4.3d este evidențiată influența pe care o cantitate mai mare de bentonită o are asupra amestecului, observându-se o comportare hidraulică mai bună a materialului, indiferent de cantitatea de nisip standardizat utilizată. În ceea ce privește rezultatele obținute pentru probele în care a fost utilizat un raport nisip:solide de 0.5:1 (Fig. 4.3a), acestea pot fi considerate neconcludente. Cantitatea mică de nisip utilizată la fabricarea acestor probe este cauza fenomenelor de contracție care la rândul lor au generat fisuri în corpul probelor, afectând astfel rezultatele încercărilor de laborator. Considerând aceste aspecte, poate fi concluzionat faptul că raportul nisip-parte solidă de 0.5:1 este insuficient pentru a asigura atât integritatea amestecului cât și o comportare hidraulică satisfăcătoare. Ținând cont de stabilitatea oferită amestecului dar și de faptul că o cantitate mai mare de nisip standardizat nu influențează capacitatea de retenție a apei, poate fi afirmat că raportul nisip-parte solidă de 2:1 este suficient pentru a atinge scopul fabricării materialului.

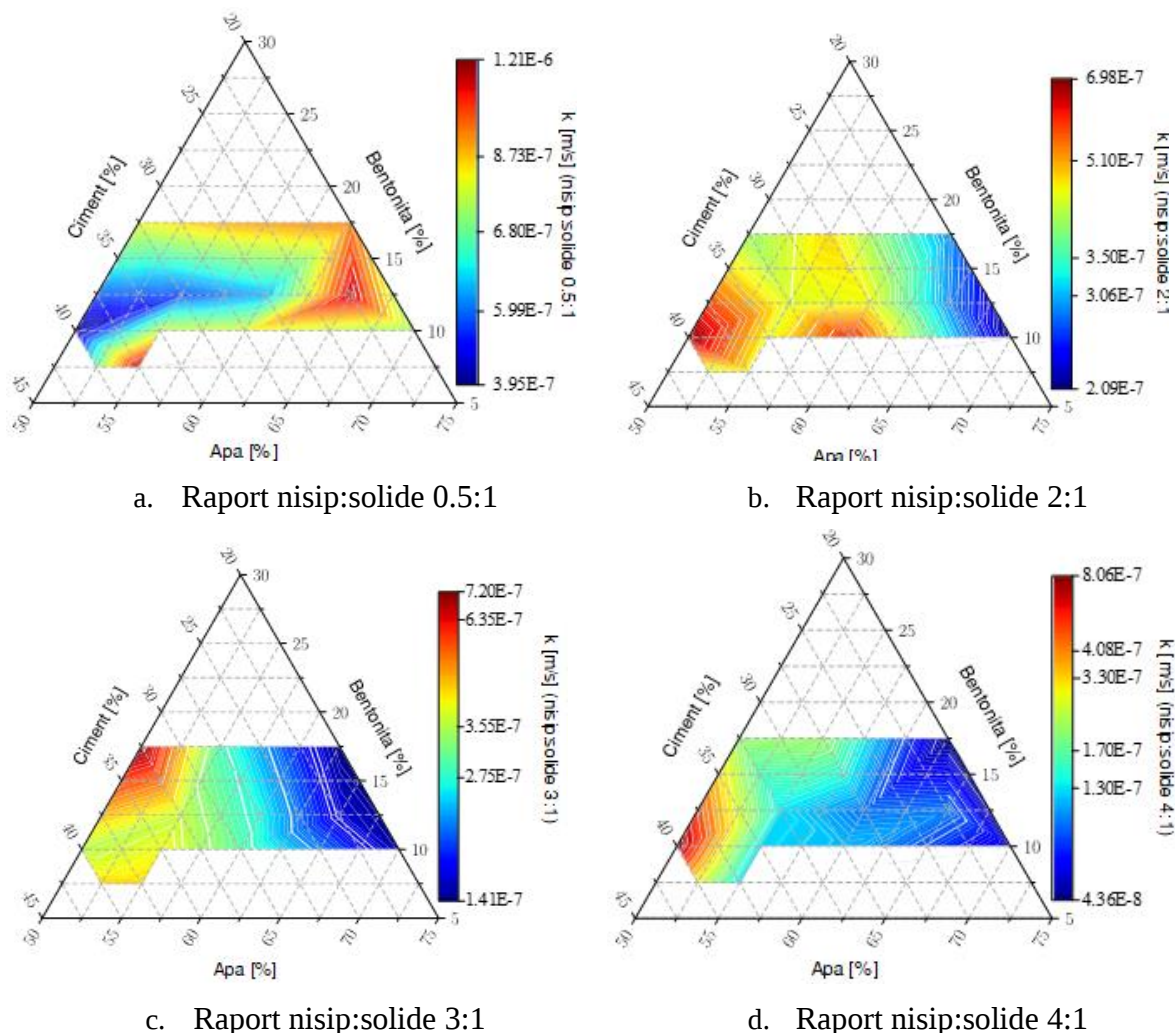


Fig. 4.3: Variația coeficientului de permeabilitate pe domeniul de studiu în funcție de valoarea raportului nisip:solide

În Fig. 4.4 este prezentată variația rezistenței la compresiune pe domeniul de studiu. După cum a fost determinat și în studiul anterior, rezistența la compresiune este o caracteristică dominată de cantitatea de ciment utilizată în amestec, pentru probele guvernate de acesta fiind obținute valorile maxime ale parametrului. Utilizarea unei cantități mai mari de ciment generează rezistențe la compresiune mai ridicate.

De asemenea, este de notat faptul că raportul nisip standardizat-parte solidă nu interferează cu valoarea sau cu distribuția rezistenței la compresiune. Similaritatea rezultatelor este subliniată pe graficele Fig. 4.4a÷Fig. 4.4d. Astfel, în ceea ce privește influența cantității de nisip standardizat asupra rezistenței la compresiune, se poate preciza faptul că nu există o limită inferioară a raportului nisip-parte solidă, însă din punct de vedere al integrității și stabilității amestecului este considerat suficient raportul de 2:1 între nisip și partea solidă utilizată în amestec.

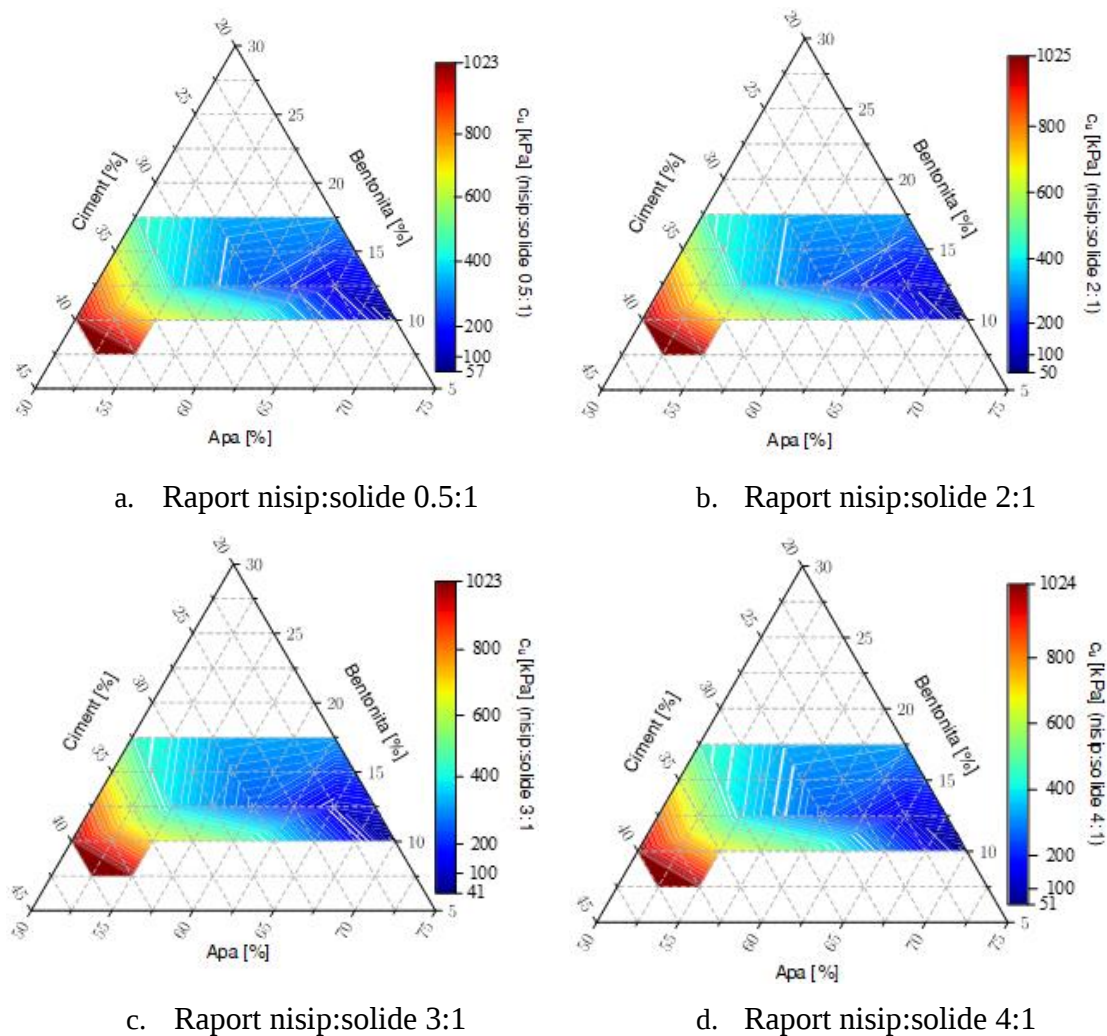


Fig. 4.4: Variația rezistenței la compresiune nedrenate pe domeniul de studiu în funcție de valoarea raportului nisip:solide

Fig. 4.5 prezintă variația vâscozității pe domeniul de studiu. Vâscozitatea este o caracteristică ce ajută la descrierea lucrabilității materialului în stare proaspătă. În prima parte a studiului de laborator a fost demonstrat faptul că această proprietate este controlată de cantitatea de bentonită și de cantitatea de apă introdusă în amestec. Bentonită însă are potențialul de a afecta negativ proprietăți precum rezistența la compresiune, chiar și permeabilitatea atunci când este folosită în exces. Poate fi observat în Fig. 4.5a-d faptul că pentru același raport nisip-parte solidă, o cantitate mai mare de apă reduce valoarea vâscozității, în timp ce cantități mai mari de apă și bentonită ajută la crearea unei paste mai vâscoase. În cazul utilizării unei cantități mai mari de nisip standardizat a fost remarcată și creșterea valorilor extreme ale vâscozității: de la 31 la 154 Pa*s pentru valorile minime, respectiv de la 448 la 1304 Pa*s pentru valorile maxime. Considerând variația valorilor extreme se poate concluziona faptul că nisipul influențează lucrabilitatea materialului în stare proaspătă. Ținând cont de aceste aspecte, de influența nisipului standardizat asupra celorlalți parametri analizați dar și de observațiile din timpul fabricării probelor, raportul nisip-parte solidă de minim 2:1 oferă materialului o lucrabilitate suficientă pentru a putea fi pus în operă.

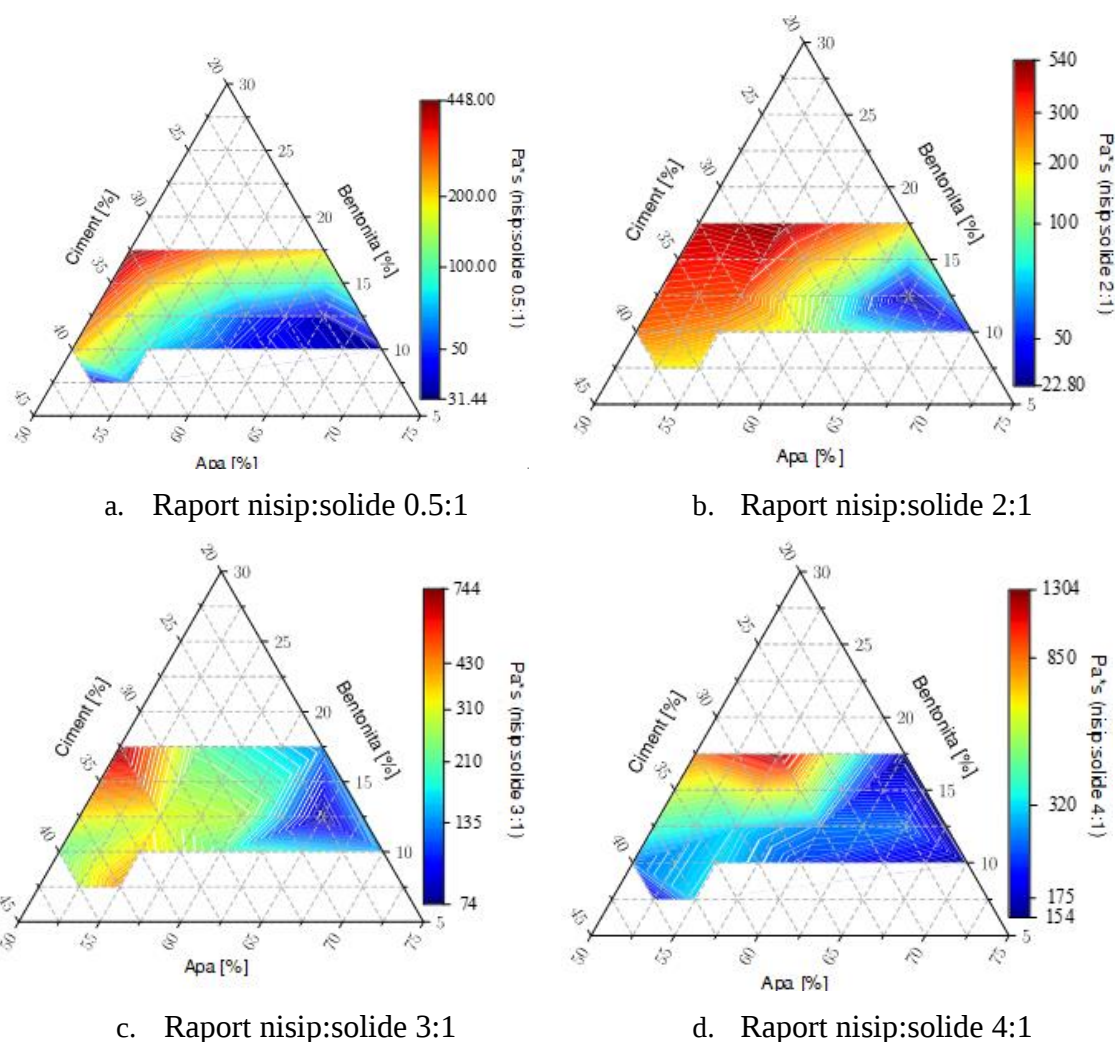


Fig. 4.5: Variația vâscozității pe domeniul de studiu în funcție de valoarea raportului nisip:solide

În cazul rezistenței la compresiune se poate observa faptul că pentru probele guvernate de cantitatea de ciment coeficientul de variație are o valoare mult mai mică față de probele dominate de apă sau bentonită. Faptul că pentru probele cu conținut mai mare de apă sau

bentonită a fost obținut un coeficient mai mare de variație indică răspândirea mai mare a rezultatelor sub influența utilizării unei cantități diferite de nisip standardizat.

În ceea ce privește coeficientul de permeabilitate, pentru probele cu conținut mai mare de bentonită a fost determinată o variație mai mică a rezultatelor indiferent de cantitatea de nisip standardizat introdusă în amestec, la polul opus aflându-se probele cu un conținut mai ridicat de ciment. Ținând cont de asemenea și de rezultatele prezentate în Fig. 4.3, coeficientul de variație al permeabilității este influențat și de valorile obținute pe probele cu raportul nisip-partă solidă de 0.5:1. Aceste valori au o răspândire atipică pe domeniul studiat din cauza fenomenelor de contracție care au dus la fisuri în corpul probelor. Acest tip de fenomen nu a fost observat în cazul probelor cu raport nisip-partă solidă de 2:1, 3:1 sau 4:1. În cazul raportului folosit inițial (Fig. 4.3a) au fost obținute rezultate nescontate, în sensul în care valorile reduse ale coeficientului de permeabilitate au fost obținute pentru probele cu un conținut mai mare de ciment. Este de menționat faptul că probele de amestec cu un conținut mai mare de ciment nu au fost fisurate.

5 STABILIREA PARAMETRILOR PENTRU AMESTECURILE CU RAPORTUL OPTIM DE NISIP STANDARDIZAT-PARTE SOLIDĂ

5.1 Obiectivele studiului de laborator

Considerând zona de studiu restrânsă determinată în cadrul primei părți a studiului de laborator și raportul de nisip standardizat – parte solidă, 2:1, determinat în cadrul celei de-a doua părți a studiului, în etapa finală, pornind de la cele unsprezece (11) amestecuri, au fost fabricate și încercate câte 4 probe similare pentru fiecare tip de amestec. Obiectivele acestei ultime etape sunt:

- determinarea parametrilor urmăriți de la începutul studiului de laborator;
- stabilirea gradului de încredere asupra rezultatelor obținute atât în cadrul ultimei etape, cât și în cadrul etapei anterioare;
- stabilirea proporțiilor optime de materiale care să asigure comportări mecanice și hidraulice satisfăcătoare.

5.2 Confecționarea probelor și metodologia de testare

Pentru a putea evalua și compara în mod corect caracteristicile amestecurilor din toate etapele de cercetare, atât în vederea confecționării probelor cât și în vederea determinării parametrilor fizico-mecanici au fost utilizate aceleași materiale de bază, iar procedurile de lucru nu au fost modificate. Astfel, pentru fiecare din cele unsprezece amestecuri, pentru prelucrarea statistică a parametrilor au fost utilizate 5 rezultate.

Datorită echilibrului deja stabilit dintre proporțiile materialelor componente, după decofrarea probelor nu au mai fost observate probe care să prezinte defecte de conformație precum fisuri sau segregări. De asemenea, nu au fost obținute probe care să prezinte un comportament friabil care să fie generat de neomogenitate amestecurilor finale.

5.3 Rezultatele încercărilor

Valorile reprezentate pe graficele ce prezintă variația parametrilor fizico-mecanici pe domeniul de studiu (Fig. 5.1, Fig. 5.2 **Error! Reference source not found.**) au fost obținute prin medierea rezultatelor din încercările de laborator. Coeficientul de variație a fost calculat pentru fiecare set de 4 probe, fiind definit ca raportul dintre deviația standard și media valorilor obținute.

Rezultatele în ceea ce privește rezistența la compresiune sunt prezentate în Fig. 5.1 unde este evidențiată influența utilizării unei cantități mai mari de ciment în realizarea amestecurilor, valorile maxime ale rezistenței la compresiune fiind obținute pe probele dominate de această componentă. Valorile medii ale parametrului variază de la 138 la 1164 kPa, subliniind și diferența semnificativă dintre folosirea în amestec a unei părți de ciment de la 20 la 40%. Aceste rezultate confirmă atât predicțiile de la începutul lucrării cât și rezultatele obținute în precedentele două studii de laborator.

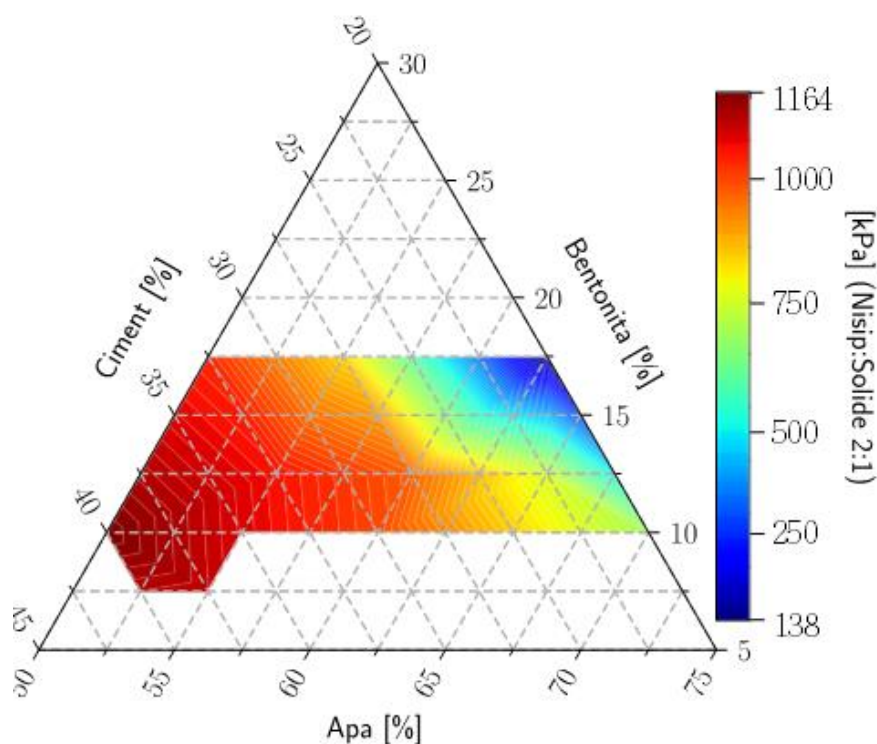


Fig. 5.1: Distribuția rezistenței la compresiune pe domeniul de studiu restrâns

Valorile medii ale coeficientului de permeabilitate variază între $7.46E-07$ ÷ $8.06E-08$. Valori mai mari ale coeficientului de permeabilitate au fost obținute pentru probele cu cantități mai mari de bentonită sau apă, în timp ce probele cu conținut mai mare de ciment au dovedit un comportament hidraulic mai bun. Aceste rezultate pot fi atribuite fenomenelor fizice din timpul pregătirii probelor precum: fisurarea epruvetelor din cauza cantității prea mari de apă sau dimpotrivă, insuficiența cantității de apă care să asigure buna desfășurare a hidratării bentonitei.

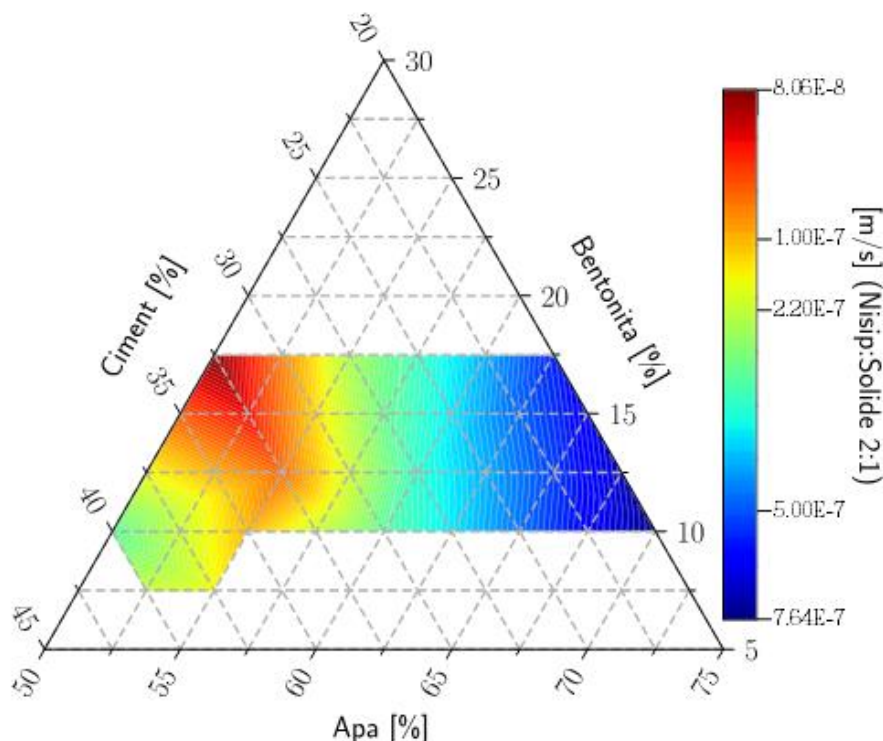


Fig. 5.2: Distribuția coeficientului de permeabilitate pe domeniul de studiu restrâns

5.4 Discuții asupra rezultatelor

Cu scopul de a evidenția distribuția rezultatelor dar și gradul de încredere al acestora, fiecare parametru determinat în cadrul studiilor de laborator a fost reprezentat față de un raport masic reprezentativ al amestecurilor apă-ciment-bentonită. Rapoartele folosite sunt: apă-ciment, bentonită-ciment, respectiv apă-bentonită.

Culorile markerelor folosite pe grafice a rămas constant pentru toate reprezentările din acest subcapitol în încercarea de a simplifica vizualizarea și urmărirea rezultatelor finale. În acest scop a fost folosită următoarea schemă de culori:

- verde pentru rezultatele obținute în urma celui de-al treilea studiu de laborator;
- albastru pentru probele din cel de-al doilea studiu dar care corespund cu cele din urmă;
- roșu pentru probele din cel de-al doilea studiu dar care nu corespund cu cele din urmă.

În plus, ținând cont de numărul suficient de probe realizate în cea de-a treia parte a studiului, pentru aceste probe (marcate cu verde) au fost reprezentate și intervalele de variație ale parametrilor.

5.4.1 Rezistența la compresiune

În graficele prezentate în Fig. 5.3, Fig. 5.4 și Fig. 5.5 se observă faptul că pentru anumite amestecuri, în special cele cu rezistență la compresiune mare, rezultatele dintre partea a doua și a treia a studiului devin similare, fapt ce indică faptul că probele al căror comportament este guvernat de cantitatea de ciment au un caracter mai stabil, iar dispersia rezultatelor este mai redusă.

Pe de altă parte, probele cu conținut mai ridicat de bentonită prezintă o dispersie mai mare, fapt ce poate indica influența negativă a bentonitei asupra procesului de atingere a clasei materialului dar și inducerea unor efecte care nu pot fi controlate sau cuantificate. Cel din urmă aspect este susținut de diferențele mari ale rezistenței la compresiune obținute pe amestecuri similare, ilustrate prin markererele roșii și cele verzi. Față de unele probe din partea a doua a studiului, au fost obținute valori chiar și de 5 ori mai mari.

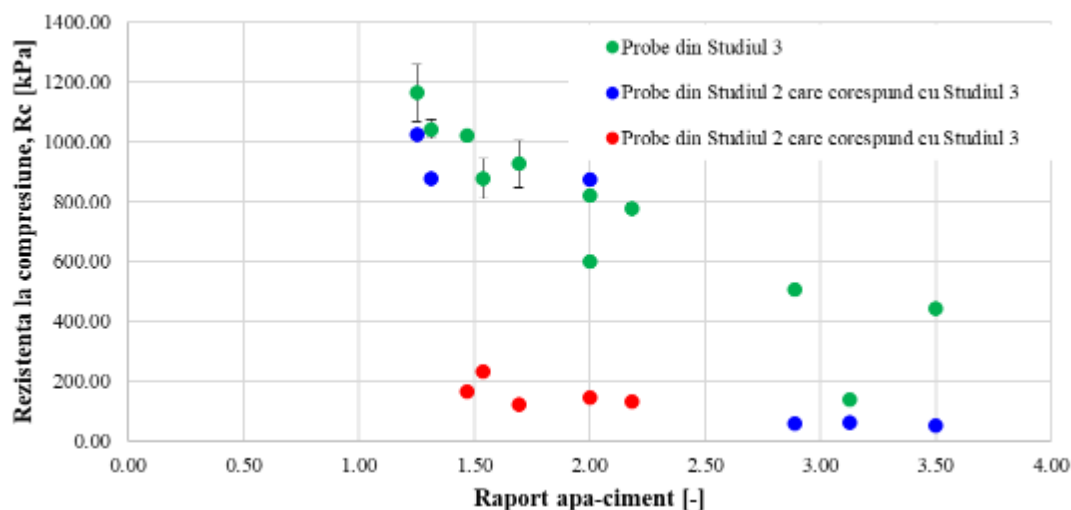


Fig. 5.3: Rezistența la compresiune în funcție de raportul apă-ciment

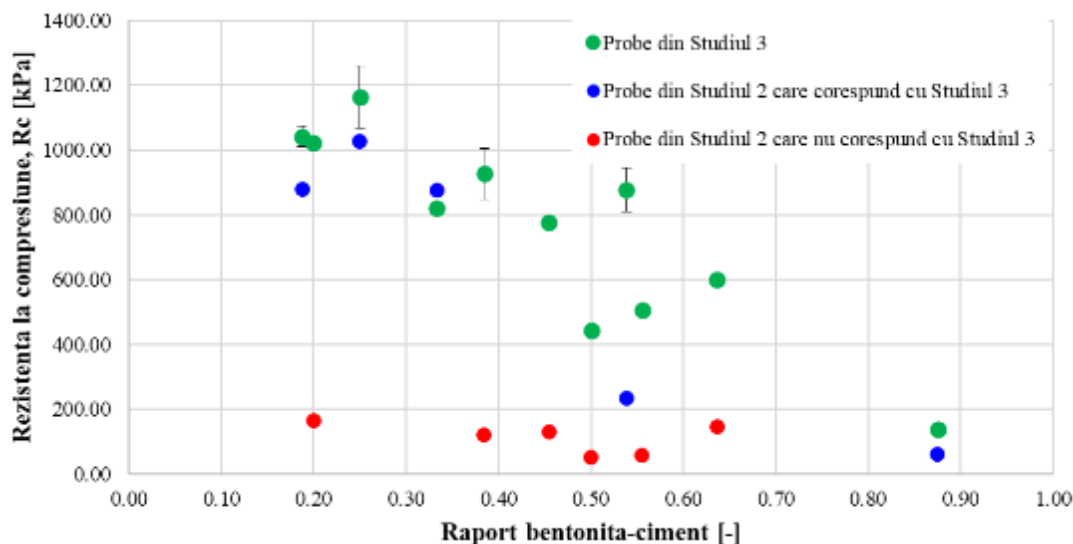


Fig. 5.4: Rezistența la compresiune în funcție de raportul bentonită-ciment

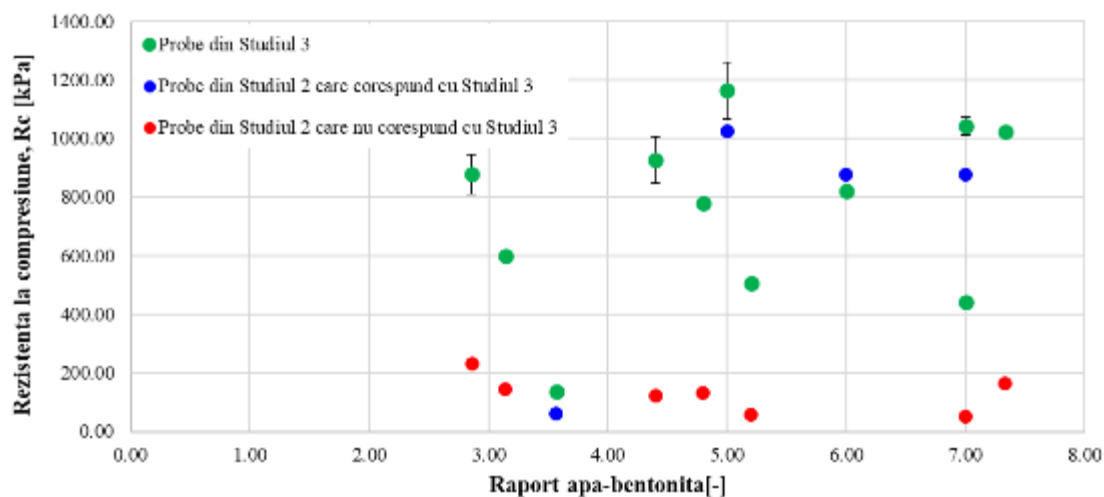


Fig. 5.5: Rezistența la compresiune în funcție de raportul apă-bentonită

5.4.2 Coeficientul de permeabilitate

Conform graficelor prezentate în Fig. 5.6, Fig. 5.7 și Fig. 5.8, valorile coeficientului de permeabilitate se încadrează în același ordin de mărime, 10^{-7} m/s, indiferent de procente masice folosite la confecționarea probelor. Rezultatele obținute în cadrul studiilor de laborator confirmă faptul că modalitatea de confecționare a probelor și testarea acestora a fost corectă, în ciuda faptului că anumite rezultate au fost diferite pentru probe similare, cu același raport apă-ciment și bentonită-ciment. În aproape toate cazurile prezentate în grafice, valorile din a doua parte a studiului se încadrează în intervalul de variație al probelor din ultima parte a studiului.

De asemenea, din reprezentări reiese faptul că utilizarea unei cantități mai mare de apă induce o permeabilitate mai mare a materialului rezultat, în timp ce pentru probele mai stabile, cu o cantitate mai mare de ciment a fost obținută un grad de impermeabilitate mai ridicat. În ciuda acestor diferențe, valorile se înscriu în cadrul aceluiași ordin de mărime.

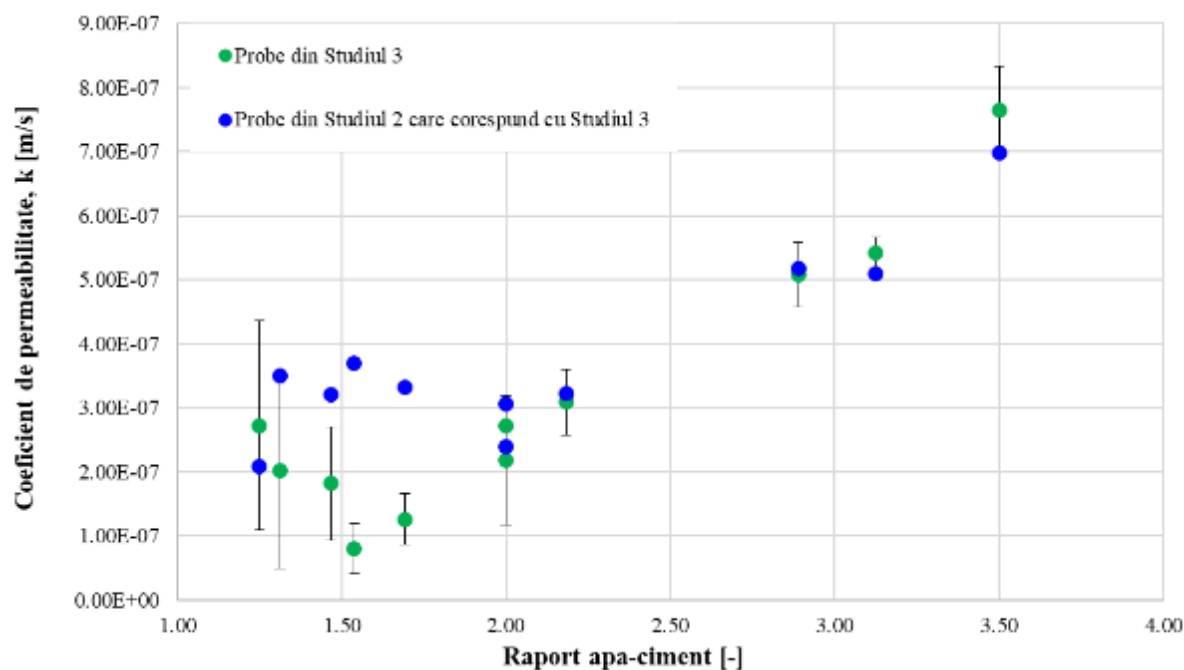


Fig. 5.6: Coeficientul de permeabilitate în funcție de raportul apă-ciment

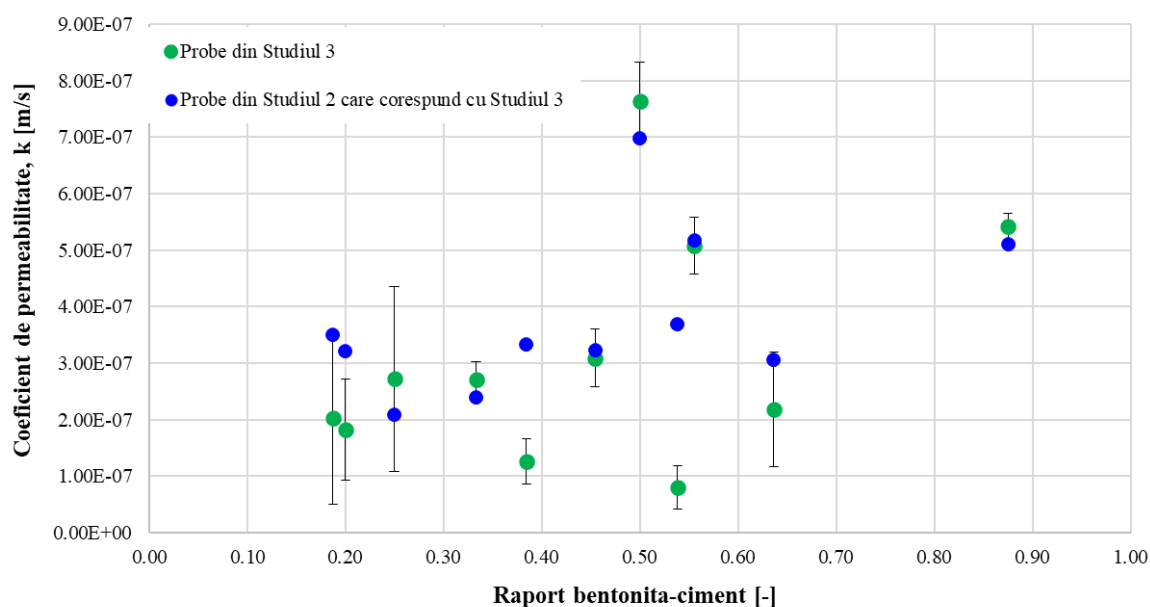


Fig. 5.7: Coeficientul de permeabilitate în funcție de raportul bentonită-ciment

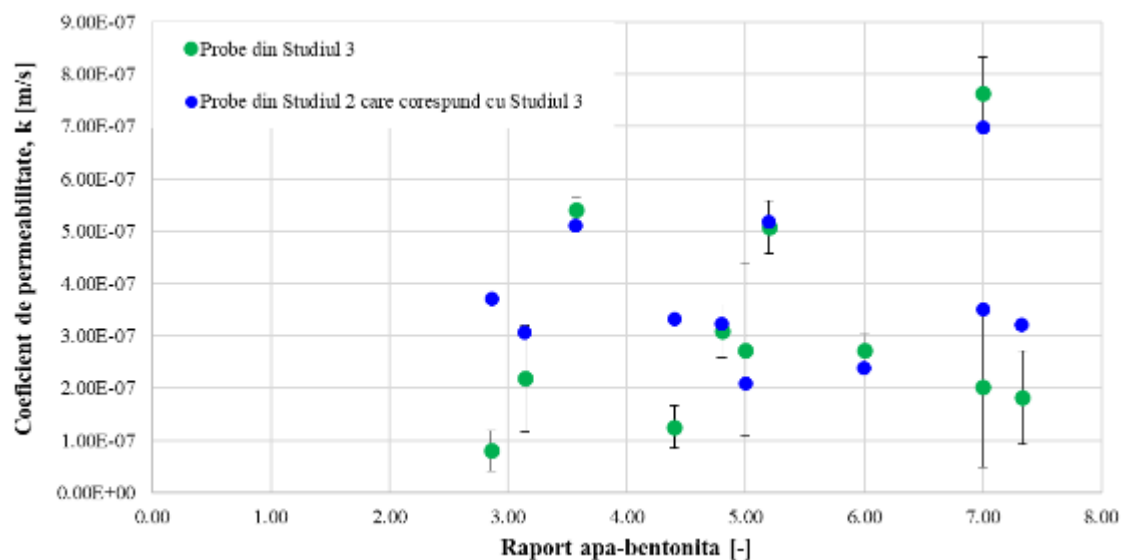


Fig. 5.8: Coeficientul de permeabilitate în funcție de raportul apă-bentonită

5.4.3 Vâscozitate

Vâscozitatea materialului în stare proaspătă a fost determinată cu scopul de a stabili lucrabilitatea materialului imediat după realizarea amestecului și măsura în care acesta poate fi pus în operă. Rezultatele studiilor de laborator față de rapoartele componente caracteristice sunt prezentate în Fig. 5.9, Fig. 5.10 și Fig. 5.11.

În ceea ce privește acest parametru, pentru o mare parte dintre amestecuri rezultatele au fost consistente de la un studiu la celălalt, de asemenea fiind înregistrate și câteva tipuri de amestecuri pentru care rezultatele din partea a doua a studiului nu s-au încadrat în intervalul de variație determinat în ultima parte. Această constatare poate fi atribuită atât unei erori de confecționare sau testare a probelor, dar și naturii tixotropice a materialului, stimulată și de amestecarea acestuia chiar înainte de realizarea încercării. De asemenea, aceste rezultate care nu corespund intervalului de variație evidențiază necesitatea cunoașterii materialului și testarea în repetate rânduri ale acestuia înaintea punerii în operă.

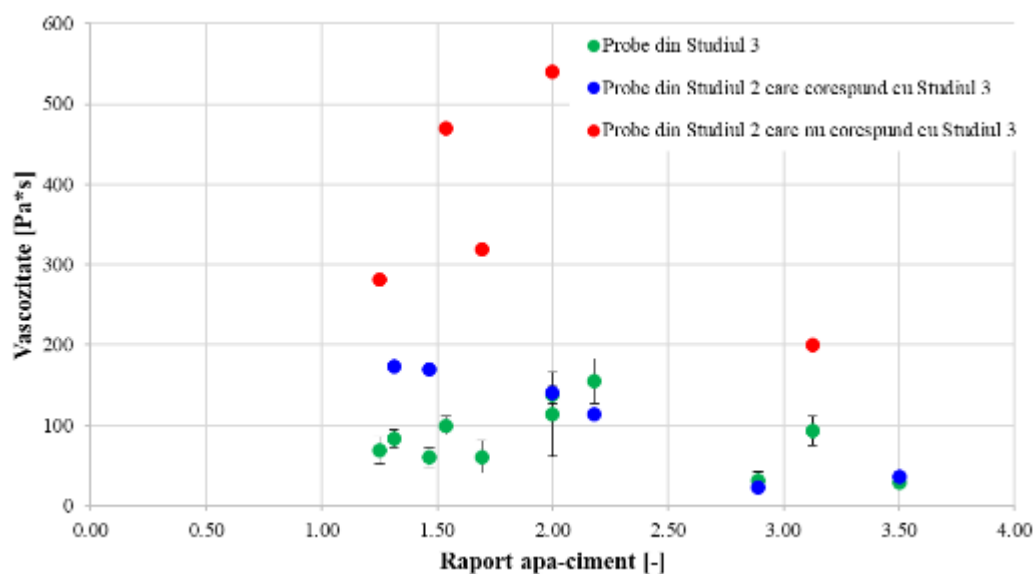


Fig. 5.9: Vâscozitatea în funcție de raportul apă-ciment

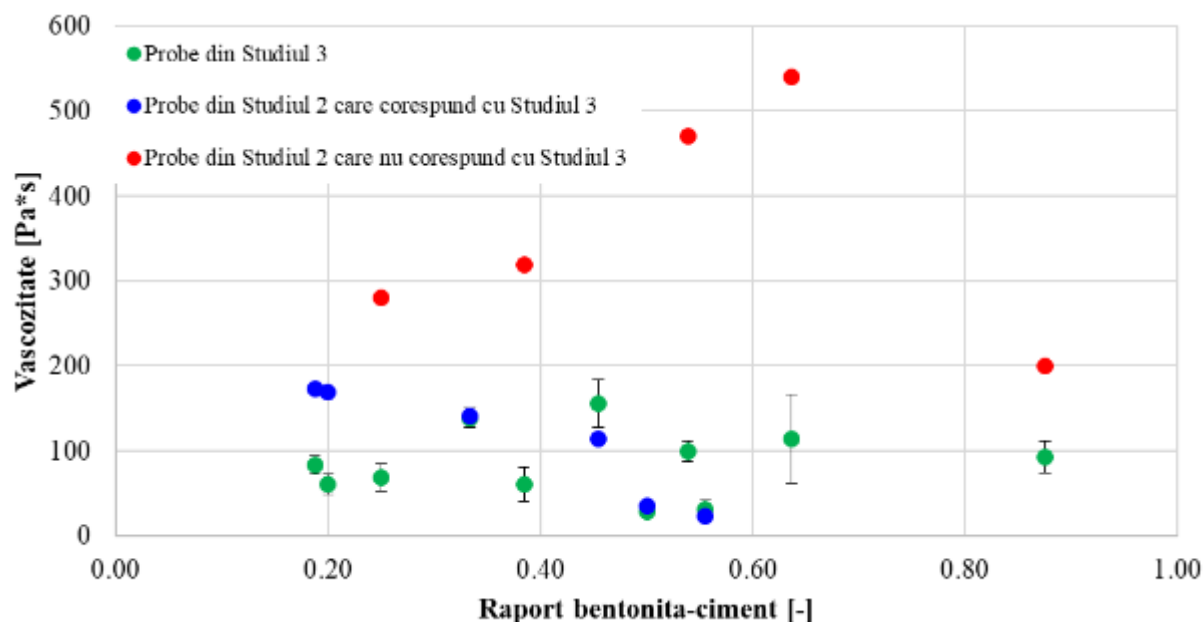


Fig. 5.10: Vâscozitatea în funcție de raportul bentonită-ciment

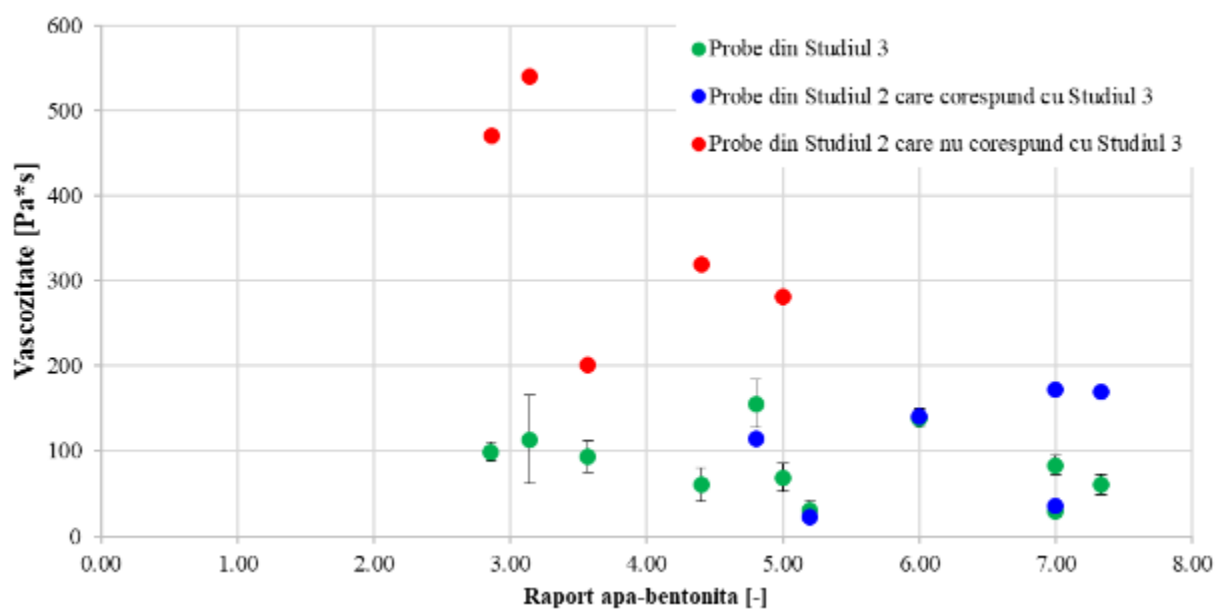


Fig. 5.11: Vâscozitatea în funcție de raportul apă-bentonită

6 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Teza de doctorat abordează tema amestecurilor de materiale cu rol de etanșare, fiind prezentate și documentate aspecte legate de compoziția, comportarea și tehnologia de execuție ale acestora încă din fazele incipiente ale cunoașterii și aplicării.

La baza cercetărilor prezentate în această lucrare se află studiul amănunțit al literaturii tehnice și științifice de specialitate din care a reușit stadiul actual al cunoașterii. Din cercetarea documentară au fost extrase informații legate de: materialele folosite, atât natura acestora cât și modalitățile de utilizare), de metodele de obținere și încercare în laborator ale amestecurilor obținute dar și de tehnologiile de execuție ale acestor tipuri de structuri.

Din punctul de vedere al contribuțiilor personale, în cele trei faze ale studiului au fost confecționate și încercate 140 de epruvete de amestec apă-bentonită-ciment. Pentru studiul proprietăților acestora, pe lângă metodele pentru determinarea rezistenței la compresiune și a coeficientului de permeabilitate care sunt deja bine definite în standardele de efectuare ale încercărilor, pentru studiul vâscozității materialului în stare proaspătă au fost folosite echipamente de laborator care oferă rezultate repetabile (vâscozimetru).

Pornind de la caracterul ternar al amestecurilor, reprezentarea baricentrică a fost propusă pentru reprezentarea celor trei componente de bază (apă, bentonită, ciment), această reprezentare fiind păstrată în diverse forme de-a lungul lucrării, fiind folosită pentru reprezentarea proprietăților analizate. Unde a fost necesar, în cazul domeniilor largi de variație, a fost folosită chiar și pentru reprezentarea logaritmică a unor parametri. Distribuția statistică a parametrilor și gradul de încredere al rezultatelor au fost scoase în evidență utilizând aceeași reprezentare.

În cadrul lucrării, pe baza încercărilor de laborator, au fost restrânse domeniile de variație ale maselor procentuale pentru fiecare componentă principală a amestecului apă-bentonită-ciment. Încă din prima etapă a fost definită o limită aproximativă de 17.5% pentru cantitatea de bentonită utilizată care să ofere amestecului o comportare hidraulică și mecanică suficientă.

De-a lungul cercetării a fost demonstrat faptul că probele cu un conținut mai mare de bentonită nu asigură neapărat un comportament hidraulic mai bun. Acest fapt a fost pus pe seama interferenței dintre procesele de hidratare al bentonitei și al cimentului. Bentonita calcică necesitând mai multă apă pentru a se hidrata, poate afecta hidratarea cimentului astfel reducând rezistența la compresiune și prelungind timpul de priză. În special în prima parte a cercetării în laborator, când a fost folosit un domeniu mai larg de variație pentru compoziția amestecurilor, au fost observate fenomene de segregare, fisurare sau contracție. Prin intermediul acestor aspecte au fost evidențiate efectele utilizării cantităților insuficiente sau excesive de apă și interferența dintre fenomenele de hidratare ale cimentului și bentonitei.

De asemenea, ca urmare a realizării încercărilor de rezistență la compresiune, au fost observate două tipuri de mecanisme de cedare care au fost atribuite în funcție de componenta dominantă din amestec. Pentru probele guvernate de cantitatea de bentonită, a fost sesizat un mecanism similar cu cel al pământurilor, caracterizat de un plan de cedare înclinat la aproximativ 45°, iar pentru probele cu un conținut mai mare de ciment a fost observată o cedare similară cu cea a betoanelor slabe (cedare casantă prin compresiune).

O altă concluzie obținută în urma încercărilor a fost stabilirea raportului de nisip standardizat-parte solidă la valoarea de 2:1. Această valoare a fost considerată suficientă astfel încât să nu influențeze parametrii fizico-mecanici ai materialului și să nu afecteze integritatea structurală a probelor prin fenomene contraindicate precum segregări sau fisurări.

În cele trei etape ale cercetării, domeniul de variație al componentelor a fost puternic limitat, fiind posibilă definirea unor abace baricentrice care să asiste la proiectarea amestecurilor în funcție de caracteristicile căutate.

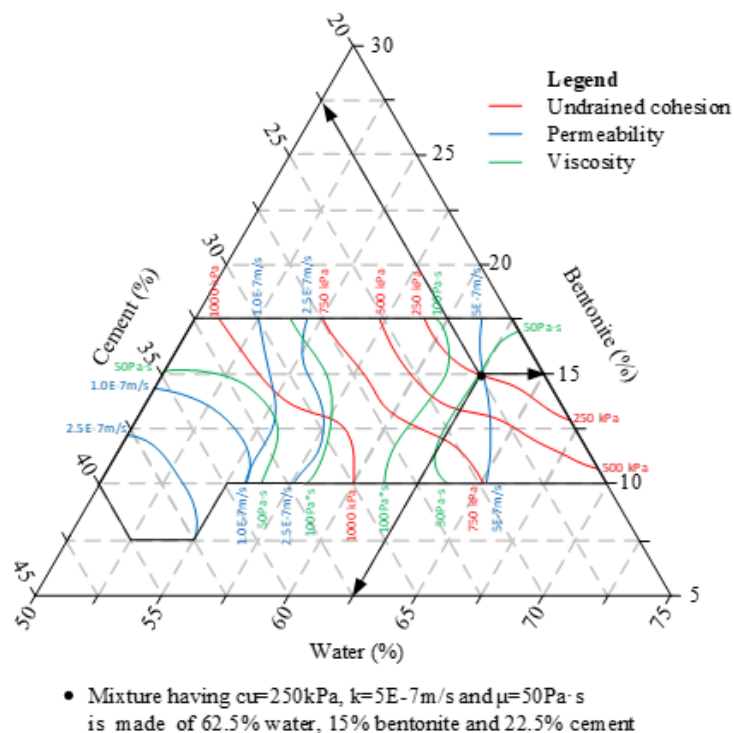


Fig. 6.1: Abac baricentric

Amestecurile trebuie folosite în mod justificat observându-se faptul că nu întotdeauna adaosul de bentonită îmbunătățește proprietățile fizico-mecanice urmărite. Modul de folosire al materialelor dar și procedurile de amestec și obținere a compozitelor prezintă limitări fizice dincolo de care este puțin probabil să fie obținute îmbunătățiri semnificative.

Teza a urmărit doar amestecurile nealterate, o direcție importantă de cercetare fiind contribuția adaosurilor (plastifianți, acceleratori sau întârziatori de priză, etc) asupra proprietăților materialului. Deși nu este neapărat recomandat trebuie studiată comportarea amestecurilor și cu alte tipuri de cimenturi și bentonite, mai ales pentru structuri temporare unde se dorește obținerea comportării rapid, fără a fi nevoie să existe o durată îndelungată de viață în care reacțiile chimice secundare să înceapă să se producă (substituții izomorfe, electroforeză, etc). Acest studiu trebuind a fi realizat cu un accent deosebit pe studiul reologic.

BIBLIOGRAFIE

- [1] A. L. Ressi di Cervia, "History of Slurry Wall Construction," in *Slurry Walls: Design, Construction and Quality Control*, Fredricksburg, American Society for Testing and Materials, 1992, pp. 3-16.
- [2] D. Alos-Shepherd, E. Kotan and F. Dehn, "Plastic Concrete for Cut-Off Walls - State-of-the-Art Report," Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2018.
- [3] S. M. Opdyke and J. C. Evans, "Slag-Cement-Bentonite Slurry Walls," *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, pp. 673-681, 2005.
- [4] A. Bagheri, M. Alibabaei and M. Babaie, "Reduction in the Permeability of Plastic Concrete for Cut-off Walls through Utilization of Silica Fume," *Construction and Building Materials*, vol. I, no. 22, pp. 1247-1252, 2008.
- [5] A. Bouazza, M. Manassero and N. Smith, "Cement-Bentonite Slurry Walls for Waste Containment," in *8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Hobart, 1999.
- [6] Comité Européen de Normalisation, EN 1538:2015-10 - Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Schlitzwände (German Version), 2015.
- [7] U.S. Bureau of Reclamation, "Cutoff Walls," in *Design Standards No. 13: Embankment Dam*, U.S. Department of the Interior, 2014, pp. 16-47.
- [8] D. Ruffing and J. Evans, "In Situ Evaluation of a Shallow Soil Bentonite Slurry Trench Cutoff Wall," in *6th International Congress on Environmental Geotechnics*, New Delhi, 2010.
- [9] International Commission on Large Dams, "Filling material for watertight cutoff walls," 1985.
- [10] U.S. Bureau of Reclamation, Design Standards No.13: Embankment Dam, Chapter 16: Cutoff walls, U.S. Department of the Interior, 2014.
- [11] C. R. Ryan and S. R. Day, "Soil-Bentonite Slurry Wall Specifications," in *Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, Cambridge, 2003.
- [12] C. Ryan and C. Spaulding, "Strength and Permeability of a Deep Soil Bentonite Slurry Wall," in *GeoCongress 2008*, New Orleans, 2008.
- [13] Geo-Solutions, "www.geo-solutions.com," 2017. [Online]. Available: <https://www.geo-solutions.com/services/slurry-walls/soil-bentonite/>. [Accessed 21 11 2021].
- [14] D. D'Appolonia, "Soil Bentonite Slurry Trench Cutoffs," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 1, no. 614, 1980.
- [15] R. McCandless and A. Bodocsi, "Investigation of Slurry Cutoff Wall Design and Construction Methods for Containing Hazardous Wastes," U.S. Environmental Protection Agency, Ohio, 1987.
- [16] J. Evans, "State-of-stress in Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff Walls," *Geotechnical Special Publication*, vol. 46, pp. 1173-1193, 1995.
- [17] J. Evans, H. Fang and I. Kugelman, "Containment of hazardous materials with soil-bentonite slurry walls," in *Proceedings of 6th National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites*, Washington, 1985.
- [18] J. Evans, D. Ruffing and M. Malusis, "Prediction of Earth Pressures in Soil-Bentonite Cutoff Walls," in *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*, 2010.
- [19] G. Filz, "Consolidation stresses in soil-bentonite back-filled trenches," in *Proceedings of Second International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, 1996.

- [20] D. Baxter, G. Filz, D. Bentler and R. Davidson, "Ground deformations adjacent to a soil-bentonite cutoff wall," in *Proceedings of GeoEngineering for Underground Facilities*, 1999.
- [21] G. W. Clough and J. M. Duncan, "Earth Pressures," in *Foundation Engineering Handbook*, 1991, pp. 223-235.
- [22] J. Evans and D. Ruffing, "Design and Construction of an Experimental Soil-Bentonite Cutoff Wall," in *Geofrontiers*, Orlando, 2017.
- [23] J. Evans and D. Ruffing, "Stresses in Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff Wall," in *ASCE GeoInstitute Conference*, Philadelphia, 2019.
- [24] M. A. Malusis, J. Evans, R. Jacob and D. Ruffing, "Construction and Monitoring of an Instrumented Soil-Bentonite Cutoff Wall: Field Research Case Study," in *Central Pennsylvania Geotechnical Conference*, Hershey, 2017.
- [25] European Committee for Standardization, EN 1538+A1, ASRO, 2015.
- [26] D. A. Shepherd, E. Kotan and F. Dehn, "Plastic concrete for cut-off walls: A review," *Construction and building materials*, vol. 255, 2020.
- [27] Asociația de Standardizare din România, "SR EN 197-1: Ciment - Partea 1: Compoziție, specificații și criterii de conformitate ale cimenturilor uzuale," Asociația de Standardizare din România, 2011.
- [28] N. Adam M, Properties of concrete, Harlow, 2011.
- [29] B. Donald A, Specialty Construction Techniques for Dam and Levee Remediation, CRC Press, 2012.
- [30] European Federation of Foundation Contractors and Deep Foundations Institute, "Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations," 2018.
- [31] Österreichisches Normungsinstitut, "ONORM B 4452 - Erd - und Grundbau - Dichtwände in Untergrund," 1998.
- [32] S. D. Hinchberger, J. Weck and T. Newson, "Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 47, no. 4, pp. 461-471, 2010.
- [33] Y. P. Pisheh and S. M. M. Hosseini, "Experimental Investigation of Mechanical Behavior of Plastic Concrete in Cutoff Walls," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018.
- [34] P. Zhang, "Mechanical Properties of Plastic Concrete Containing Bentonite," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 1317-1322, 2013.
- [35] D. D. Eisenhour and R. K. Brown, "Bentonite and its Impact on Modern Life," *Elements*, vol. V, no. 2, pp. 83-88, 2009.
- [36] M. H. Gleason, D. E. Daniel and G. R. Eykholt, "Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 5, pp. 438-445, 1997.
- [37] G. R. Alther, "The Role of Bentonite in Soil Sealing Applications," *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, vol. XIX, no. 4, pp. 401-409, 1982.
- [38] A. E. Reschke and M. D. Haug, "The Physico-Chemical Properties of Bentonites and the Performance of Sand-Bentonite Mixtures," 1991.
- [39] F. Dolder, U. Mader, A. Jenni and N. Schwendener, "Experimental characterization of cement-bentonite interaction using core infiltration techniques and 4D computed tomography," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vols. 707-71, pp. 104-113, 2014.

- [40] T. Sugiyama and Y. Tsuji, "Use of a Migration Technique to Study Alteration of Compacted Sand-Bentonite Mixture in Contact with Concrete," *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, vol. 32, no. 2, pp. 276-284, 2008.
- [41] M. A. Fadaie, M. Nekooei and P. Javadi, "Effect of Dry and Saturated Bentonite on Plastic Concrete," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 8, pp. 3431-3442, 2019.
- [42] Ministerul Dezvoltării, Lucrărilor Publice și Locuințelor, NE012-1:2007 - Cod de practică pentru executarea lucrărilor din beton armat și precomprimat - Producerea betonului, București: Ministerul Dezvoltării, Lucrărilor Publice și Locuințelor, 2007.
- [43] A. Mahboubi and A. Ajorloo, "Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 1, pp. 412-419, 2005.
- [44] S. Kazemian, S. Ghareh and L. Torkanloo, "Investigation of Plastic Concrete Bentonite Changes on Its Physical Properties," *Procedia Engineering*, vol. 145, no. 1, pp. 1081-1087, 2016.
- [45] HeidelbergCement România S.A, Minighid de proiectare a compozițiilor de beton uzual cu cimenturi Carpatciment CEM I, CEM II/A-S și CEM II/A-LL, București, 2017.
- [46] Comitetul European de Standardizare, SR EN 12390-8 - Încercare pe beton întărit. Partea 8: Adâncimea de pătrundere a apei sub presiune, București: Asociația de Standardizare din România, 2009.
- [47] A. Pashazadeh, N. Ganjian and M. Khosravi, "Estimating An Appropriate Plastic Concrete Mixing Design for Cutoff Walls to Control Leakage Under the Earthen Dam," 2009.
- [48] J. Evans, M. Ororbia, J. Gutelius, D. Ruffing, L. Barlow and M. Malusis, "Soil-bentonite slurry trench cutoff wall lateral deformations, consolidation, stress transfer and hydraulic conductivity," in *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (CPEG2)*, Leeds, 2017.
- [49] F. Mathieu, J.-F. Mosser, N. Utter and S. Darson-Balleur, "Deep Soil Mixing with Geomix Method: Influence of Dispersion in UCS Values on Design Calculations," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing*, New Orleans, 2012.
- [50] Bachy Soletanche, "bacsol.co.uk," Bachy Soletanche, 2017. [Online]. Available: <https://www.bacsol.co.uk/solution/cut-off-walls/>. [Accessed 20 July 2020].
- [51] Menard Canada, "menardcanada.ca," Soletanche Bachy, 2017. [Online]. Available: <https://menardcanada.ca/ground-improvement-solutions/trenchmix/>. [Accessed 20 July 2020].
- [52] Bega Minerale S.A, "www.begaminerale.ro," 2021. [Online]. Available: <https://begaminerale.ro/wp-content/uploads/2021/02/FT-3-Bentonita-macinata-activata-pentru-foraje.pdf>. [Accessed 12 2021].
- [53] European Committee of Standardization, "EN 196-1:2016: Method of testing cement - Part 1: Determination of Strength," European Committee of Standardization, 2016.
- [54] European Committee of Standardization, "Geotechnical Investigation and testing - Laboratory testing of soil. Part 11: Permeability tests," European Committee of Standardization, 2014.
- [55] Asociația de Standardizare din România, "STAS 8942/6-75: Teren de fundare - Încercarea pământurilor la compresiune monoaxială," Asociația de Standardizare din România, 1976.

-
- [56] E. K. Zavadkas and Z. Turskis, "A new logarithmic normalization method in games theory," *Informatica*, vol. 19, no. 2, pp. 303-314, 2008.
- [57] P. F. Banfill, "Rheology of Fresh Cement and Concrete," *Materials Science*, vol. DOI:10.4324/9780203473290, pp. 61-130, 1991.
- [58] C. Ryan and S. Day, "Soil-Cement-Bentonite Slurry Walls," in *Deep Foundations*, 2002, pp. 713-727.
- [59] C. R. Ryan and S. R. Day, "www.geo-solutions.com," 01 03 2017. [Online]. Available: https://www.geo-solutions.com/wp-content/uploads/2017/03/14_Soil_Bentonite_Slurry_Wall_Specifications.pdf. [Accessed 21 02 2021].
- [60] Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Construcții și Economia Construcțiilor, "Cod de practică pentru executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat, Partea I - Producerea betonului, NE012-1:2007," Ministerul Dezvoltării, Lucrărilor Publice și Locuințelor, 2007.