



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Įvairių priedų panaudojimas savaime atsinaujinančio betono efektui pasiekti

Baigiamasis magistro projektas

Lina Vaškytė

Projekto autorė

Doc. dr. Algirdas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Įvairių priedų panaudojimas savaime atsinaujinančio betono efektui pasiekti

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6211EX008)

Lina Vaškytė

Projekto autorė

Doc. dr. Algirdas Augonis

Vadovas

Doc. dr. Ernestas Ivanauskas

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lina Vaškytė

Įvairių priedų panaudojimas savaime atsinaujinančio betono efektui pasiekti

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Linos Vaškytės, baigiamasis projektas tema „Įvairių priedų panaudojimas savaime atsinaujinančio betono efektui pasiekti“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
ĮVAIRIŲ PRIEDŲ PANAUDOJIMAS SAVAIME ATSINAUJINANČIO BETONO EFEKTUI PASIEKTI

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: 2020 m. lapkričio 30 d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):
ĮVAIRIŲ PRIEDŲ PANAUDOJIMAS SAVAIME ATSINAUJINANČIO BETONO EFEKTUI PASIEKTI

(anglų k.):
USE OF VARIOUS ADDITIVES TO ACHIEVE THE EFFECT OF SELF-HEALING CONCRETE

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	<input checked="" type="checkbox"/>
Literatūros apžvalga	<input checked="" type="checkbox"/>
Metodologija	<input checked="" type="checkbox"/>
Eksperimentiniai tyrimai	<input checked="" type="checkbox"/>
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	<input checked="" type="checkbox"/>

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas: doc. Algirdas Augonis
(indėlis 100 %) pareigos, vardas, pavardė parašas

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) pareigos, vardas, pavardė parašas

Konsultantas: _____
(indėlis _____ %) pareigos, vardas, pavardė parašas

Studentas: _____
Lina Vaškytė
vardas, pavardė parašas

Vaškytė, Lina. Įvairių priedų panaudojimas savaime atsinaujinančio betono efektui pasiekti. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algirdas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: betonas, cementinė tešla, tirpalas, plyšys, savaiminis atsinaujinimas, kristalai, mineraliniai priedai.

Kaunas, 2021. 70 p.

Santrauka

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas – ištirti savaime atsinaujinančio betono užsitaisymo efektyvumą naudojant priedus, kurių poveikis betono atsinaujinimui nėra pilnai ištirtas. Taip pat išbandyti alternatyvius plyšį betone galinčių užtaisyti kristalų susidarymo būdus bei naują užsitaisymo efektyvumo vertinimo metodą.

Darbo metu atlikta literatūros bei mokslinių tyrimų analizė. Surinktos bendrosios žinios apie pagrindinius savaiminio betono atsinaujinimo principus, reikalingas sąlygas bei tyrimų metodus. Išanalizuoti atliktų mokslinių tyrimų rezultatai bei mažai tirtų medžiagų teorinis pritaikomumas betono atsinaujinimui.

Eksperimentinės darbo dalies metu atlikti bandymai, kuriais siekiama išsiaiškinti įvairių mineralinių bei organinių priedų įtaką plyšio užsitaisymui. Atliekant bandymus su cementinės tešlos bandiniais nustatyta, jog bandinių sudėtyje naudoti amorfinio silicio dioksido, kalcio stearato bei natrio alginato priedai nėra efektyvūs siekiant pilno plyšio užsivėrimo bandinyje. Darbe tirtos betono bandinių su skeltu plyšiu atsinaujinimo galimybės, bandinių sudėtyje naudojant priedus, kurių veikimas paremtas singenito, etringito bei kalcio karbonato susidarymu plyšyje. Šio tyrimo metu gauti rezultatai parodė, jog efektyviausiai taisėsi bandiniai, kurių sudėtyje naudotas kalio sulfato bei anhidrito mišinys, o betono atsinaujinimo efektyvumas labai priklauso nuo vandens kiekio plyšyje. Baigiamajame darbe plyšio užsivėrimo efektyvumas vertintas plyšio pločio matavimo bei vandens pralaidumo metodais. Vis dėlto, atlikti bandymai parodė, jog plyšio užsivėrimo efektyvumo vertinimas matuojant plyšio plotį bandinio paviršiuje nėra tinkamas patikimai kiekybinei analizei atlikti.

Darbo metu taip pat išbandyta plyšį galinčių užtaisyti kristalų susidarymo galimybė, taikant priešpriešinės medžiagų difuzijos metodą. Gauti rezultatai parodė, jog medžiagų vandeniniuose tirpaluose gali susidaryti plyšį užpildančios medžiagos kristalai, o kristalų auginimo medžiagų vandeniniuose tirpaluose metodas gali būti pritaikomas naujų kristalinių priedų kūrimo procese.

Atsižvelgiant į tai, jog betono atsinaujinimo efektyvumo vertinimas vis dar nėra standartizuotas, magistro baigiamojo projekto metu sukurta nauja atsinaujinimo efektyvumo vertinimo metodika. Bandymo metu nustatyta, jog betono bandiniuose suformuotame lygiame plyšyje, panaudojant vandenį užlaikančias priemones, gali būti pasiekiamas net ir lygaus plyšio užsitaisymas. Taikyta metodika gali būti perspektyvi, tačiau, siekiant atlikti itin tikslią kiekybinę analizę, metodiką reikia tobulinti.

Baigiamojo darbo apimtis – 80 psl., teksto be priedų – 70 psl., 55 iliustracijos, 6 lentelės bei 7 priedai. Baigiamajame darbe naudotos literatūros šaltinių skaičius – 36.

Vaškytė, Lina. Use of Various Additives to Achieve the Effect of Self-Healing Concrete. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Algirdas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: concrete, cement paste, solution, crack, self-healing, crystals, mineral additives.

Kaunas, 2021. 70 pages.

Summary

The aim of this master's thesis is to investigate the efficiency of self-healing concrete using additives whose effect on concrete regeneration has not been fully investigated. Also to test alternative ways of forming crystals that can fill a crack in concrete structures and to test a new method for evaluating the effectiveness of self-healing concrete.

An analysis of literature and research was performed during the work. General knowledge about the basic principles of self-healing concrete, necessary conditions and test methods has been collected. The results of scientific research and the theoretical applicability of little-studied materials for concrete healing are analyzed.

In the experimental part of the work, tests were performed to find out the influence of various mineral and polymer additives on crack sealing. During the tests with cement paste samples, it was found that the additives of amorphous silica, calcium stearate and sodium alginate used in the samples were not effective in closing the crack. The possibilities of self-healing of cracked concrete specimens were investigated using additives based on the formation of syngenite, ettringite and calcium carbonate in the crack. The results of this study show that the samples consisting of a mixture of potassium sulfate and anhydrite were the most effective in self-healing, however the efficiency of self-healing concrete is highly dependent on the amount of water in the crack. In this master's final degree project, the crack closure efficiency was evaluated by the crack width measurement and water permeability methods. However, the tests showed that the evaluation of the crack closure efficiency by measuring the crack width on the sample surface is not suitable for reliable quantitative analysis.

In the experimental part of the work it was also tested the possibility of the formation of crack-filling crystals using the method of liquid-liquid diffusion. The results show that crystals of the crack-filling material can be formed in aqueous solutions of materials, and the method of crystal growth materials in aqueous solutions can be adapted to the development process of new crystalline additives.

Taking into account that the assessment of self-healing concrete efficiency is still not standardized, a new methodology for self-healing efficiency assessment was developed during the master's final project. During the test, it was found that full crack closure can be achieved even in a smooth crack by using water-retaining means. The methodology used may be promising, but the methodology needs to be improved in order to perform a highly accurate quantitative analysis.

Master's thesis consists of 80 pages, text without appendixes –70 pages, 55 illustrations, 6 tables and 7 annexes. The number of literature and sources used in the final degree project – 36.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Betono savaiminio atsinaujinimo efektas	13
1.1.1. Autogeninis atsinaujinimas	13
1.1.2. Autonominis atsinaujinimas	14
1.2. Mokslinių tyrimų analizė. Įvairių naudotų priedų įtaka savaiminiam betono atsinaujinimui ..	18
1.3. Tyrimų metodai bei atsinaujinimo efektyvumo vertinimas.....	20
1.3.1. Vaizdinė analizė	21
1.3.2. Vandens pralaidumo tyrimas	21
1.3.3. Dujų pralaidumo tyrimas	23
1.3.4. Kapiliarinio vandens patraukimo bandymas	24
1.4. Aplinkos sąlygų įtaka atsinaujinimui, paremtam mineraliniais priedais.....	24
1.5. Plėtriujų kristalų susidarymo galimybės savaiminio betono atsinaujinimo efektui pasiekti....	25
2. Tyrimų metodologija	28
2.1. Kristalinių priedų parinkimas ir savaiminio atsinaujinimo efektyvumo vertinimas cementinėse sistemose.....	28
2.1.1. Bandinių sudėtis ir gamyba	28
2.1.2. Plyšių sudarymo metodai	30
2.1.3. Bandinių laikymo aplinkos sąlygos.....	31
2.1.4. Plyšių užsivėrimo efektyvumo vertinimo metodas matuojant plyšio plotį	31
2.1.5. Plyšių užsivėrimo efektyvumo vertinimas vandens pralaidumo metodu	31
2.1.6. Cementinės tešlos bandinių vandens įgeriamumo kinetika.....	32
2.2. Kristalų susidarymas medžiagų vandeniniuose tirpaluose taikant priešpriešinės difuzijos metodą	34
2.3. Kristalinių priedų parinkimas ir savaiminio atsinaujinimo efektyvumo vertinimas betoninėse sistemose.....	36
2.3.1. Bandinių sudėtis ir gamyba	36
2.3.2. Skelto plyšio formavimo metodas	39
2.3.3. Lygaus plyšio formavimo metodas	40
2.3.4. Atsinaujinimo efektyvumo vertinimas betono bandiniuose taikant vandens pralaidumo metodą ⁴²	
2.3.5. Betono bandinių laikymo sąlygos	43
3. Rezultatai.....	44
3.1. Plyšio pločio užsivėrimo efektyvumas cementinės tešlos bandiniuose	44
3.1.1. Bandinių su komerciniais mineraliniais priedais atsinaujinimo efektyvumo vertinimas.....	44
3.1.2. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais atsinaujinimo efektyvumo vertinimas	49
3.1.3. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais įgeriamumo kinetika	55
3.2. Kristalų susidarymas medžiagų vandeniniuose tirpaluose taikant priešpriešinės difuzijos metodą	58

3.3. Plyšio pločio užsivėrimo efektyvumas betono bandiniuose su pasirinktais mineraliniais priedais	63
3.3.1. Pasirinktų priedų įtaka betono gniuždomajam stipriui bei tankiui	63
3.3.2. Skelto plyšio užsitaismo efektyvumo vertinimas	64
3.3.3. Lygaus plyšio užsitaismo efektyvumo vertinimas	65
Išvados	67
Literatūros sąrašas	68
Priedai.....	71
1 priedas. Cementinės tešlos bandinių su komerciniais mineraliniais priedais plyšio pločio matavimo rezultatai	71
2 priedas. Cementinės tešlos bandinių su parinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio pločio matavimo rezultatai	73
3 priedas. Cementinės tešlos bandinių su parinktais mineraliniais bei organiniais priedais vandens pralaidumo bandymo rezultatai	75
4 priedas. Cementinės tešlos bandinių įgeriamumo kinetikos rezultatai.....	76
5 priedas. Betono bandinių gniuždomojo stiprio ir tankio nustatymo rezultatai.....	77
6 priedas. Skelto plyšio bandinių vandens pralaidumo bandymo rezultatai	79
7 priedas. Lygaus plyšio bandinių vandens pralaidumo bandymo rezultatai.....	80

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pagrindiniai tyrimų metodai naudojami atsinaujinimo efektyvumui tirti [23]	20
2 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai pirmojo etapo cementinės tešlos bandinių sudėtyse	28
3 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai antrojo etapo cementinės tešlos bandinių sudėtyse	29
4 lentelė. Kristalų gavimui naudotų medžiagų kiekiai vandeninių tirpalų sandūroje	35
5 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai betono bandinių sudėtyse.....	39
6 lentelė. Bandymo sistemose susidariusių kristalų analizė	59

Paveikslų sąrašas

1 pav. Savaimė atsinaujinančio betono klasifikacija.....	13
2 pav. Galimi betono autogeninio atsinaujinimo atvejai: (a) kalcio karbonato bei kalcio hidroksido susidarymas, (b) užsikimšimas kietosiomis dalelėmis, (c) tolimesnė cemento dalelių hidratacija, (d) savaiminis betono plėtimasis [6]	14
3 pav. Principinis plyšio užsitaisymo mechanizmas, veikiant SAP [10].....	15
4 pav. Plyšio užsitaisymo procesas, naudojant bakterinius priedus [11].....	16
5 pav. Plyšio užpildymas kalcio karbonatu susidarantiu bakterijų medžiagų apykaitos procesu metu [4]	17
6 pav. Kalcio karbonato koncentracijos ties elemento paviršiumi susidarymo schema [13].....	18
7 pav. Plyšio užsitaisymas, naudojant superabsorbuojančius polimerus (SAP) ir kristalinius priedus (CA) [20]	19
8 pav. Schematiška bandymo sistema skirta vandens pralaidumo koeficiento nustatymui [21].....	22
9 pav. Schematiška bandymo sistema atliekant dujų pralaidumo bandymą [16].....	23
10 pav. Schematiška bandymo sistema, atliekant kapiliarinio vandens patraukimo bandymą [21] .	24
11 pav. Ryšys tarp Ca^{2+} jonų kiekio, pH ir dalinio CO_2 slėgio [12]	25
12 pav. Pirmojo eksperimentinės dalies etapo bandiniai.....	28
13 pav. Antrojo etapo bandinių gamyboje naudotos medžiagos. Iš kairės: kalcio stearatas, maltas amorfinis silicio dioksidas ir natrio alginatas	29
14 pav. Plyšio suformavimas skėlimo metodu	30
15 pav. Perpjautų bandinių plyšio paviršius.....	30
16 pav. Cementinės tešlos bandinių vandens pralaidumo bandymas.....	32
17 pav. Principinė bandymo sistema, atliekant kristalų auginimo dviejų tirpalų sandūroje bandymą [36]	35
18 pav. Bandymo sistemos, atliekant kristalų auginimo dviejų tirpalų sandūroje bandymą.....	35
19 pav. Valgomosios sodos ($NaHCO_3$) ir kalcio chlorido ($CaCl_2$) tirpalų reakcija maltame amorfiniame silicio dioksido (SiO_2).....	37
20 pav. Ketvirtoje bandinių sudėtyje naudotos medžiagos. Iš kairės: maltas amorfinis silicio dioksidas; trietalonaminas; dviejų medžiagų mišinys, naudotas bandinių gamybos metu	37
21 pav. Šeštojoje bandinių sudėtyje naudotas kalio sulfato tirpalo bei amorfinio silicio dioksido mišinys prieš džiovinimą	38
22 pav. Suformuoti skelto plyšio bandiniai, reikiama plyšio plotį užtikrinant metalinių plokštelių bei sriegtų strypų pagalba.....	40
23 pav. Lygaus plyšio suformavimas perpjovus prizmės formos bandinius.....	40
24 pav. Filtrinio popieriaus pozicija lygiame plyšyje.....	41
25 pav. Užsandarinami plyšio kraštai prizmės formos bandiniuose	41
26 pav. Vandens pralaidumo bandymas: kairėje – lygaus plyšio bandinys; dešinėje – skelto plyšio bandinys.....	42
27 pav. Bandinių su lygiu plyšiu laikymo sąlygos	43
28 pav. Bandinių su skeltu plyšiu laikymo sąlygos.....	43
29 pav. Cikliška vandenyje bei ore laikomų bandinių vaizdas po 28 parų: (a) – K sudėties bandinys; (b) – S sudėties bandinys; (c) – B sudėties bandinys	44
30 pav. Kristalų susidarymas plyšio išorėje dalinai pamerktuose bandiniuose po 28 parų: (a) – B sudėties bandinys; (b) – S sudėties bandinys	45
31 pav. Ore esančio S sudėties bandinio paviršius po 28 parų.....	46

32 pav. Cementinės tešlos bandinių su komerciniais mineraliniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių, apskaičiuotų remiantis plyšio pločio matavimais, palyginimas po 83 parų, bandinius laikant skirtingomis aplinkos sąlygomis	46
33 pav. K sudėties bandinys laikomas kintamomis aplinkos sąlygomis. Plyšio pločio nr. 2: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų	47
34 pav. S sudėties bandinys laikomas kintamomis aplinkos sąlygomis. Plyšio pločio nr. 3: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų	48
35 pav. B sudėties bandinys laikomas kintamomis aplinkos sąlygomis. Plyšio pločio nr. 2: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų	48
36 pav. K sudėties bandinys laikomas dalinai pamerktas į vandenį. Plyšio paviršius laikytas ore. Plyšio pločio nr. 1: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų	49
37 pav. S sudėties bandinys laikomas dalinai pamerktas į vandenį. Plyšio paviršius laikytas ore. Plyšio pločio nr. 1: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų	49
38 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių, apskaičiuotų remiantis plyšio pločio matavimais, palyginimas po 28 parų, bandinius laikant skirtingomis aplinkos sąlygomis	50
39 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių, apskaičiuotų remiantis vandens pralaidumo matavimais, palyginimas po 28 parų, bandinius laikant skirtingomis aplinkos sąlygomis	51
40 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių palyginimas po 28 parų, bandinius laikant nuolat pamerktus vandenyje.....	52
41 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių palyginimas po 28 parų, bandinius cikliška laikant vandenyje bei ore.....	52
42 pav. Cementinės tešlos bandinių su skirtingais mineraliniais ir organiniais priedais perskelto plyšio vaizdas po 28 parų: (a) – I sudėties bandinys; (b) – II sudėties bandinys; (c) – III sudėties bandinys; (d) – IV sudėties bandinys; (e) – V sudėties bandinys	53
43 pav. I sudėties bandinys su lygiu plyšiu: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje	54
44 pav. I sudėties bandinio perskelto plyšio vaizdas: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje.....	54
45 pav. II sudėties bandinys su lygiu plyšiu: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje.....	55
46 pav. II sudėties bandinio perskelto plyšio vaizdas: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje.....	55
47 pav. Cementinės tešlos bandinių vandens įgėrio pagal masę palyginimas.....	56
48 pav. Cementinės tešlos bandinių vandens įgėrio pagal tūrį palyginimas	56
49 pav. Cementinės tešlos bandinių bendro, atviro bei uždaro poringumų palyginimas	57
50 pav. Sausų cementinių bandinių tankių palyginimas	57
51 pav. Betono bandinių su skirtingais mineraliniais priedais gniuždomojo stiprio palyginimas	63
52 pav. Betono bandinių su skirtingais mineraliniais priedais tankių palyginimas.....	64
53 pav. Skirtingų sudėčių betono bandinių su skeltu plyšiu užsivėrimo rodiklių palyginimas.....	64
54 pav. Betono bandinių su lygiu plyšiu bei vandenį plyšyje užlaikančiomis priemonėmis užsivėrimo rodiklių palyginimas	66
55 pav. Lygaus plyšio bandinių mikroskopinis vaizdas po 28 parų.....	66

Įvadas

Kiekvienais metais nemaža dalis statybų sektoriaus biudžeto yra skiriama ne naujų pastatų ar statinių įrengimui, bet esamų konstrukcijų remontui bei konstrukcijų naudojimo trukmės prailginimui. Betono konstrukcijos, dėl savo mechaninių bei fizikinių savybių, ilgaamžiškumo, ekonominio efektyvumo bei plataus pritaikomumo yra bene plačiausiai naudojamos konstrukcijos statybų rinkoje.

Kaip bebūtų, tokių konstrukcijų ilgaamžiškumas bei eksploatacinis periodas labai priklauso nuo naudojamų medžiagų savybių, projektavimo bei konstravimo praktikos, aplinkos sąlygų bei kitų veiksnių, kurie gali turėti įtakos betono estetinėms, funkcinėms bei struktūrinėms savybėms. Ir nors betono konstrukcijų pažeidimai dažnai yra kompleksinis įvairių veiksnių padarinys, pirmasis faktorius, dažnai nulemiantis tolimesnį medžiagos savybių prastėjimą, yra betono paviršiuje atsiradę įtrūkimai. Būtent dėl šios priežasties, norint užtikrinti patikimą bei ilgaamžį konstrukcijos darbą, ypač svarbu užkirsti kelią tolimesniam plyšių vystymuisi betono konstrukcijose.

1836 m. pirmą kartą pastebėta, jog betonas turi savybę savaime užsitaistyti atsivėrusius plyšius. Būtent šis atradimas tapo tolimesnių mokslinių tyrinėjimų pagrindu, siekiant užtikrinti ilgesnį ir patikimesnį konstrukcijos eksploatacinį periodą. Siekiant efektyvesnio plyšio užsitaistymo, betono sudėtyje imta naudoti įvairius priedus, kurie, reaguodami su betone esančiomis medžiagomis, sudaro junginius, galinčius užpildyti atsivėrusį plyšį. Nuo to laiko mokslininkai atliko daugybę tyrimų, siekiant išsiaiškinti įvairių faktorių bei medžiagų įtaką savaiminiam betono atsinaujinimui, kaip ir išbandė daugybę įvairių metodų betono atsinaujinimo efektyvumui vertinti.

Vis dėlto, nors šiandien ir atliekama daugybė kokybinių tyrimų, skirtų išsiaiškinti įvairių medžiagų įtaką betono atsinaujinimui, pagrindinė problema lieka ta, jog betono atsinaujinimo efektyvumo vertinimas vis dar nėra standartizuotas. Tai reiškia, jog šiuo metu vis dar nėra sukurta tinkama metodika kiekybiniam tyrimams atlikti, kuri leistų tiksliai įvertinti naudojamos medžiagos poveikį betono atsinaujinimui bei išspręstų plyšių nevienodumo įtakos gaunamiems rezultatams problemą.

Šio darbo tikslas – ištirti savaime atsinaujinančio betono užsitaistymo efektyvumą naudojant priedus, kurių poveikis betono atsinaujinimui nėra pilnai ištirtas, išbandyti alternatyvius plyšį betone galinčių užsitaistyti kristalų susidarymo bei atsinaujinimo efektyvumo vertinimo metodus.

Darbo uždaviniai:

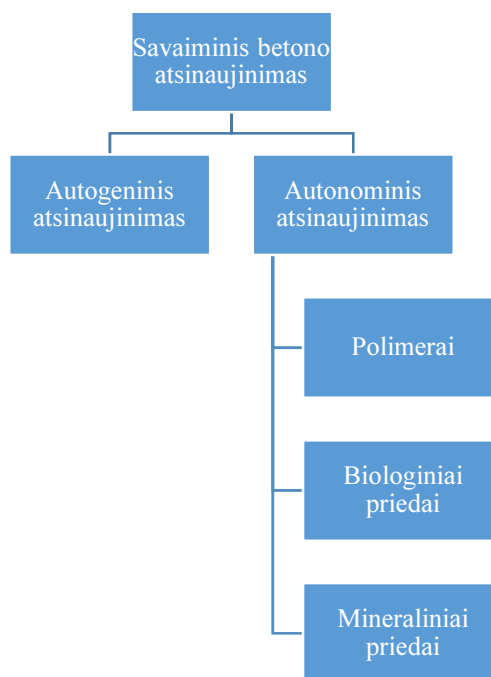
1. Atlikti literatūros analizę ir apibrėžti pagrindinius savaiminio betono atsinaujinimo principus, reikalingas sąlygas bei tyrimų metodus. Išanalizuoti atliktus mokslinius tyrimus ir nustatyti skirtingų mineralinių priedų efektyvumą ir panaudojimo perspektyvas;
2. Eksperimentiškai ištirti ir palyginti plyšio užsivėrimo efektyvumą cementinės tešlos bandiniuose su skirtingais mineraliniais bei organiniais priedais, taikant plyšio pločio matavimo bei vandens pralaidumo metodus;
3. Eksperimentiškai ištirti plyšį betone galinčių užsitaistyti kristalų susidarymo galimybes, panaudojant skirtingų medžiagų vandeninius tirpalus;
4. Ištirti betono bandinių su skeltu plyšiu atsinaujinimo galimybes, bandinių sudėtyje naudojant priedus, kurių veikimas paremtas singenito, etringito bei kalcio karbonato susidarymu plyšyje;
5. Eksperimentiškai išbandyti ir įvertinti naujos betono atsinaujinimo efektyvumo vertinimo metodikos pritaikomumą, lygiame plyšyje naudojant vandenį užlaikančias priemones.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Betono savaiminio atsinaujinimo efektas

Betonas – tai medžiaga, kuri dėl savo sudėties, mechaninių, fizikinių savybių bei galimo plataus panaudojimo, šiandien yra nepakeičiama statybinių konstrukcijų gamyboje. Tačiau veikiamos išorinių apkrovų, temperatūros, agresyvios aplinkos bei kitų sąlygų, betono ar gelžbetonio konstrukcijos yra linkusios pleišėti. Šie defektai ženkliai paspartina betono cheminę koroziją, plieno korozijos atsiradimą bei neigiamai veikia konstrukcijos patikimumą [1].

1836 metais Prancūzijos mokslų akademijoje atlikti tyrimai parodė, jog cementiniu pagrindu pagamintos medžiagos turi savybę savaime užtaisyti atsivėrusius plyšius, o šis procesas vadinamas autogeniniu atsinaujinimu ir yra pagrįstas tolimesne cemento dalelių hidratacija ir ištirpusio kalcio hidroksido karbonizacija [2]. Įvairūs tyrimai parodė, kad savaime užsitaistyti gali tik nedideli plyšiai, t. y., vidutiniškai iki 60 μm [1]. Tam, kad būtų pagerintas savaiminis vidinių bei išorinių plyšių užsitaistymo efektas, į betono sudėtį imta dėti įvairių priedų. Priedais paremtas plyšių užsivėrimo procesas vadinamas autonominiu atsinaujinimu.



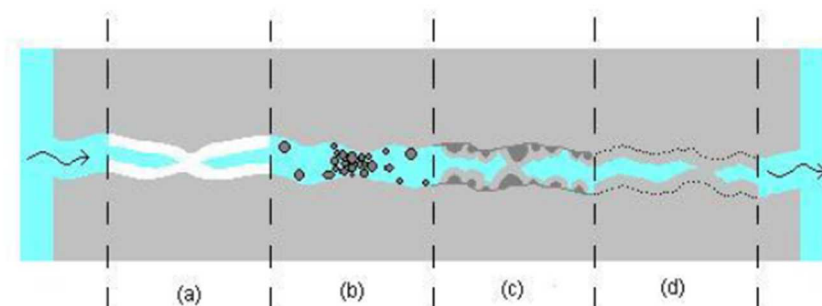
1 pav. Savaime atsinaujinančio betono klasifikacija

1.1.1. Autogeninis atsinaujinimas

Nuo savaiminio betono atsinaujinimo reiškinio atradimo buvo atlikta daugybė mokslinių tyrimų. Remiantis atlikta literatūros analize nustatyta, jog tam, kad įvyktų visiškas betone esančio plyšio užsivėrimas, yra apibrėžiamos būtinos aplinkos sąlygos, atitinkamos betono sudėtyje esančios cheminės medžiagos bei iš dalies nedidelis plyšio plotis [3]. Autogeninis atsinaujinimas yra paremtas cheminėmis reakcijomis, vykstančiomis tarp betone esančių cheminių medžiagų bei vandens [4].

Remiantis nagrinėta literatūra išsiaiškinta, jog gali būti išskiriami keturi pagrindiniai autogeninio atsinaujinimo mechanizmai, t. y., nesureagavusių cemento dalelių hidratacija, savaiminis betono plėtimasis atsivėrusiuose įtrūkimuose, kalcio karbonato bei kalcio hidroksido kristalizacija bei plyšių

užsikimšimas įvairiomis kietosiomis vandens priemaišomis [5]. 2 paveiksle pavaizduoti galimi autogeninio atsinaujinimo atvejai.



2 pav. Galimi betono autogeninio atsinaujinimo atvejai: (a) kalcio karbonato bei kalcio hidroksido susidarymas, (b) užsikimšimas kietosiomis dalelėmis, (c) tolimesnė cemento dalelių hidratacija, (d) savaiminis betono plėtimasis [6]

Dauguma mokslininkų nustatė, jog dažniausiai pasitaikantys autogeninio atsinaujinimo atvejai įvyksta dėl dviejų pagrindinių atsinaujinimo mechanizmų. Vienas jų – hidratacijos procesas, kurio metu hidratuoja betono matricoje likusios nehidratavusios cemento (klinkerio) dalelės. Taip pat dažnai pastebimas baltų kristalų sluoksnių ant plyšio sienelių susidarymas, t. y., kalcio karbonato bei kalcio hidroksido, kurie susidaro reaguojant betone esantiems kalcio (Ca^{2+}) jonams bei vandenyje esantiems įvairiems cheminiams junginiams [4, 3, 5]. Hidratacijos procesas vyksta tik vandens pH esant ne mažiau kaip 7,5 [4]. T. Chandra Sekhara Reddy ir A. Revitheja [7] savo darbe teigia, jog iš dalies naujuose betonuose dažniau pasitaikantis plyšius užtaisantis produktas gaunamas hidratacijos proceso metu, kai tuo tarpu iš dalies senesniuose betonuose dažnesnė kalcio karbonato bei kalcio hidroksido kristalų susidarymas.

Mokslininkai sutaria, jog plyšio pločio užsitaismo efektyvumas yra glaudžiai susijęs su plyšio aplinkoje esančiu vandens kiekiu. Kai vanduo pasiekia nehidratavusias cementines daleles, tirpūs hidratavimai, tokie kaip kalcio hidroksidas ($Ca(OH)_2$), ištirpsta bei nusėda ant plyšio sienelių. Apie 75 % cemento sudėties yra dikalcio silikatas (C_2S) bei trikalčio silikatas (C_3S). Vandenyje neištirpę kalcio hidroksido ($Ca(OH)_2$) junginiai reaguoja su silicio dioksidu, šios reakcijos metu susidaro kalcio karbonatas, kuris užtaiso betone esantį plyšį [4]. Be to, kalcio karbonato susidarymui bei plyšio užsivėrimo efektyvumui turi įtakos ir tokie veiksniai kaip esamo plyšio plotis, vandens temperatūra, vandens pH, vandens kietumas, chloridų koncentracija vandenyje bei anglies dioksido dalinis slėgis vandenyje, kuris skatina plyšį užtaisancio produkto susidarymą [3, 5].

1.1.2. Autonominis atsinaujinimas

Atliekant literatūros analizę pastebėta, jog per pastarąsias kelias dešimtis metų buvo atlikta daugybė mokslinių tyrimų, kurių metu į betono sudėtį dedami įvairios kilmės priedai, siekiant efektyvesnio betono savaiminio atsinaujinimo. Nepriklausomai nuo priedo kilmės, galima išskirti keletą kriterijų, pagal kuriuos gali būti nustatomas priedo tinkamumas. Efektyvus priedas turi [4]:

- veikti kaip plyšį užtaisanti medžiaga ir mažinti atsivėrusių plyšių plotį;
- būti suderinamas su betono rišamąja medžiaga;
- veikti potencialiai ilgą laiką;

- daugkartinio veikimo galimybė;
- būti ekonomiškai efektyvus.

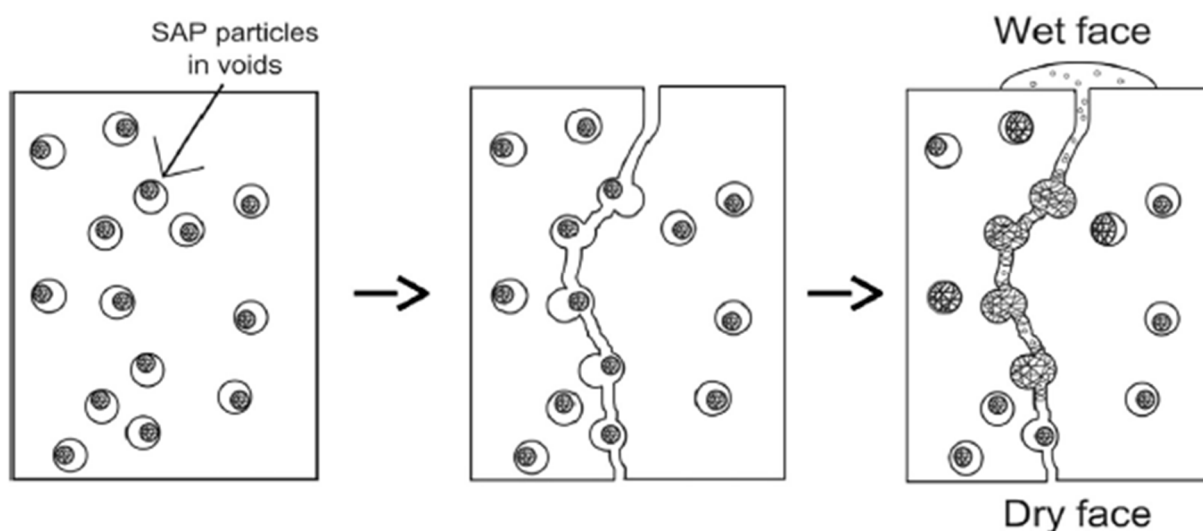
Šiuo metu pagal veikliąją medžiagą gali būti išskirtos tokios priedų rūšys:

- polimeriniai priedai;
- biologinės kilmės priedai, paremti bakterijų veikimu;
- mineraliniai priedai (išsiplečiantys, kristaliniai)

Atsinaujinimas, paremtas polimeriniais priedais

Betonas su polimeriniais priedais – tai medžiaga, kurios gamybos metu į vandenį įmaišoma organinių polimerų [8]. Abd-Emoaty [8] tyrė, jog cemento hidratacijos metu įvyksta polimerų koalescencija ir taip susidaro bendra hidratavusio cemento, padengto polimerine plėvele, rišamoji medžiaga. Jo tyrimas teigia, jog plyšių užsitaisymas betone su polimeriniais priedais vyksta tuo pačiu principu kaip ir autogeninio atsinaujinimo atveju. Tačiau, naudojant priedus, atsinaujinimas gali vykti didesniu mastu bei galimybė betonui atsinaujinti gali būti užtikrinta ilgesnį laiko periodą, lyginant su įprastu betonu. Tai gali būti paaiškinta tuo, jog polimerai apgaubia cemento daleles lyg tam tikra membrana, dėl to jau eksploatuojamame betone lieka daugiau nehidratavusių cemento dalelių.

Tačiau, siekiant pagerinti betono užsitaisymo efektyvumą, kur kas dažniau atliekami moksliniai tyrimai, kurių metu tiriamas superabsorbuojančių polimerų (SAP) poveikis betono atsinaujinimui. Superabsorbuojantys polimerai, dar žinomi kaip hidrogeliai, yra kryžmiškai sujungti polimerai, galintys absorbuoti neproporcingai didelį skysčio kiekį. Šio proceso metu, plečiantis polimerams, susidaro netirpus gelis (žr. 3 pav.). SAP plėtimosi greitis bei talpa gali priklausyti nuo polimerų tipo, skysčio savybių, įskaitant ir skysčio sudėtį, temperatūrą bei slėgį. Išsiplėtęs gelis plyšyje suformuoja vandeniui nelaidų barjerą, o sumažėjus aplinkos drėgmei, palaipsniui išleidžia absorbuotą vandenį [9].



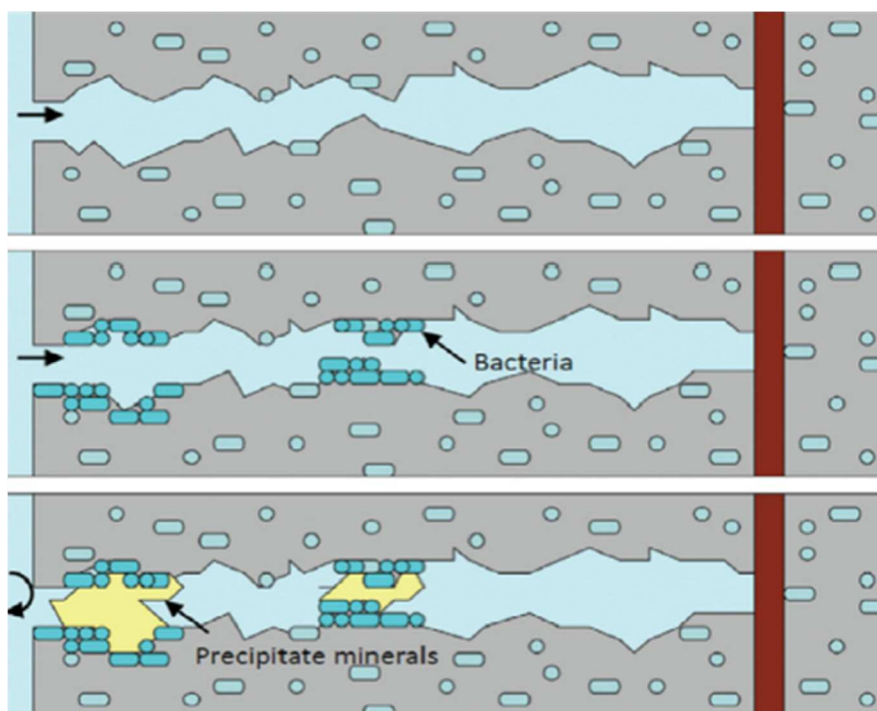
3 pav. Principinis plyšio užsitaisymo mechanizmas, veikiant SAP [10]

Polimerinių priedų betone naudojimas pagerina betono sukibimą, sumažina vandens pralaidumą, taip pat gali būti pagerintos kai kurios betono stiprumo savybės, ilgaamžiškumas [8].

Atsinaujinimas, paremtas biologiniais priedais

Biologinių gydomųjų medžiagų veikimą nagrinėja mikrobiologijos mokslų šaka – bakteriologija. Betono atsinaujinimo procese dalyvauja bacillus bakterijų grupė, kuri yra atspari šarminei aplinkai [4].

Betono atsinaujinimas naudojant bakterijas yra paremtas plyšio užpildymu kalcio karbonatu, kuris gali susidaryti dviem pagrindiniais būdais. Tam tikros bakterijos gali panaudoti anglies šaltinį tam, kad sudarytų anglies dioksidą arba karbonato jonus, kurie reaguodami su betone esančiais kalcio jonais sudaro bakterines kalcio karbonato nuosėdas ant plyšio sienelių. Tokia bakterijų veikla kuria šarminę aplinką, kuri yra naudinga tolimesniam plyšį užtaisantių nuosėdų formavimuisi. Kita vertus, bakterija tampa kalcio karbonato nuosėdų branduoliu. Dėl bakterijos ląstelės sienelės neigiamo krūvio, bakterijos traukia teigiamus katijonus, esančius aplinkoje, o kartu su jais ir teigiamus kalcio jonus, kurie kaupiasi ant ląstelių sienelių paviršiaus. Kalcio jonai, reaguodami su karbonato jonais, sudaro jau minėtas kalcio karbonato nuosėdas, kurių santalkos susidaro būtent aplink veikiančias bakterijas (žr. 4 pav.) [11].

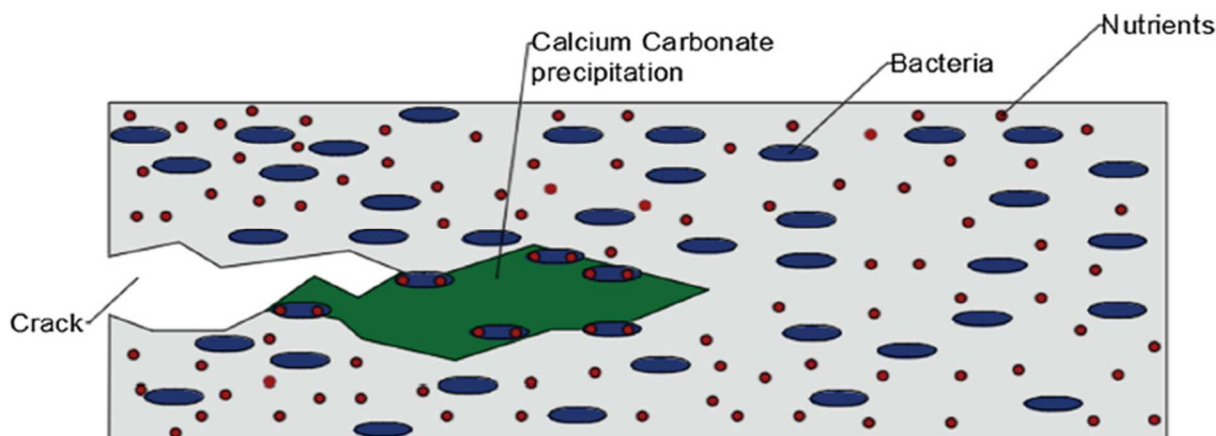


4 pav. Plyšio užsitaismo procesas, naudojant bakterinius priedus [11]

Šiek tiek mažiau moksliniuose tyrimuose tyrinėtas betono atsinaujinimo naudojant bakterijas būdas, kuris paremtas plyšio užpildymu kalcio karbonatu, kuris yra tokių medžiagų apykaitos procesų kaip fotosintezė, sulfato redukcija, urėjos hidrolizė, produktas. Šie procesai vyksta tada, kai bakterijos yra aprūpinamos maistinėmis medžiagomis (žr. 5 pav.) [4]. Šio tipo bakterijos nesudėtingai gamina anglies dioksidą bei azotą, kurie reaguodami sudaro kalcio karbonato nuosėdas [11]. Nepaisant to, šių procesų metu, kaip šalutinis produktas, gali susidaryti amoniakas, kuris reaguodamas gali virsti amonio druskomis arba azoto rūgštimi, o šios medžiagos didina korozijos bei betono struktūros suardymo riziką [4].

Moksliai tyrimai rodo, jog bakterijomis paremtas betono atsinaujinimas turi teigiamos įtakos betono konstrukcijų patvarumui, pagerinamos tokios mechaninės savybės kaip gniuždomasis stipris,

pralaidumas, ir kt. Šios kilmės priedas taip pat plačiau naudojamas ir dėl to, jog visais atvejais plyši užtaisantis produktas yra kalcio karbonatas, kuris turi puikų mechaninį bei terminį suderinamumą su cementiniais rišikliais [11].



5 pav. Plyšio užpildymas kalcio karbonatu susidaranciu bakterijų medžiagų apykaitos procesų metu [4]

Atsinaujinimas, paremtas mineraliniais priedais

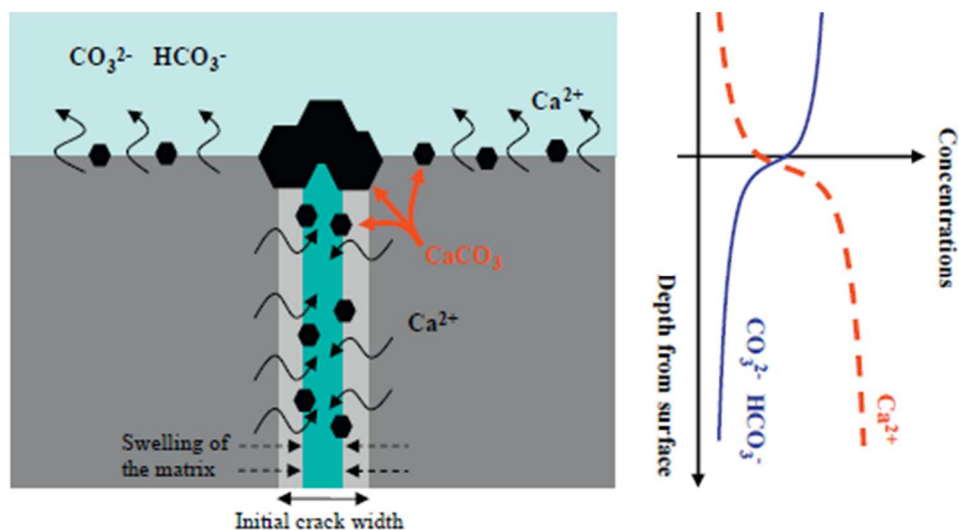
Siekiant pagerinti betoninių elementų savaiminį atsinaujinimą, į betono mišinį imta dėti mineralinių medžiagų. Atlikti tyrimai rodo, jog mineralinės medžiagos plyšį užpildo dviem pagrindiniais būdais: išsiplėsdamos arba sudarydamos kristalus [12]. Dėl šios priežasties išskiriamos dvi mineralinių priedų rūšys, t. y., išsiplečiantys priedai bei kristaliniai priedai.

Kristaliniai priedai – tai sintetinės cementinės medžiagos, kurių sudėtyje yra reaktyviojo silicio dioksido bei kai kurių kristalinių katalizatorių. Šios medžiagos reaktyvieji komponentai reaguoja su $Ca(OH)_2$ ir suformuoja kristalinį produktą, kuris užpildo įtrūkimą betone. Tačiau kristaliniai produktai gali susidaryti tik tada, kai aplinkoje yra pakankamai drėgmės. Vienas iš pagrindinių kristalinio priedo naudojimo tikslų – sumažinti vandens pralaidumą betone [13].

Išsiplečiantys priedai dažniausiai naudojami siekiant kompensuoti savaiminį betono traukimąsi. Atliekant mokslinius tyrimus pastebėta, jog naudojant išsiplečiančius priedus, plyšių, atsivėrusių dėl betono traukimosi, buvo gerokai mažiau, o to priežastis yra lėtesnė priedų hidratacija. Tačiau netikslus išsiplečiančio priedo kiekis betono mišinyje gali sukelti žalingą betono plėtimąsi vėlesniame amžiuje [14].

Beveik visuose moksliniuose tyrimuose, kuriuose tirtas plyšio atsinaujinimas paremtas mineraliniais priedais, nustatyta, jog plyšį užtaisanti medžiaga yra kalcio karbonatas [12]. K. Sisomphon'as [13] atlikdamas tyrimą pastebėjo, jog naudojant mineralinius priedus, kalcio karbonato koncentracija plyšyje susidaro ties elemento paviršiumi, o ne vidinėje įtrūkimo dalyje. Autorius savo darbe teigia, jog šis reiškinys gali būti paaiškintas tuo, jog ties elemento paviršiumi sureaguoja optimalus kiekis kalcio ir karbonato jonų (žr. 6 pav.). H. Huang'o ir G. Ye [15] atliktame tyrime taip pat pastebėta didesnė kalcio karbonato koncentracija ties plyšio paviršiumi. Siekiant išsiaiškinti šio reiškinio priežastis, į vandenį buvo įdėta papildomų kalcio jonų, tačiau medžiagos atsinaujinimo efektyvumas plyšio viduje nepagerėjo. Remiantis šiais tyrimais galima daryti išvadą, jog mažesnę kalcio karbonato kiekio susidarymą lemia ne kalcio jonų, bet karbonato jonų trūkumas. Dėl šios priežasties, į betono mišinį imta dėti mineralinių priedų (kompozitinių kalcio medžiagų), kurie užtikrintų karbonatų jonų

susidarymą plyšio viduje į jį patekus vandeniui. Tokiu būdu siekiama efektyvesnio kalcio karbonato susidarymo ne tik ties elemento paviršiumi, bet ir įtrūkimo viduje [16].



6 pav. Kalcio karbonato koncentracijos ties elemento paviršiumi susidarymo schema [13]

1.2. Mokslinių tyrimų analizė. Įvairių naudotų priedų įtaka savaiminiam betono atsinaujinimui

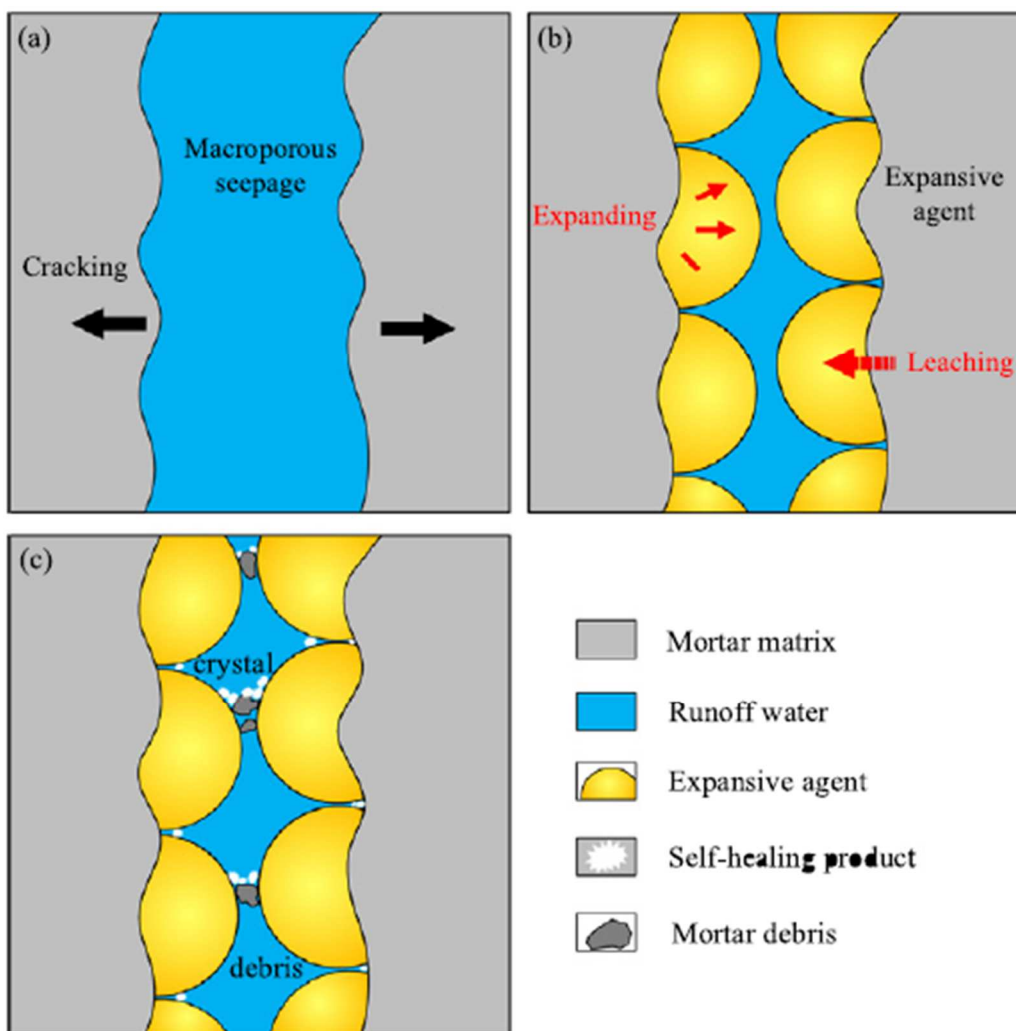
Atlikus mokslinių tyrimų analizę pastebėta, jog daugiausia tyrimų atliekama vertinant kompleksinį įvairių priedų poveikį atsinaujinimo efektyvumui.

S. Wu ir kiti [17] ištyrė, kad bendras magnio oksido (MgO) ir superabsorbuojančių polimerų (SAP) darbas gali sutrumpinti atsinaujinimo laiką iki 50%. Magnio oksidas veikia kaip plyšius užtaisyti padedantis produktas, kai tuo tarpu SAP turi savybę išskirti absorbuotą vandenį, reikalingą tolimesniam hidratacijos procesui net esant sausoms aplinkos sąlygoms. Tačiau P. Chindasiriphan'as bei kiti [18] tirdami bendrą lakiųjų pelenų bei superabsorbuojančių polimerų poveikį betono atsinaujinimo efektyvumui nustatė, jog net ir naudojant SAP , aukštesnis atsinaujinimo laipsnis per atitinkamą laiko periodą buvo pasiektas bandinių nuolat laikant vandenyje. Vis dėlto, prieita išvados, jog bendras lakiųjų pelenų bei superabsorbuojančių polimerų poveikis turi teigiamą įtaką savaiminiam betono atsinaujinimui.

G. Lefaver'is ir kiti [19] teigia, jog po kontakto su vandeniu išsiplėtę superabsorbujantys polimerai betono struktūroje sukuria mikro poras, kurios blogina betono mechanines savybes. Tam, kad būtų kompensuotas stiprumo praradimas, mokslininkai dalį cemento betono mišinyje pakeitė mikrosilika, kuri dėl vykstančių pucolaninių reakcijų pagerina betono mechanines savybes. Atlikus eksperimentą nustatyta, jog bendras polimerinių priedų bei mikrosilikos poveikis betono mechaninėms savybėms nežymus, tačiau naudojant minėtus priedus kartu, pasiektas labai efektyvus plyšio betone užsitaisymas. Naudojant SAP ir nanosilika pasiektas 100 % plyšio užsivėrimas daugiau nei 75 % matuotų plyšio vietų. Remiantis tyrimo rezultatais, galima daryti išvadą, jog šių medžiagų derinys betono mišinyje gali būti labai perspektyvus siekiant efektyvaus betono konstrukcijų atsinaujinimo.

D. Li ir kiti [20] savo darbe taip pat teigia, jog naudojant optimalų superabsorbujančių polimerų bei kristalinių priedų kiekį betono mišinyje, gali būti pasiektas efektyvus bei ekonomišką būdas, leidžiantis užtaisyti konstrukcijose atsivėrusius plyšius. Šio tyrimo metu, kaip superabsorbujantis

polimeras buvo naudota natrio hidroksidu neutralizuota poliakrilo rūgštis, o kaip kristaliniai priedai naudoti citrinos rūgštis, silicio dioksidas, natrio silikatas, natrio karbonatas bei vienas iš komercinių kristalinių priedų. Priešingai nei S. Wu ir kitų mokslininkų[17] atliktame tyrime, autoriai plyšio užsitaisymą, paremtą bendru superabsorbuojančių polimerų bei kristalinių priedų darbu, grindžia kiek kitoku mechanizmu. Autoriai teigia, jog vien superabsorbuojančių polimerų panaudojimas negali visiškai užtaisyti plyšio. Dėl šios priežasties papildomai naudojami kristaliniai priedai, o atsinaujinimo procesas suskirstomas į ankstyvąją bei vėlyvąją stadijas. Ankstyvojoje plyšio užsitaisymo stadijoje pastebimas aktyvus superabsorbuojančių polimerų išsiplėtimas plyšyje, kuris sumažina, tačiau visiškai nesustabdo vandens pratekėjimo bandinyje (žr. 7 pav. (b)). Tuo tarpu vėlyvojoje plyšio užsitaisymo stadijoje kristalinių priedų veikimas visiškai užpildo plyšį (žr. 7 pav. (c)). Tyrimas parodė, jog efektyviausiai veikiantis kristalinis priedas, naudotas kartu su SAP buvo citrinos rūgštis. Verta pastebėti ir tai, jog citrinos rūgšties kiekis panaudotas bandiniuose buvo 0,2 %, kai tuo tarpu kitų kristalinių priedų naudotas kiekis buvo lygus 2,0 %. Atlikus analizę skenuojančiu elektronų mikroskopu nustatyta, jog plyšį užpildanti medžiaga buvo kalcio karbonato bei superabsorbuojančių polimerų mišinys.



7 pav. Plyšio užsitaisymas, naudojant superabsorbuojančius polimerus (SAP) ir kristalinius priedus (CA) [20]

Z. Jiang'as ir kiti [21] tyrė įvairių mineralinių priedų poveikį betono atsinaujinimo procesui. Šiame darbe buvo išskirtos keturios pagrindinės mineralinių priedų rūšys: silicio dioksido pagrindo (mikrosilika, lakieji pelenai ir kt.), chemiškai besiplečiantys (UEA ir kt.), išbrinkstantys (bentonitas ir kt.) bei kristaliniai priedai (natrio karbonatas, talko milteliai ir kt.). Nustatyta, kad efektyviausias užsitašymas, naudojant tik vienos rūšies mineralinį priedą, buvo pastebėtas naudojant chemiškai besiplečiančius priedus. Tuo tarpu naudojant skirtingų mineralinių priedų derinius, geriausias efektas pasiektas derinant silicio dioksido pagrindo, išbrinkstančius bei kristalinius priedus. Autoriai teigia, jog tik naudojant kartu išbrinkstančius bei kristalinius priedus gali būti pasiektas geresnis užsitašymo efektas, lyginant su chemiškai išsiplečiančiais priedais, kurie išsiplėsdami įtrūkimą užpildo greičiau. Savo teiginių autoriai grindžia tuo, jog kristalizacijai reikalingi jonai gali būti išplauti tekančio vandens, o kristalizacijos procesas užtrunka ilgesnį laiko periodą.

B. Park'as ir Y. C. Choi [22] tyrime įprastas portlandcementas ir įvairūs cementiniai priedai, tokie kaip granuliuotas aukštakrosnis šlakas, lakieji pelenai, mikrosilika, išsiplečiantys bei kristaliniai priedai, buvo naudojami kaip neorganiniai rišikliai cemento pastos mišinyje. Na_2CO_3 , $NaHCO_3$, Li_2CO_3 (karbonatai) ir $CaSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, Na_2SO_4 (sulfatai) buvo naudojami kaip kristaliniai priedai hidratacijos procesui intensyvinti. Šio tyrimo metu buvo tirtas išsiskiriančios šilumos kiekis hidratacijos proceso metu, kuris gali būti tiesiogiai siejamas su atsinaujinimo intensyvumu tam tikru laiko periodu. Tyrimo metu buvo pastebėta, kad bandinių, su sulfatų tipo kristaliniais priedais, išskiriamas šilumos kiekis po 7 parų buvo didesnis, tačiau po 28 parų – mažesnis, lyginant su kontrolinio bandinio (be priedų) (SH1-1) išskiriamu šilumos kiekiu. Tuo tarpu tiriant bandinius su karbonatų tipo priedais nustatyta, jog po 7 parų išskiriamos šilumos kiekis vis dar buvo mažesnis nei SH1-1, bet po 28 išskiriamos šilumos kiekis pasiekė kontrolinio bandinio parametrus. Remiantis šiuo tyrimu galima daryti išvadą, jog betono atsinaujinimas gali priklausyti ne tik nuo priedų cheminės sudėties tačiau ir nuo betono amžiaus.

1.3. Tyrimų metodai bei atsinaujinimo efektyvumo vertinimas

K. Van Tittelboom ir N. De Belie [23] atliko mokslinių straipsnių apžvalgą, kuriuose nagrinėjamos savaimė atsinaujinančios cementinio pagrindo medžiagos. Savo darbe autorės išskyrė pagrindinius tyrimų metodus naudojamus atsinaujinimo efektyvumui tirti.

1 lentelė. Pagrindiniai tyrimų metodai naudojami atsinaujinimo efektyvumui tirti [23]

	Tyrimo metodas	Tiriami parametrai
Vizualinė analizė	Optonė mikroskopija, vaizdo analizė	Vizualinis kristalų susidarymas, gijimo greitis
	Skenuojanti elektronų mikroskopija (aplinkos skenavimo elektronų mikroskopija)	Vizualinis kristalų susidarymas
	Plonojo profilio analizė	Vizualinis kristalų susidarymas plyšio viduje
	Rentgeno spindulių rentgenografija	Vizualinis plyšį užtaisanti medžiagos pasiskirstymas
	Rentgeno spindulių tomografija	Vizualinis 3D plyšį užtaisanti medžiagos pasiskirstymas
	Skaitmeninio vaizdo koreliacija	Vizualinis plyšio užsivėrimas naudojant SMA
	Rentgeno spindulių difrakcinė analizė	Kristalinių medžiagų nustatymas
	Ramann spektroskopija	Cheminės sudėties nustatymas
	Infraraudonųjų spindulių analizė	Susidariusių produktų analizė

	Tyrimo metodas	Tiriami parametrai
Atsinaujinimo efektyvumas	Vandens pralaidumas (žemo slėgio)	Atsinaujinusios medžiagos vandens pralaidumas
	Vandens pralaidumas (aukšto slėgio)	Atsinaujinusios medžiagos vandens pralaidumas
	Oro (dujų) pralaidumas	Atsinaujinusios medžiagos oro (dujų) pralaidumas
	Kapiliarinis vandens patraukimas	Plyšį užtaisanti medžiagos kapiliarinis vandens patraukimas
	Neutronų rentgenografija	Vizualinis plyšį užtaisanti medžiagos kapiliarinis vandens patraukimas
	Korozijos testas	Atsparumas korozijai
	Chloridų difuzija	Atsparumas chloridų pralaidumui
	Osmosinis slėgis	Atsparumas jonų pralaidumui
	Ultragarso perdavimo matavimas	Medžiagos vientisumas
Mechaninių savybių atkūrimo efektyvumas	Gniuždymo bandymas	Atgaunamas stipris, standumas ir/arba energija, gaunama iš naujo apkraunant atsinaujinusio betono elementą; Naujų įtrūkimų atsiradimas lyginamas su užsitaissusių įtrūkimų pakartotiniu atsivėrimu
	Tempimo bandymas	
	Trijų taškų lenkimo testas	
	Keturių taškų lenkimo testas	
	Horizontalių deformacijų nustatymas (kolonomis, rėmams)	
	Smūginio apkrovimo bandymas	
	Rezonansinio dažnio analizė	Atgaunamas standumas

Siekiant tinkamai įvertinti atsinaujinimo laipsnį, rekomenduojama taikyti bent du skirtingus vertinimo būdus. Žemiau aprašomi plačiausiai taikomi tyrimų metodai, skirti plyšio užsivėrimo rodikliui apskaičiuoti ir atsinaujinimo efektyvumui vertinti.

1.3.1. Vaizdinė analizė

Atliekant literatūros analizę pastebėta, jog beveik visi autoriai, be kitų plyšio pločio užsitaissymo vertinimo būdų, taip pat atlieka ir vizualinį plyšio pločio paviršiuje matavimą, naudojant optinius mikroskopus, liniuotes bei kitas priemones.

Plyšio užsivėrimo rodiklis gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [24]:

$$\text{užsivėrimo rodiklis} = 1 - \frac{w_t}{w_0} \leq 0 \quad (1.3.1.1)$$

čia: w_t – plyšio plotis po atitinkamo laiko periodo;

w_0 – pradinis plyšio plotis.

1.3.2. Vandens pralaidumo tyrimas

Vandens pralaidumo tyrimas paprastai atliekamas siekiant iširti betono patvarumą, atsižvelgiant į tai, jog vandens pratekėjimas betono plyšiais ir poromis gali būti įvairių defektų priežastimi. Be vandens,

pralaidumo tyrimuose mokslininkai taip pat naudoja etanolį bei glicerolį. Vis dėlto, vandens pralaidumo sumažėjimas bėgant laikui gali būti vertinamas kaip efektyvus betono atsinaujinimo rezultatas [4].

Šio tyrimo metu vanduo į bandinį patenka pro plastikinį vamzdį, sandariai pritvirtintą prie bandinio viršaus (žr. 8 pav.). Vandens lygis vamzdyje viso bandymo metu turi būti pastovus. Dažniausiai pasitaikančiais atvejais matuojamas pro bandinį prasiskverbiantio vandens kiekis per 5 minutes.

Vandens pralaidumo koeficientas ($K(m/s)$) nustatomas plyšio atsivėrimo metu bei po tam tikro laiko periodo. Šis dydis gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [21]:

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (1.3.2.1)$$

čia: V – prasiskverbęs vandens kiekis per atitinkamą laiko intervalą;

L – bandinio storis srauto tekėjimo kryptimi;

A – skerspjūvio plotas, kuriuo vyksta vandens tekėjimas;

h – pastovus vandens aukštis vamzdyje;

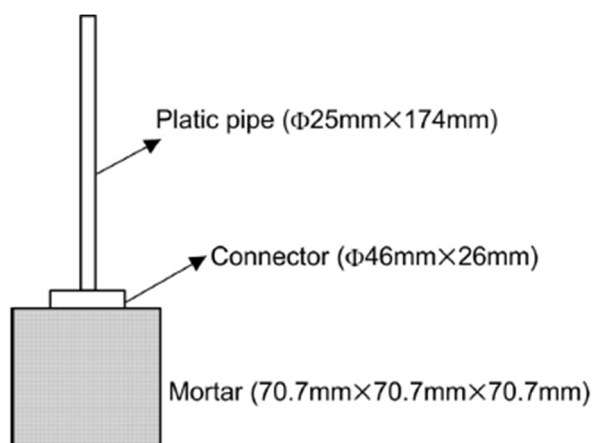
t – laikas per kurį matuojamas vandens prasiskverbimas.

Remiantis santykiniu vandens pralaidumo koeficientu (β) galima daryti išvadą apie betono plyšio užsitaisymo efektyvumą, o jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\beta = \frac{K_t}{K_0} \quad (1.3.2.2)$$

čia: K_t – vandens pralaidumo koeficientas po tam tikro laiko periodo vykstant atsinaujinimui;

K_0 – vandens pralaidumo koeficientas atsivėrus plyšiui.



8 pav. Schematiška bandymo sistema skirta vandens pralaidumo koeficiento nustatymui [21]

1.3.3. Dujų pralaidumo tyrimas

Betono patvarumas yra glaudžiai susijęs su betono pralaidumo ir difuzinėmis savybėmis. Dėl įvairių betono struktūros pažeidimų didėja medžiagos pralaidumas dujoms, o kartu su dujomis yra pernešamos kenksmingos dalelės, kurios gali negrįžtamai pažeisti betono struktūrą [4].

Dujų pralaidumo bandymas atliekamas siekiant stebėti kaip kinta elemento pralaidumas dujoms (orui) vykstant atsinaujinimo procesui. Bandymas dažnai atliekamas naudojant kelias skirtingas oro slėgio vertes. Remiantis Cembureau metodu, bandymuose naudojant 20 °C deguonį, dujų pralaidumo koeficientas (K_{oxygen}) gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [25]:

$$K_{oxygen} = \frac{4,04 \cdot 10^{-5} \cdot Q \cdot p_a \cdot L}{A(p^2 - p_a^2)} \quad (1.3.3.1)$$

čia: Q – dujų tūrio srautas;

p_a – deguonies slėgis praėjus pro bandinį, šiuo bandymo atveju manoma, jog jis lygus atmosferiniam slėgiui;

L – bandinio storis srauto kryptimi;

A – bandinio skerspjūvio plotas;

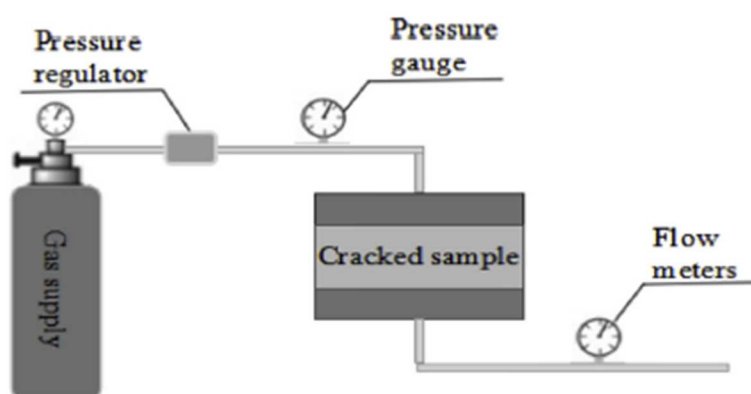
p – pradinis slėgis.

Norint nustatyti atsinaujinimo efektyvumą dujų pralaidumo bandymu, jis gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [16]:

$$\eta = \frac{K_0 - K_t}{K_0} \quad (1.3.3.2)$$

čia: K_0 – dujų pralaidumo koeficientas atsivėrus plyšiui;

K_t – dujų pralaidumo koeficientas po atitinkamo laiko periodo.



9 pav. Schematiška bandymo sistema atliekant dujų pralaidumo bandymą [16]

1.3.4. Kapiliarinio vandens patraukimo bandymas

Kapiliariniu būdu patraukto vandens kiekis elemente gali priklausyti nuo įvairių sąlygų [26]:

- medžiagų kiekių betono mišinyje proporcijų;
- cheminių priedų bei papildomų cementinių medžiagų būvimo;
- cementinių komponentų ir užpildo sudėties, bei fizinių savybių;
- pasišalinusio oro kiekio;
- kietėjimo rūšies ir trukmės;
- hidratacijos laipsnio arba amžiaus;
- įtrūkimų būvimo;
- elemento paviršiaus apdorojimo;
- drėgmės kiekio betone.

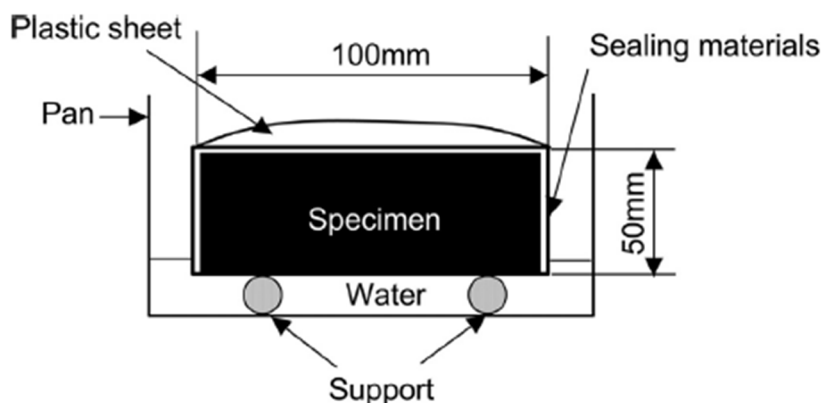
Šis metodas yra skirtas betono jautrumo vandens įsiskverbimui nustatymui taip pat vandens absorbcijos greičiui betone nustatyti, išmatuojant bandinio masės padidėjimą, atsirandantį dėl vandens absorbcijos, kai veikiamas tik vienas paviršius [26]. Neapdorotas bandinio paviršius panardinamas į vandenį ir, priklausomai nuo plyšių ir porų kiekio, atitinkamas kiekis vandens yra patraukiamas į betono bandinį (žr. 10 pav.). Santykinis dydis (I), parodantis šio reiškinio intensyvumą, gali būti apskaičiuojamas pagal formulę [21]:

$$I = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho} \quad (1.3.4.1)$$

čia: Δm – bandinio masės pokytis;

A – panardinto paviršiaus plotas;

ρ – vandens tankis.



10 pav. Schematiška bandymo sistema, atliekant kapiliarinio vandens patraukimo bandymą [21]

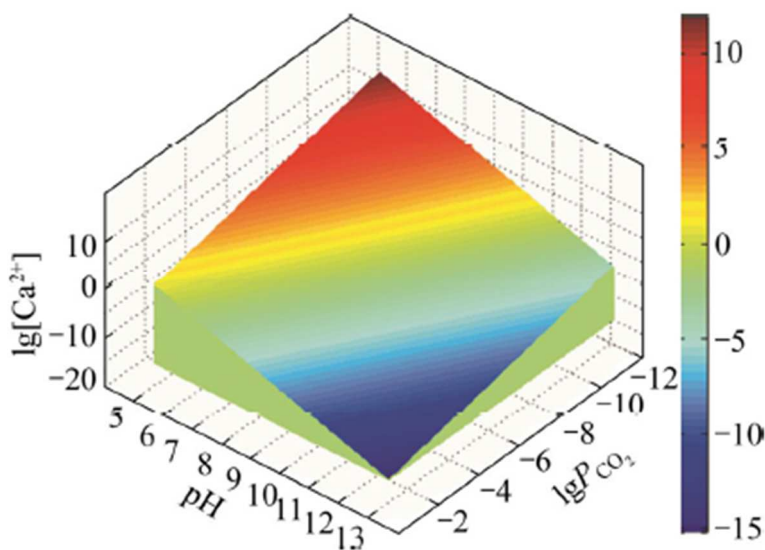
1.4. Aplinkos sąlygų įtaka atsinaujinimui, paremtam mineraliniais priedais

T. Chandra Sekhara Reddy ir A. Ravitheja [7] savo darbe tyrė aplinkos drėgmės įtaką betono su kristaliniiais priedais savaiminiam atsinaujinimui. Remiantis šiuo darbu galima daryti išvadą, jog savaiminis betono atsinaujinimas yra efektyvesnis kai bandiniai nuolat laikomi vandenyje bei

bandinius cikliška laikant vandenyje ir ore. Šiomis sąlygomis laikomi bandiniai po 42 parų buvo visiškai atsinaujinę, kai tuo tarpu ore bei tik dalinai vandenyje laikomų bandinių plyšio užsivėrimas buvo tik dalinis.

M. Roig-Flores ir kitų [24] atliktame moksliniame tyrime taip pat buvo vertinta aplinkos drėgmės įtaka savaiminiam betono su kristaliniais priedais atsinaujinimui, o gauti rezultatai detalizuoja T. Chandra Sekhara Reddy ir A. Ravitheja tyrimo išvadas. Šio tyrimo metu nustatyta, jog didesnis atsinaujinimo efektyvumas pasiektas bandinius nuolat laikant vandenyje, nei cikliška vandenyje ir ore. Be to, nustatyta, jog vandens temperatūra taip pat turi įtakos betono atsinaujinimui. Bandiniai laikyti aukštesnės temperatūros vandenyje (30 °C) pasiekė didesnę atsinaujinimo laipsnį po 42 dienų, lyginant su bandiniu, laikytu žemesnės temperatūros vandenyje (15 °C).

Z. Yuan'as ir kiti [12] savo moksliniame darbe tyre kalcio jonų, pH bei dalinio anglies dioksido slėgio tarpusavio ryšį kalcio karbonato susidarymui. Šio tyrimo metu buvo tirtos cementinio pagrindo medžiagos su mineraliniais priedais. Iš diagramos (žr. 11 pav.) matyti, jog didėjant pH bei daliniam anglies dioksido slėgiui, mažėja kalcio jonų, reikalingų kalcio karbonato susidarymui, koncentracija. Atlikus analizę nustatyta, jog plyšį užpildančios medžiagos susidarymui didesnę įtaką turi pH nei dalinis anglies dioksido slėgis. Kitaip tariant, kalcio karbonato kiekis įtrūkime labiausiai priklauso nuo pH lygio ir yra didžiausias esant optimaliai $pH \approx 9$ šarminėi aplinkai.



11 pav. Ryšys tarp Ca^{2+} jonų kiekio, pH ir dalinio CO_2 slėgio [12]

1.5. Plėtriujų kristalų susidarymo galimybės savaiminio betono atsinaujinimo efektui pasiekti

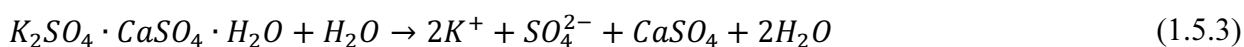
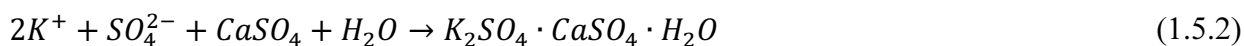
Singenito kristalai

Gipsas – tai medžiaga, kurią veikiant skirtingomis temperatūromis gaunamos skirtingų savybių medžiagos atmainos, kurios yra paremtos skirtingu vandens kiekiu cheminėje medžiagos struktūroje. Dėl šios priežasties gipso naudojimas gali būti pritaikomas įvairiose pramonės srityse [27]. Pastaruoju metu didelis dėmesys skiriamas bevandenio gipso – anhidrito ($CaSO_4$) tyrimams. Sumaišius anhidritą bei vandenį vyksta reakcija, kurios metu gaunamas įprastas statybinis gipsas – kalcio sulfato dihidratas ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) [27]:



Ši reakcija vyksta labai lėtai, todėl dažnai naudojami tam tikri aktyvatoriai, dėl kurių anhidrito hidratacija ženkliai paspartėja, o stiprumas padidėja. Kaip aktyvatoriai daugiausia naudojami metalų sulfatai, kurie, reaguodami su kalcio sulfatu, sudaro dvigubas druskas [27]. Susiformavę mineralai betono struktūroje gali veikti kaip poras užkemšantis produktas arba plyšį užtaisanti medžiaga [28].

Atlikti moksliniai tyrimai parodė, jog normaliomis sąlygomis efektyviausiai formuojasi singenito mineralai, kurie susidaro anhidritui reaguojant su kalio sulfatu (K_2SO_4) [28]. Didesnės koncentracijos K_2SO_4 tirpalas greitai sąveikauja su $CaSO_4$ sudarydami dvigubą druską, kuri iškrita nuosėdų pavidalu, o vėliau suyra dihidratuodama. Singenito susidarymas bei irimas aprašomas cheminėmis formulėmis [27]:

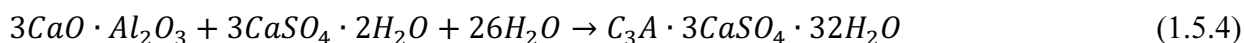
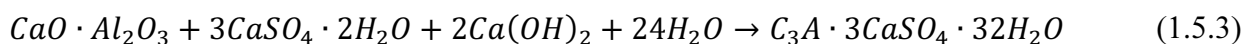


Dvigubos druskos – singenito – susidarymas ir skaidymasis tęsiasi tol, kol didžioji dalis anhidrito virsta dihidratu. Tačiau, kai susidariusio singenito kiekis viršija tam tikrą optimalią vertę, jis nusėda ir tampa stabilus [27].

Etringito kristalai

Cemento tešla, o kartu ir betonas, kietėdama mažina savo tūrį. Tam tikromis aplinkybėmis šis tūrio sumažėjimas gali iššaukti labai žalingą betono pleišėjimą. Siekiant kompensuoti betono traukimąsi, betono sudėtyje naudojami įvairūs priedai, kurie reaguodami sudaro plėtrius ir mažai tirpius junginius betono struktūroje [29]. O būtent plėtrių junginių susidarymo mechanizmu atsivėrusiame plyšyje gali būti pagrįstas efektyvus betono atsinaujinimas.

Tam, kad būtų sumažintos betono susitraukimo deformacijos, betono sudėtyje naudojamas kalcio aliuminatinis cementas (CAC) bei kalcio sulfoaliuminatinis cementas (CSC). Naudojant šiuos priedus, cementinėse sistemose susidaro plėtrus junginys – etringitas, kuris ir kompensuoja betono traukimąsi. Priešingai nei kalcio sulfoaliuminatinis cementas, kalcio aliuminatinis cementas hidratacijos metu negali sudaryti etringito. Dėl šios priežasties, CAC paprastai naudojamas kartu su kalcio sulfatu arba portlandcementu kaip dvinarė cementinė sistema, arba trinarė cementinė sistema, panaudojant visas tris minėtas medžiagas [30]. Etringito susidarymas minėtose cementinėse sistemose gali būti aprašytas cheminėmis formulėmis [30]:



Kalcio sulfato kiekis bei tipas turi didelę įtaką hidratacijos produktų formavimuisi [30]. Cementinėse sistemose, kuriose naudojamas kalcio sulfato hemihidratas ($CaSO_4 \cdot H_2O$), didesnis etringito kiekis susidaro ankstyvojoje kietėjimo stadijoje, o tai pagrįsta geresniu šios medžiagos tirpumu. Tuo tarpu anhidritas ($CaSO_4$) hidratuoja lėčiau, kartu sumažindamas susidariusio ankstyvojo etringito kiekį, o tai nulemia didesnį medžiagos stiprumą esant žemai temperatūrai (0-10 °C) [30].

S. Allevi ir kitų [31] atliktame tyrime nustatyta, jog cementinėje sistemoje naudojant gipsą ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), jau pirmąją hidratacijos valandą cemento matricoje susidaro tankus mažų etringito kristalų

tinklas, tuo tarpu naudojant anhidritą pastebima tvarkingesnė kristalų struktūra. S. Zhang'o ir kitų [30] mokslininkų atlikti tyrimai taip pat nustatė, jog tankesnė kristalų struktūra gaunama sistemoje, kurioje naudotas kalcio sulfato dihidratas, tuo tarpu naudojant etringitą bei hemihidratą gautų kristalų išvaizda gana panaši.

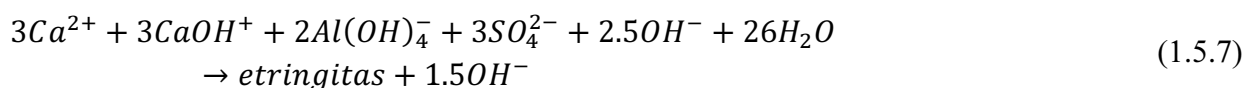
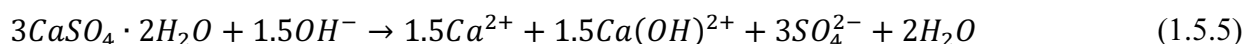
Taip pat, esant kalcio aliuminatinio cemento pertekliui sistemoje, šis reaguoja su susiformavusiu etringitu ir medžiagoje gali susidaryti monosulfoaluminatas, o šis junginys savo ruožtu padidina betono poringumą [30].

Vis dėlto, minėtų naudojamų medžiagų kiekis betono sudėtyje turi būti ribojamas, nes susidaręs didelis etringito mineralo kiekis betono struktūroje gali ženkliai sumažinti betono stiprį [29].

Pasak Yohannes L. Yaphary ir kitų [32] trietalonaminas (TEA) yra plačiausiai naudojama cheminė medžiaga, kuri, naudojama kaip priedas, gali reguliuoti cemento hidratacijos proceso laiką. Trietalonaminas savyje neturi šarmų bei chloridų, o iš dalies nedidelis medžiagos kiekis reikalingas norimam efektui pasiekti užtikrina efektyvų medžiagos pritaikomumą betono konstrukcijų gamyboje. Unikali šios medžiagos savybė ta, jog trietalonaminas gali tiek pagreitinti, tiek sulėtinti cemento hidrataciją bei cemento kietėjimo pradžią, priklausomai nuo naudojamo medžiagos kiekio.

Naudojant vis didesnę trietalonamino kiekį betono mišinyje, trikalčio silikato (alito) ($C_3S, 3CaO \cdot SiO_2$) hidratacija cemento struktūroje lėtėja. Dėl šios priežasties, santykinai didelis trietalonamino kiekis, gali turėti didelę įtaką betono stiprio sumažėjimui ankstyvame amžiuje. Kita vertus, didinant trietalonamino kiekį ženkliai spartinama trikalčio aluminato ($C_3A, 3CaO \cdot Al_2O_3$) hidratacija, o tai lemia etringito mineralo susidarymą betono struktūroje [33]. Tačiau greitesnė C_3A hidratacija gali kompensuoti poveikį, atsiradusį dėl sulėtėjusios C_3S hidratacijos [32].

Cemento hidratacijos pradžioje, vyksta cheminės reakcijos, kurių metu pagrindė reaguoja trikalčio aluminatas bei gipsas. Gipsas skyla ir, remiantis (1.5.5) lygtimi, išlaisvina Ca^{2+} bei SO_4^{2-} jonus. Tuo tarpu trikalčio aluminatas išlaisvina $Al(OH)_4^-$ bei OH^- jonus ((1.5.6) lygtis). Sureagavus iširpusiems jonams, susiformuoja etringito kristalai, kurių cheminė formulė $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$ ((1.5.7) lygtis) [32]:



Apibendrinant atliktą literatūros analizę galima teigti, jog tam, kad įvyktų pilnas betone esančio plyšio užsivėrimas, gali būti apibrėžiamos būtinos aplinkos sąlygos, atitinkamos betono sudėtyje esančios cheminės medžiagos bei santykinai nedidelis plyšio plotis. Taip pat pastebėta, jog daugiausia tyrimų atliekama vertinant kompleksinį įvairių priedų poveikį nelygaus plyšio atsinaujinimo efektyvumui. Vis dėlto, nors betono atsinaujinimo efektas ir yra gana plačiai tiriamas, pagrindinė problema lieka ta, jog betono atsinaujinimo efektyvumo vertinimas vis dar nėra standartizuotas, t. y., nėra sukurta metodika, užtikrinanti atliekamų tyrimų rezultatų vertinimo vienodumą.

2. Tyrimų metodologija

2.1. Kristalinių priedų parinkimas ir savaiminio atsinaujinimo efektyvumo vertinimas cementinėse sistemose

Ši tiriamojo darbo dalis gali būti skirstoma į du etapus. Pirmajame etape tiriami cementinės tešlos bandiniai su rinkoje parduodamais atsinaujinimą skatinančiais priedais, bandinius laikant skirtingomis aplinkos sąlygomis. Antrojo tiriamojo darbo etapo metu tiriami cementinės tešlos bandiniai su malto amorfinio silicio dioksido, kalcio stearato bei natrio alginato priedais, bandinius laikant nuolat pamerkтус vandenyje, bei cikliškai laikant vandenyje bei ore.

2.1.1. Bandinių sudėtis ir gamyba

Pirmajame šios tiriamosios dalies etape pagaminti trijų sudėčių bandiniai. Pirmosios grupės bandiniai kontroliniai, t. y., jiems pagaminti naudojamas tik CEM I 42,5N klasės cementas bei vanduo. Antrosios ir trečiosios grupės bandiniai pagaminti su skirtingais rinkoje parduodamais mineraliniais atsinaujinimą skatinančiais priedais, kurių pavadinimai koduoti „B“ ir „S“ raidėmis. Priedo kiekis panaudotas bandinių gamyboje – 2 % nuo cemento masės. Kiekvienai grupei bandinių pagaminta po tris bandinius.

2 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai pirmojo etapo cementinės tešlos bandinių sudėtyse

	Bandinių sudėtis K	Bandinių sudėtis B	Bandinių sudėtis S
Cementas (kg/m ³)	1606,0	1573,9	1573,9
Vanduo (kg/m ³)	482,0	482,0	482,0
V/C	0,3	0,3	0,3
Priedas „B“ (kg/m ³)	-	32,1	-
Priedas „S“ (kg/m ³)	-	-	32,1
Priedas/C (%)	-	2,0	2,0



12 pav. Pirmojo eksperimentinės dalies etapo bandiniai

Antrajame šios eksperimentinės dalies etape pagaminti penkių sudėčių bandiniai. T. y., keturių kontrolinių bandinių grupė, keturių bandinių grupė su pirmajame šios eksperimentinės dalies etape naudotu komerciniu mineraliniu priedu „S“, trijų bandinių grupė su kalcio stearato priedu, trijų bandinių grupė su amorfinio silicio dioksido priedu bei trijų bandinių grupė, kuriuose 2 % cemento masės pakeista kalcio stearato, amorfinio silicio dioksido bei parafinuoto natrio alginato mišiniu. Bandinių gamybai naudotas CEM I 42,5 R klasės cementas.

3 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai antrojo etapo cementinės tešlos bandinių sudėtyse

	Bandinių sudėtis I	Bandinių sudėtis II	Bandinių sudėtis III	Bandinių sudėtis VI	Bandinių sudėtis V
Cementas (kg/m ³)	1606,0	1573,9	1573,9	1573,9	1573,9
Vanduo (kg/m ³)	482,0	482,0	482,0	482,0	482,0
V/C	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Priedas „S“ (kg/m ³)	-	32,1	-	-	-
Kalcio stearatas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	32,1	-	10,4 / 32,4%
Amorfinis silicio dioksidas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	32,1	13,4 / 41,7%
Natrio alginatas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	-	7,5 / 23,4%
Parafinas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	-	0,8 / 2,5%
Priedas/C (%)	-	2,0	2,0	2,0	2,0



13 pav. Antrojo etapo bandinių gamyboje naudotos medžiagos. Iš kairės: kalcio stearatas, maltas amorfinis silicio dioksidas ir natrio alginatas

Siekiant išvengti staigaus polimerinės medžiagos, t. y., natrio alginato vandens įgėrio bandinių gamybos metu, pirmiausia natrio alginatas buvo parafinuotas. Šiam tikslui pasiekti, atitinkamas kiekis parafino buvo ištirpintas nefraso tirpiklyje bei sumaišytas su maltu natrio alginatu. Išgarinus nefraso

tirpiklį gauti parafinu dengti natrio alginato milteliai, kurie kaip priedas buvo naudojami V sudėties bandinių gamyboje.

2.1.2. Plyšių sudarymo metodai

Plyšiai cilindro formos bandiniuose suformuoti bandinius skeliant. Plyšio atvėrimui naudotas hidraulinis presas, apkraunant bandinius tol, kol jame atsiveria plyšys. Tam, kad veikianti jėga būtų koncentruota, tarp presų plokštės ir bandinio įdėtas metalinis strypas. Siekiant išvengti visiško bandinio suirimo bei didesnių pažeidimų, prieš skėlimą bandiniai apklijuojami lipnia juosta.



14 pav. Plyšio suformavimas skėlimo metodu

Antrajame eksperimentinės dalies etape po vieną I bei II sudėčių bandinį buvo perpjauti pjūklų, taip siekiant suformuoti lygų plyšį. Bandiniai perpjauti norint ištirti, ar lygiame ir pastovaus pločio plyšyje gali būti pastebėtas savaiminis plyšio užsitaismas. Vienodas plyšio plotis visame bandinio ilgyje užtikrintas dviejose plyšio vietose įterpus 0,125 mm diametro vielą.



15 pav. Perpjautų bandinių plyšio paviršius

2.1.3. Bandinių laikymo aplinkos sąlygos

Pirmajame šios eksperimentinės dalies etape, kiekvienos grupės bandiniai buvo laikomi skirtingomis aplinkos sąlygomis:

- nuolat laikant vandenyje;
- cikliškai (kas 24 valandas) laikant vandenyje bei ore;
- dalinai pamerkti vandenyje, norint pasiekti kapiliarinį vandens patraukimą plyšyje.

Bandiniai nuolat bei cikliškai laikomi vandenyje merkami taip, jog plyšio padėtis būtų vertikali, tuo tarpu dalinai pamerkti bandiniai laikomi taip, jog plyšio išilginė ašis būtų horizontali. Dalinai pamerkti bandiniai merkami taip, jog vanduo apsemtų 1 cm bandinio aukščio.

Antrojo eksperimentinės dalies etapo metu, kiekvienos sudėties bandiniai laikyti dviem aplinkos sąlygomis:

- nuolat laikant vandenyje;
- cikliškai (kas 24 valandas) laikant vandenyje bei ore.

Du iš trijų kiekvienos grupės bandinių 28 paras laikyti nuolat pamerkti į vandenį, tuo tarpu cikliškai į vandenį buvo merkiama po vieną kiekvienos sudėties bandinį. Siekiant efektyviausio galimo plyšio užsivėrimo, perpjauti bandiniai buvo laikyti nuolat pamerkti į vandenį.

2.1.4. Plyšių užsivėrimo efektyvumo vertinimo metodas matuojant plyšio plotį

Plyšio užsivėrimo laipsnis cementinėse sistemose pirmiausia vertintas remiantis pradiniu ir galutiniu plyšio plotiu, po atitinkamo laiko periodo. Kiekviename bandinyje plyšio plotis pamatuotas trijose pozicijose. Dalinai pamerktuose bandiniuose plyšio plotis matuotas abiejuose bandinio paviršiuose. Atsinaujinimo efektyvumas vertinamas plyšio užsivėrimo rodikliu, kuris kiekvienu atveju apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\text{užsivėrimo rodiklis} = 1 - \frac{w_t}{w_0} \llcorner 0 \quad (2.1.1)$$

čia: w_t – plyšio plotis po atitinkamo laiko periodo;

w_0 – pradinis plyšio plotis.

2.1.5. Plyšių užsivėrimo efektyvumo vertinimas vandens pralaidumo metodu

Siekiant įvertinti plyšio užsivėrimo laipsnį bandiniuose, kuriuose naudoti amorfinio silicio dioksido, kalcio stearato bei natrio alginato priedai, buvo atliktas vandens pralaidumo bandymas. Bandymo metu vertintas pro plyšį prabėgusio vandens kiekio sumažėjimas bėgant laikui.

Ant viršutinio kiekvieno bandinio paviršiaus pritvirtinamas PVC vamzdis, bei, silikono pagalba, užsandarinami plyšio kraštai visame bandinio aukštyje, taip užtikrinant, jog vanduo bandymo metu tekės tik plyšiu.

Į vamzdį įpilama 1000 g vandens ir po 30 minučių matuojama likusio, plyšiu neištekęsio vandens masė. Vandens pralaidumas plyšyje įvertinamas vandens stulpo aukščio pokyčiu vamzdyje.

Atsinaujinimo efektyvumas per 28 paras įvertinamas remiantis pradiniu bet galutiniu vandens pralaidumu plyšyje ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$užsivėrimo\ rodiklis = 1 - \frac{\Delta h_t}{\Delta h_0} \neq 0 \quad (2.1.2)$$

čia: Δh_t – vandens pralaidumas plyšiu po atitinkamo laiko periodo;

Δh_0 – pradinis vandens pralaidumas plyšiu.



16 pav. Cementinės tešlos bandinių vandens pralaidumo bandymas

2.1.6. Cementinės tešlos bandinių vandens įgeriamumo kinetika

Siekiant nustatyti cementinės tešlos bandinių bendrą, atvirą bei uždarą poringumą atliktas vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas.

Pirmiausia, iš esamų cilindrinų bandinių išpjaunami 40x40x40 mm kubeliai. Bandiniai pilnai išdžiovinami ventiliuojamoje džiovykloje. Pasvėrus sausus bandinius, jie merkami į vandenį ir pakartotinai sveriami po 15 min, 1 valandos, 1 paros (24 valandų) bei po 5 parų (120 valandų). Po 5 parų bandiniai pasverti ir vandenyje. Remiantis GOST 12730.4-78 [34] standartu, sudaroma bandinių vandens įgeriamumo kinetika ir apskaičiuojami poringumo parametrai.

Bandinio vandens įgėris pagal masę apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_M = \frac{m_{120} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.1.3)$$

čia: m_{120} – bandinio masė po 120 valandų mirkymo, g ;

m_s – sauso bandinio masė, g .

Tankis apskaičiuojamas:

$$\rho = \frac{m_s}{m_{120} - m_v} \cdot 1000, \text{ kg/m}^3 \quad (2.1.4)$$

čia: m_s – sauso bandinio masė, g ;

m_{120} – bandinio masė po 120 valandų mirkymo, g ;

m_v – bandinio masė vandenyje po 120 valandų mirkymo, g .

Vandens įgėris pagal tūrį:

$$W_0 = W_M \cdot \frac{\rho}{1000}, \% \quad (2.1.5)$$

čia: W_M – vandens įgėris pagal masę, %;

ρ – bandinio tankis, kg/m^3 .

Vandens įgėris po 15 min apskaičiuojamas:

$$W_{t1} = \frac{m_{15} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.1.6)$$

čia: m_{15} – bandinio masė po 15 minučių mirkymo, g ;

m_s – sauso bandinio masė, g .

Vandens įgėris po 60 min apskaičiuojamas:

$$W_{t2} = \frac{m_{60} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.1.7)$$

čia: m_{60} – bandinio masė po 60 minučių mirkymo, g ;

m_s – sauso bandinio masė, g .

Santykis:

$$W'_{t1} = \frac{W_{t1}}{W_M} \quad (2.1.8)$$

čia: W_{t1} – vandens įgėris po 15 minučių, %;

W_M – vandens įgėris pagal masę, %.

Santykis:

$$W'_{t2} = \frac{W_{t2}}{W_M} \quad (2.1.9)$$

čia: W_{t2} – vandens įgėris po 60 minučių, %;

W_M – vandens įgėris pagal masę, %.

Naudojantis standarte GOST 12730.4-78 [34] pateikta monograma, pagal gautas W'_{t1} ir W'_{t2} reikšmes nustatomas atvirų porų vienodumo rodiklis - α bei porų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis - $\overline{\lambda}_1$. Atvirų vidutinio dydžio porų rodiklis apskaičiuojamas:

$$\bar{\lambda} = \alpha \sqrt{\overline{\lambda}_1} \quad (2.1.10)$$

čia: α – atvirų porų vienodumo rodiklis;

$\overline{\lambda}_1$ – porų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis.

Bendras bandinio poringumas apskaičiuojamas:

$$P_p = \left(1 - \frac{\rho}{2690}\right) \cdot 100, \% \quad (2.1.11)$$

čia: ρ – bandinio tankis, kg/m^3 .

Atviras bandinio poringumas lygus vandens įgėriui pagal tūrį:

$$P_a = W_0 = W_M \cdot \frac{\rho}{1000}, \% \quad (2.1.12)$$

čia: W_0 - vandens įgėris pagal tūrį, %;

W_M – vandens įgėris pagal masę, %;

ρ – bandinio tankis, kg/m^3 .

Uždaras poringumas apskaičiuojamas:

$$P_u = P_p - P_a, \% \quad (2.1.13)$$

čia: P_p – bandinio bendras poringumas, %;

P_a – bandinio atviras poringumas, %.

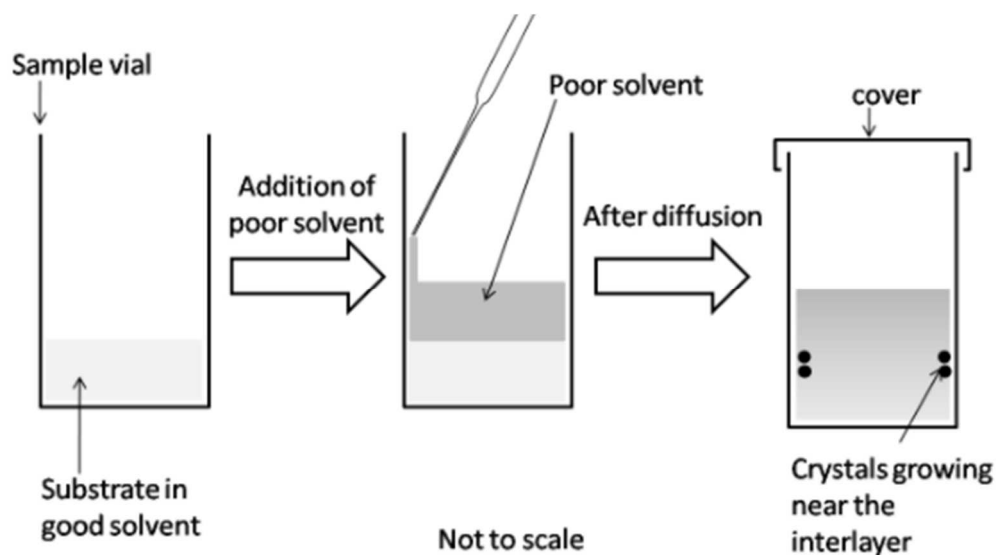
2.2. Kristalų susidarymas medžiagų vandeniniuose tirpaluose taikant priešpriešinės difuzijos metodą

Siekiant išgauti plyšį betone galinčių užtaisyti kristalų susidarymą vandeninių tirpalų sistemose, taikomas medžiagų difuzijos tarp dviejų susisiejančių tirpalų metodas, literatūroje dar vadinamu priešpriešinės difuzijos metodu [35].

Indas su atitinkamu kiekiu medžiagos užpilamas vandeniu, vėliau į jį atsargiai panardinamas mažesnis indas su atitinkamu kiekiu kitos medžiagos, kuris taip pat papildomas vandens taip, jog dviejų medžiagų tirpalų sandūroje būtų minimalus kiekis vandens. Laikui bėgant induose susidaro sotieji medžiagų tirpalai, kurie susimaišo, o jų sandūroje, tikėtina, kristalizuojasi reakcijos produktas. Sudarius bandymo sistemas su skirtingų medžiagų tirpalais, indai sandariai uždaromi ir laikomi 28 paras.

Bandymo metu naudotos medžiagos:

- CEM 42,5R klasės cementas;
- Kalcio oksidas (CaO);
- Amorfinis silicio dioksidas (SiO₂);
- Komercinis mineralinis betono atsinaujinimą skatinantis priedas „S“;
- Komercinis mineralinis betono atsinaujinimą skatinantis priedas „B“.



17 pav. Principinė bandymo sistema, atliekant kristalų auginimo dviejų tirpalų sandūroje bandymą [36]

4 lentelė. Kristalų gavimui naudotų medžiagų kiekiai vandeninių tirpalų sandūroje

Sistemos nr.	Medžiagos kiekis vandeniniame tirpale g / 100 ml	
	Sistemos apačioje	Sistemos viršuje
1	CEM – 0,7 g / 100 ml	CaO - 0,4 g / 100 ml + SiO ₂ – 0,8 g / 100 ml
2	Priedas „S“ – 0,7 g / 100 ml	CaO – 0,4 g / 100 ml
3	CEM – 0,7 g / 100 ml	Priedas „S“ – 0,4 g / 100 ml
4	CEM – 0,7 g / 100 ml	CaO – 0,4 g / 100 ml
5	CEM – 0,7 g / 100 ml	Priedas „B“ – 0,4 g / 100 ml
6	Priedas „B“ – 0,7 g / 100 ml	CaO – 0,4 g / 100 ml



18 pav. Bandymo sistemos, atliekant kristalų auginimo dviejų tirpalų sandūroje bandymą

2.3. Kristalinių priedų parinkimas ir savaiminio atsinaujinimo efektyvumo vertinimas betoninėse sistemose

Šios eksperimentinės darbo dalies metu tirta įvairių priedų įtaka savaiminiam plyšio užsivėrimui betono bandiniuose, kai plyšys suformuotas bandinį skeliant. Taip pat, išbandyta nauja galima plyšio užsivėrimo efektyvumo vertinimo metodika, lygiame plyšyje panaudojant vandenį plyšyje užlaikančias priemones.

2.3.1. Bandinių sudėtis ir gamyba

Šios darbo dalies metu pagaminti šešių sudėčių betono bandiniai. Pirmos sudėties bandiniai – kontroliniai. Jų gamyboje naudotas CEM 42,5R klasės cementas, smulkus užpildas – smėlis (0-4 mm frakcijos), stambus dolomito skaldos užpildas (4-16 mm frakcijos), superplastiklis Sika ViscoCrete D-187 bei vanduo. Visose bandinių sudėtyse panaudotas superplastiklio kiekis – 1 % nuo cemento masės. Visų sudėčių bandiniai gaminti naudojant vienodas pagrindines betono mišinio sudedamąsias dalis bei atitinkamus priedus.

Antros sudėties bandinių gamybos metu, 2 % cemento masės pakeista komerciniu mineraliniu atsinaujinimą skatinančiu priedu „S“.

Trečioje sudėtyje kaip priedas naudotos cheminės reakcijos metu gautos medžiagos. Šiam tikslui pasiekti, dviejų medžiagų, t. y., valgomosios sodos ($NaHCO_3$) ir kalcio chlorido ($CaCl_2$), sotieji tirpalai sumaišyti maltame amorfiniame silicio dioksido (SiO_2). Vykstanti medžiagų mainų reakcija:



Atsižvelgiant į medžiagos tirpumą vandenyje pirmiausia pagamintas valgomosios sodos ($NaHCO_3$) vandeninis tirpalas, kuris buvo sumaišytas su atitinkamu kiekiu malto amorfinio silicio dioksido. Po to, kai poringa medžiaga – SiO_2 – sugėrė valgomosios sodos tirpalą, į mišinį įmaišytas sotusis kalcio chlorido tirpalas siekiant, kad cheminė reakcija įvyktų ir reakcijos produktai susidarytų malto amorfinio silicio dioksido viduje.

Priedo gamybos metu pastebėta, jog reakcijos metu išsiskiria dujos, tai reiškia, jog dalis gauto kalcio bikarbonato skyla ir vyksta reakcija:



Bandinių gamybos metu, į betono mišinį dėtas toks priedo kiekis, jog 2 % cemento masės būtų pakeista reakcijos metu susidariusių medžiagų mišiniu.

Plyšio atsivėrimo atveju tikimasi, jog amorfinio silicio dioksido grūdėliai skils, o jame esantis nesuskilęs kalcio bikarbonatas reaguodamas sudarys kalcio karbonatą, kuris užtaisys atsivėrusį plyšį, o išsiskyrusios anglies dioksido dujos, reaguodamos su betone esančiu kalcio hidroksidu, dar labiau skatins karbonizaciją. Tuo tarpu priedo mišinio gamybos metu susidariusios kalcio karbonato nuosėdos veiks kaip kristaliniai centrai tolimesniam kristalų susidarymui plyšyje.



19 pav. Valgomosios sodos ($NaHCO_3$) ir kalcio chlorido ($CaCl_2$) tirpalų reakcija maltame amorfiniame silicio dioksido (SiO_2)

Ketvirtojoje betono bandinių sudėtyje, kaip priedas naudotas poringoje medžiagoje – maltame amorfiniame silicio dioksido (SiO_2) – patalpintas trietanolaminas ($C_2H_{15}NO_3$). Naudojant amorfinį silicio dioksidą siekiama užvėlinti trietanolamino veikimą iki plyšio atsivėrimo. Šiuo atveju plyšio užsitaisymas grindžiamas etringito susidarymu plyšyje. Bandinių gamybos metu 2 % cemento masės pakeičiama trietanolamino bei amorfinio silicio dioksido mišiniu.



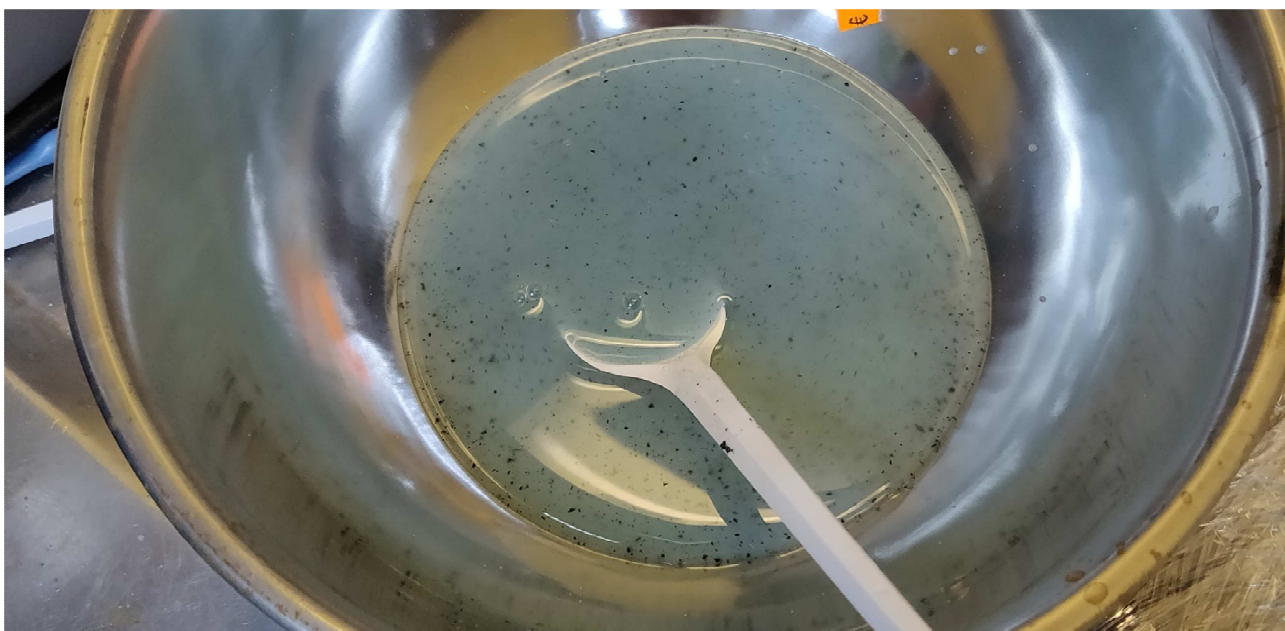
20 pav. Ketvirtoje bandinių sudėtyje naudotos medžiagos. Iš kairės: maltas amorfinis silicio dioksidas; trietanolaminas; dviejų medžiagų mišinys, naudotas bandinių gamybos metu

Penktojoje bandinių sudėtyje naudotas aluminatinis cementas bei anhidritas. Pirmiausia, $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje išdžiovinamas statybinis gipsas ir gaunamas anhidritas ($CaSO_4$) – bevandenis gipsas. Vėliau, atitinkamas kiekis parafino ištirpinamas nefraso tirpiklyje ir sumaišomas su aliuminatinio cemento. Išgarinus tirpiklį gaunami parafinu dengti aliuminatinio cemento milteliai, kurie, lygiomis dalimis su anhidritu, naudojami kaip priedas betono mišinio gamyboje. Priedo kiekis naudotas bandinių gamyboje – 2 % nuo cemento masės. Galimas atsivėrusio plyšio užsitaisymas paremtas plėtraus ir mažai tirpaus etringito susidarymu.

Šeštojoje sudėtyje naudojamas maltame amorfiniame silicio dioksido patalpinto kalio sulfato (K_2SO_4) ir anhidrito – 650 °C temperatūroje išdžiovinto statybinio gipso – mišinys. Kaip kristaliniai centrai betono mišinio sudėtyje naudoti singenito mineralai, kurie sudaryti lygiomis dalimis sumaišius kalio sulfatą (vandeniniame tirpale) bei anhidritą.

Pirmiausia, paruoštas sotus kalio sulfato vandeninis tirpalas, kuris vėliau sumaišytas su atitinkamu kiekiu malto amorfinio silicio dioksido – poringos medžiagos, kuri absorbavo kalio sulfato tirpalą. Džiovinimo krosnyje išgarinus mišinyje esantį vandenį gauti amorfinio silicio dioksido milteliai su viduje esančiu kalio sulfatu. Betono mišinio sudėtyje, be silicio dioksido bei kalio sulfato, naudotas ir atitinkamas kiekis anhidrito, o galimas plyšio užtaisymas paremtas kalio sulfato bei anhidrito reakcijos produkto – singenito mineralo – susidarymu.

Betono mišinio sudėtyje 2 % cemento masės pakeista kalio sulfato, amorfinio silicio dioksido, anhidrito bei singenito mineralo mišiniu.



21 pav. Šeštojoje bandinių sudėtyje naudotas kalio sulfato tirpalo bei amorfinio silicio dioksido mišinys prieš džiovinimą

5 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai betono bandinių sudėtyse

	Bandinių sudėtis I	Bandinių sudėtis II	Bandinių sudėtis III	Bandinių sudėtis IV	Bandinių sudėtis V	Bandinių sudėtis VI
Cementas (kg/m ³)	350,0	343,0	343,0	343,0	343,0	343,0
Stambus užpildas (kg/m ³)	970,0	970,0	970,0	970,0	970,0	970,0
Smulkus užpildas (kg/m ³)	910,0	910,0	910,0	910,0	910,0	910,0
Superplastiklis (kg/m ³)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Vanduo (kg/m ³)	164,5	164,5	174,5	164,5	164,5	164,5
V/C	0,47	0,47	0,50	0,47	0,47	0,47
Priedas „S“ (kg/m ³)	-	7,0	-	-	-	-
Amorfinis silicio dioksidas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	5,6 / 80,6%	2,9 / 41,7%	-	2,7 / 38,6%
Kalcio karbonatas* (kg/m ³)	-	-	1,4 / 19,4%	-	-	-
Trietalonaminas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	4,1 / 58,3%	-	-
Aliuminatinis cementas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	-	3,4 / 49%	-
Anhidritas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	-	3,5 / 50%	3,3 / 47,1%
Parafinas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	-	0,1 / 1%	-
Kalio sulfatas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	-	-	0,7 / 10,0%
Singenitas (kg/m ³ / % dalis priedo mišinyje)	-	-	-	-	-	0,3 / 4,3%
Priedas/C (%)	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

* - kaip priedas naudotas (2.4.1) ir (2.4.2) reakcijų produktų mišinys, t. y., į nuosėdas iškritusio kalcio karbonato, natrio chlorido bei nesuskilusio kalcio bikarbonato mišinys.

2.3.2. Skelto plyšio formavimo metodas

Kiekvienai šio etapo sudėčiai pagaminta po du 150x150x150 mm bandinius, kuriuose plyšiai suformuoti skelimo būdu. Šiam tikslui naudotas hidraulinis presas, o tarp preso plokščių ir bandinio paviršių dedami apvalūs strypai. Bandiniai apkraunami tol, kol skykla pusiau.

Perskeltos bandinių dalys sudedamos kartu ir metalinių plokštelių bei sriegtų strypų pagalba bandinys sutvirtinamas. Sriegti strypai veržiami tol, kol abiejose bandinio plokštumose suformuojamas ~0,3 mm pločio plyšys. Plyšio kraštai užsandarinami silikono pagalba, taip užtikrinant, jog vanduo tekės tik plyšiu.



22 pav. Suformuoti skelto plyšio bandiniai, reikiamą plyšio plotį užtikrinant metalinių plokštelių bei sriegtų strypų pagalba

2.3.3. Lygaus plyšio formavimo metodas

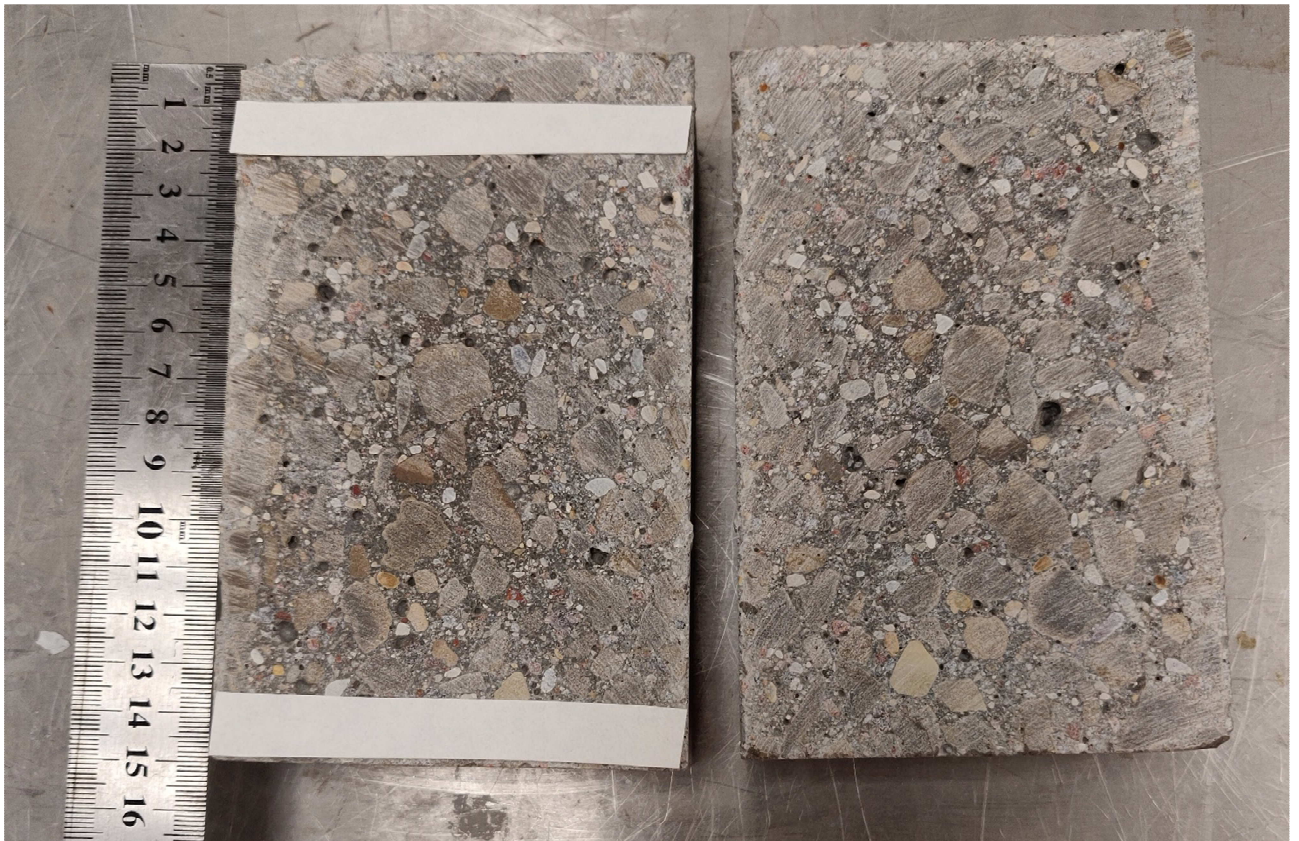
Šiame eksperimentinės dalies etape taip pat pagaminti dviejų sudėčių, t. y., kontrolinės sudėties bei sudėties su komerciniu mineraliniu priedu „S“, prizmės formos bandiniai (100x100x150 mm). Norint suformuoti lygų ir pastovaus pločio plyšį prizmės formos bandiniuose, bandiniai išilgai perpjaunami pjūkle.



23 pav. Lygaus plyšio suformavimas perpjovus prizmės formos bandinius

Siekiant užlaikyti vandenį plyšyje suformuojamos dirbtinės kliūtys, t. y., du 1 cm pločio filtrinio popieriaus ruožai. Bandyme naudojamas grubus filtrinis popierius Filtrak 388 tipo, kurio porų dydis – 8-12 μm , filtravimo greitis – 10 s.

Pirmasis 1 cm pločio ruožas dedamas plyšio apačioje, antrasis – 1 cm atstumu nuo plyšio viršaus.



24 pav. Filtrinio popieriaus pozicija lygiame plyšyje

Atskiros bandinio dalys sudedamos viena ant kitos, o plyšio šonai užsandarinami silikonu.



25 pav. Užsandarinami plyšio kraštai prizmės formos bandiniuose

2.3.4. Atsinaujinimo efektyvumo vertinimas betono bandiniuose taikant vandens pralaidumo metodą

Atsinaujinimo efektyvumas abiejų grupių (skelto bei lygaus plyšio) bandiniuose vertinamas vandens pralaidumo sumažėjimu plyšyje.

Pirmiausia, ant visų bandinių užklijuojami PVC vamzdžiai. Ant skelto plyšio bandinių – Ø105 mm, tuo tarpu ant lygaus plyšio bandinių – Ø45 mm. Vėliau vamzdžiai pripilami vandens ir po atitinkamo laiko periodo matuojama plyšiu pratekėjusio vandens masė.

Atsižvelgiant į vandens tekėjimo plyšiu greitį, pasirinkti skirtingi laiko periodai lygaus ir skelto plyšio bandiniams. Vandens pralaidumas bandiniuose su skeltu plyšiu vertinamas plyšiu prabėgusio vandens kiekiu per 5 minutes, tuo tarpu bandiniuose su lygiu plyšiu prabėgęs vandens kiekis matuojamas po 10 minučių.

Pasvėrus išbėgusio vandens kiekį, apskaičiuojamas vandens stulpo aukščio pokytis, kuris ir yra vertinamas kaip bandinio vandens pralaidumas.

Vandens pralaidumo bandymas kartojamas po 7, 14, 21 ir 28 parų, o plyšio užsivėrimo efektyvumas įvertinamas remiantis pradiniu bei galutiniu vandens pralaidumu plyšyje ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\text{užsivėrimo rodiklis} = 1 - \frac{\Delta h_t}{\Delta h_0} \neq 0 \quad (2.4.1)$$

čia: Δh_t – vandens pralaidumas plyšiu po atitinkamo laiko periodo;

Δh_0 – pradinis vandens pralaidumas plyšiu.



26 pav. Vandens pralaidumo bandymas: kairėje – lygaus plyšio bandinys; dešinėje – skelto plyšio bandinys

2.3.5. Betono bandinių laikymo sąlygos

Lygaus plyšio betono bandiniai 28 paras laikomi ore, periodiškai pripildant vamzdžius vandeniu ir leidžiant jam tekėti plyšiu. Bandiniai su skeltu plyšiu 21 dieną laikyti ore, vamzdžius periodiškai pripildant vandeniu. Tačiau, atsižvelgiant į gaunamus rezultatus, likusias 7 bandymo dienas bandiniai laikomi nuolat pamerkti į vandenį siekiant efektyvesnių plyšių užsitaisymo rezultatų. Visiems vienos grupės (lygaus ar skelto plyšio) bandiniams sudaromos vienodos kietinimo sąlygos, t. y., visuose vienos grupės bandiniuose plyšiu pratekėjusio vandens kiekis buvo vienodas.



27 pav. Bandinių su lygiu plyšiu laikymo sąlygos



28 pav. Bandinių su skeltu plyšiu laikymo sąlygos

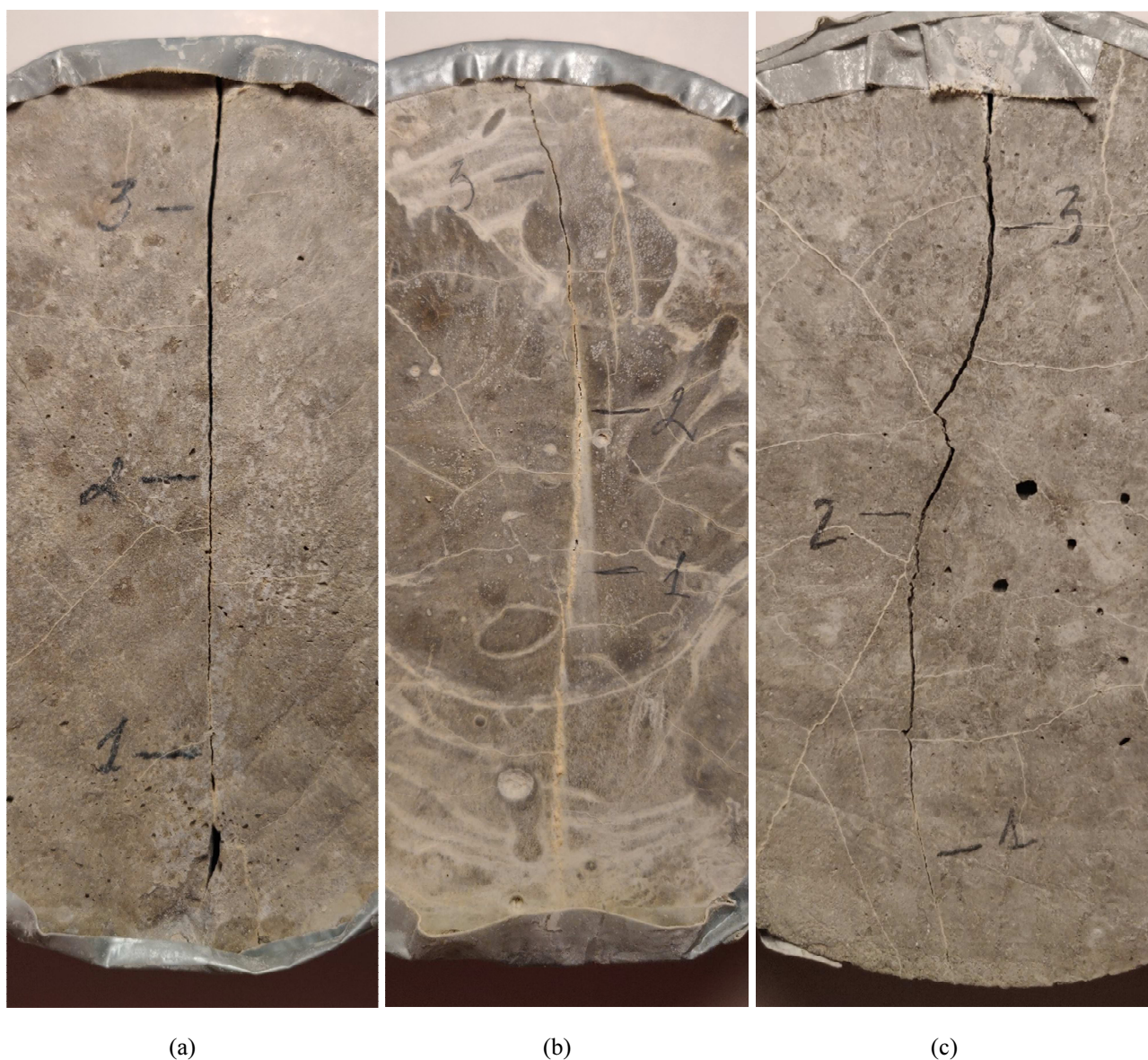
3. Rezultatai

3.1. Plyšio pločio užsivėrimo efektyvumas cementinės tešlos bandiniuose

3.1.1. Bandinių su komerciniais mineraliniais priedais atsinaujinimo efektyvumo vertinimas

Kiekviename cementinės tešlos bandinyje plyšio plotis matuotas trijose pozicijose. Dalinai pamerktuose bandiniuose plyšio plotis matuotas abiejuose bandinio paviršiuose. Pirmą kartą plyšių plotis matuotas iškart po bandinių perskėlimo, antrą kartą – po 83 parų. Po 28 parų, bandiniai cikliška laikomi vandenyje ir ore bei bandiniai dalinai pamerkti į vandenį patikrinti vizualiai, plyšio pločio nematuojant.

Cikliškai vandenyje bei ore laikomuose bandiniuose po 28 pastebimas baltų kristalų susidarymas ant plyšio sienelių.



29 pav. Cikliška vandenyje bei ore laikomų bandinių vaizdas po 28 parų: (a) – K sudėties bandinys; (b) – S sudėties bandinys; (c) – B sudėties bandinys

Kontroliniame bandinyje be priedų, taip pat ir bandinyje su komerciniu mineraliniu priedu „B“, pastebimas nežymus plyšio sumažėjimas ties mažiausiu plyšio pločiu. Tuo tarpu bandinyje su komerciniu priedu „S“ matomas žymus, o vietomis ir visiškas, plyšio užsivėrimas.

Bandiniuose su komerciniais mineraliniais priedais, laikytuose dalinai pamerkus vandenyje, po 28 parų ant vandenyje esančio bandinio paviršiaus matomas kristalų susidarymas ne tik plyšio viduje, tačiau ir išorėje (žr. 30 pav.).



30 pav. Kristalų susidarymas plyšio išorėje dalinai pamerktuose bandiniuose po 28 parų: (a) – B sudėties bandinys; (b) – S sudėties bandinys

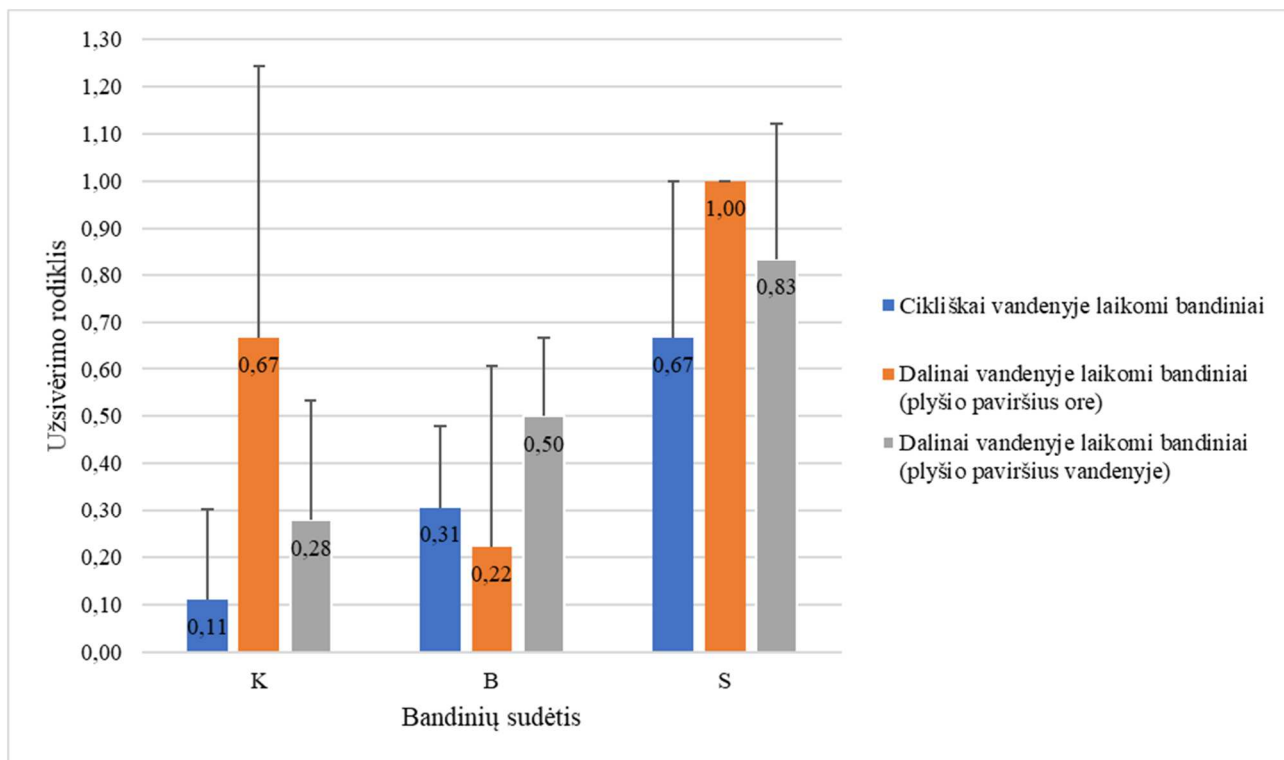
Ore esančiuose bandinių paviršiuose galima pastebėti drėgnus ruožus ties paviršiuje esančiais plyšiais. Tai reiškia, kad vanduo yra kapiliariškai patraukiamas plyšiu. Po 28 parų kristalų susidarymas matomas ir ore esančių plyšių viduje, tačiau tik tuose bandiniuose, kurių sudėtyje yra mineralinių priedų. Kontroliniame bandinyje plyšio pločio pokytis po 28 parų nepastebimas nei ant ore nei ant vandenyje esančių bandinio paviršių.



31 pav. Ore esančio S sudėties bandinio paviršius po 28 parų

Pakartotinai plyšio plotis visuose bandiniuose matuotas po 83 parų. Atsinaujinimo efektyvumas vertinamas plyšio užsivėrimo rodikliu, o gauti rezultatai pateikti 32 paveiksle.

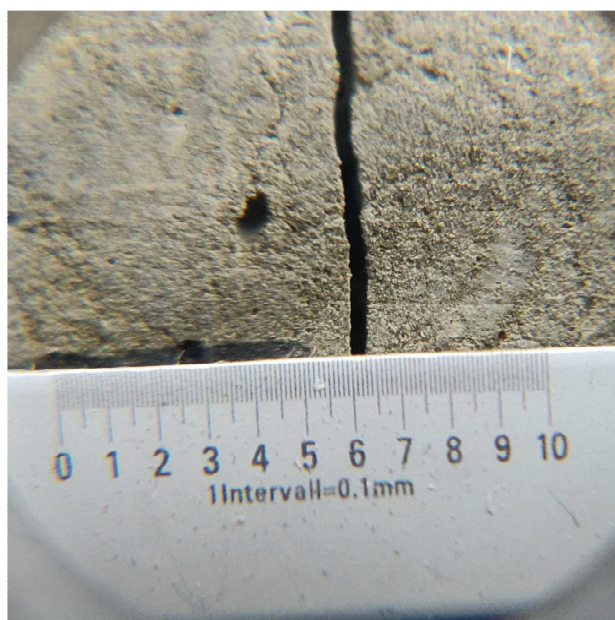
Pilnai vandenyje pamerkūtų bandinių priežiūra ir tarpinis vertinimas nebuvo galimas, o po 83 parų vanduo, kuriame turėjo būti pamerkti bandiniai buvo išgaravęs, todėl plyšio pločio matavimai ir atsinaujinimo efektyvumo skaičiavimai negali būti laikomi patikimais, o bandymas laikomas nepavykusiu. Dėl šios priežasties tolimesnėje analizėje šie duomenys nevertinami.



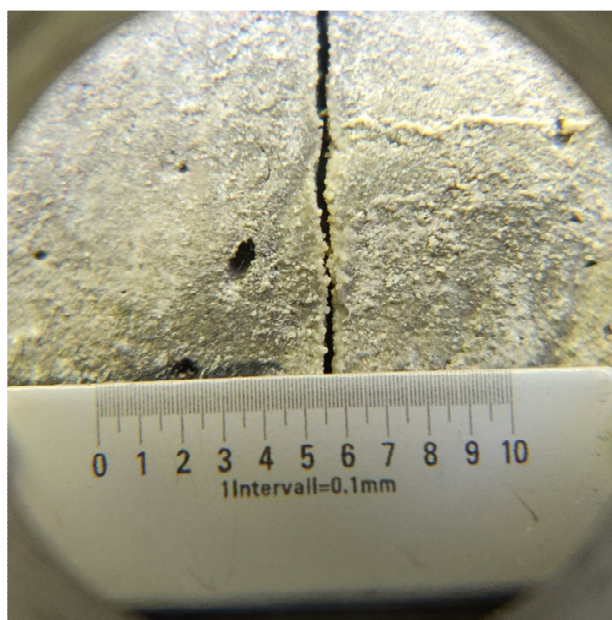
32 pav. Cementinės tešlos bandinių su komerciniais mineraliniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių, apskaičiuotų remiantis plyšio pločio matavimais, palyginimas po 83 parų, bandinius laikant skirtingomis aplinkos sąlygomis

Iš gautų duomenų nustatyta, jog didžiausias užsitaisymo efektyvumas pasiektas S sudėties bandiniuose, kurių sudėtyje yra 2 % komercinio mineralinio priedo, koduoto raide „S“. S grupės bandinyje, laikytame dalinai pamerkus vandenyje, pasiektas visiškas ore esančio plyšio užsitaisymas po 83 parų, remiantis plyšio pločio matavimų rezultatais. Mažiausias plyšio užsivėrimo efektyvumas pasiektas kontroliniame bandinyje, cikliška (kas 24 valandas) laikant bandinį vandenyje bei ore. Nustatyta, jog K bei S sudėčių bandiniai didesnio užsitaisymo efektyvumo pasiekė juos laikant dalinai pamerktus vandenyje nei cikliška laikant vandenyje bei ore, tuo tarpu B sudėties bandinys šiek tiek efektyviau atsinaujino laikomas kintamomis aplinkos sąlygomis. Lyginant dalinai pamerktų bandinių plyšių pločio sumažėjimą abiejuose bandinio paviršiuose pastebima, jog K ir S sudėčių bandiniuose plyšys užsitaisė efektyviau, kai vanduo plyšį pasiekė per kapiliarus. B sudėties bandinyje didesnis užsitaisymo efektyvumas pasiektas plyšyje laikytame vandenyje. Tai galėtų būti paaiškinama per dideliu plyšio pločiu. Dėl šios priežasties, plyšyje esančiame sausame bandinio paviršiuje galėjo būti nepakankamai kapiliariškai patraukto vandens, reikalingo kristalų susidarymui.

Detalūs plyšio pločio matavimų rezultatai pateikti 1 priede. Kai kurių bandinių plyšio vaizdas ką tik perskėlus bandinį bei po 83 parų pateiktas 33-37 paveiksluose.

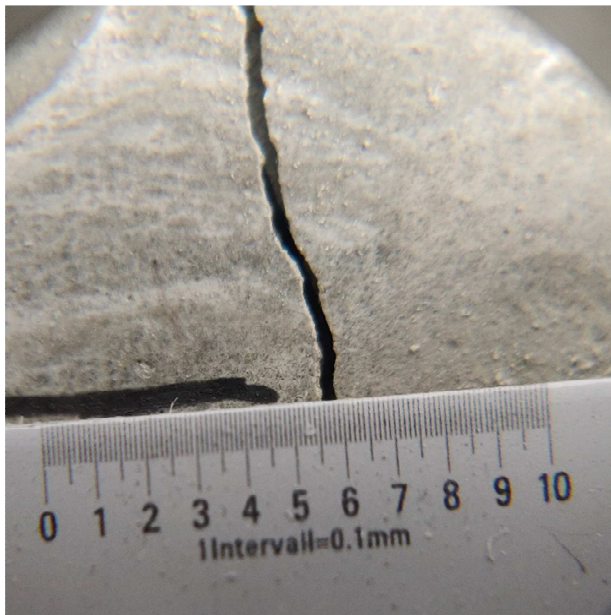


(a)

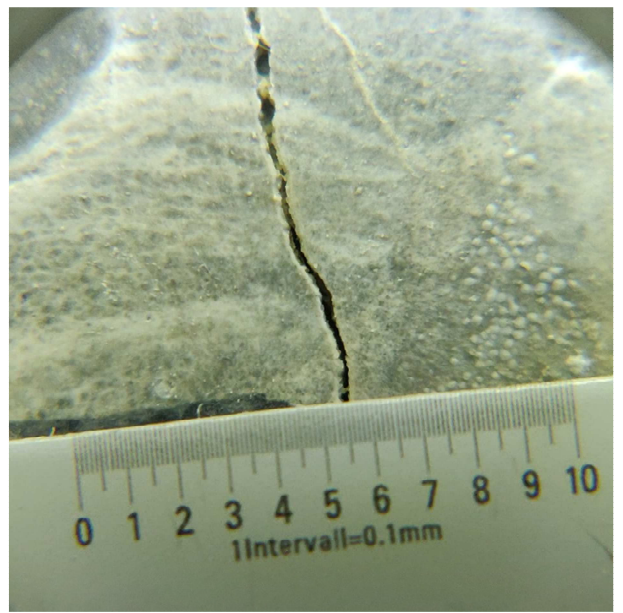


(b)

33 pav. K sudėties bandinys laikomas kintamomis aplinkos sąlygomis. Plyšio pločio nr. 2: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų

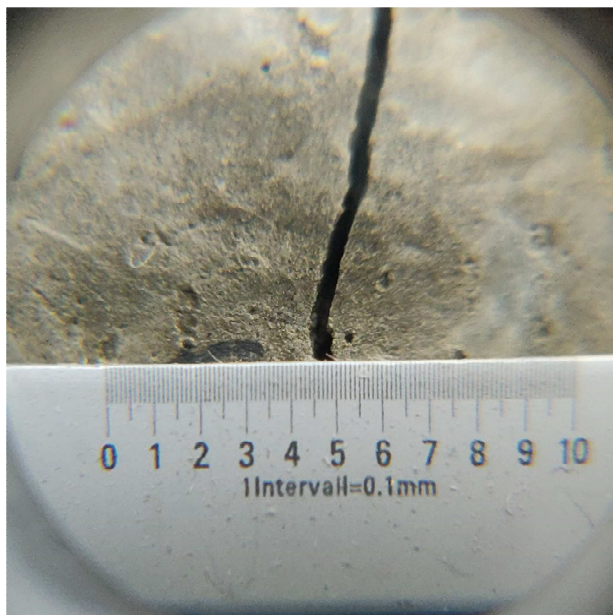


(a)



(b)

34 pav. S sudėties bandinys laikomas kintamomis aplinkos sąlygomis. Plyšio pločio nr. 3: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų



(a)



(b)

35 pav. B sudėties bandinys laikomas kintamomis aplinkos sąlygomis. Plyšio pločio nr. 2: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų

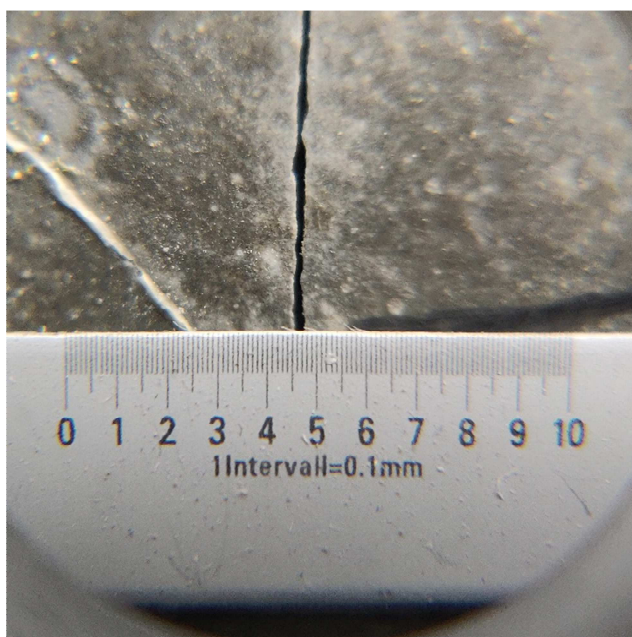


(a)

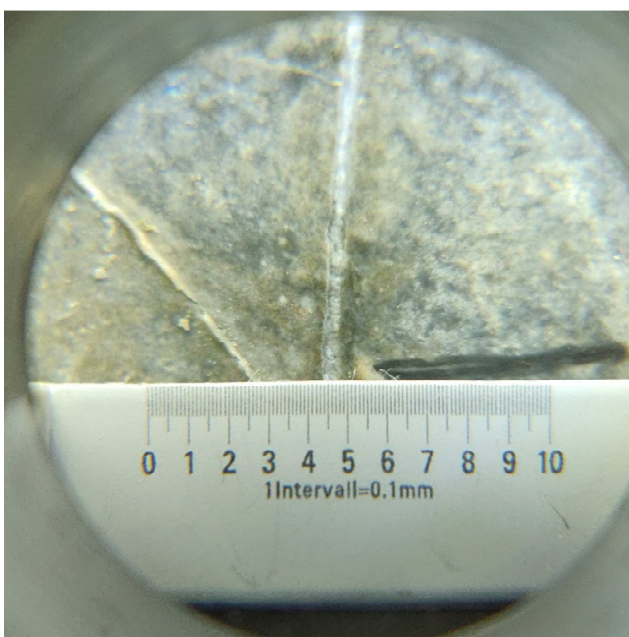


(b)

36 pav. K sudėties bandinys laikomas dalinai pamerktas į vandenį. Plyšio paviršius laikytas ore. Plyšio pločio nr. 1: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų



(a)

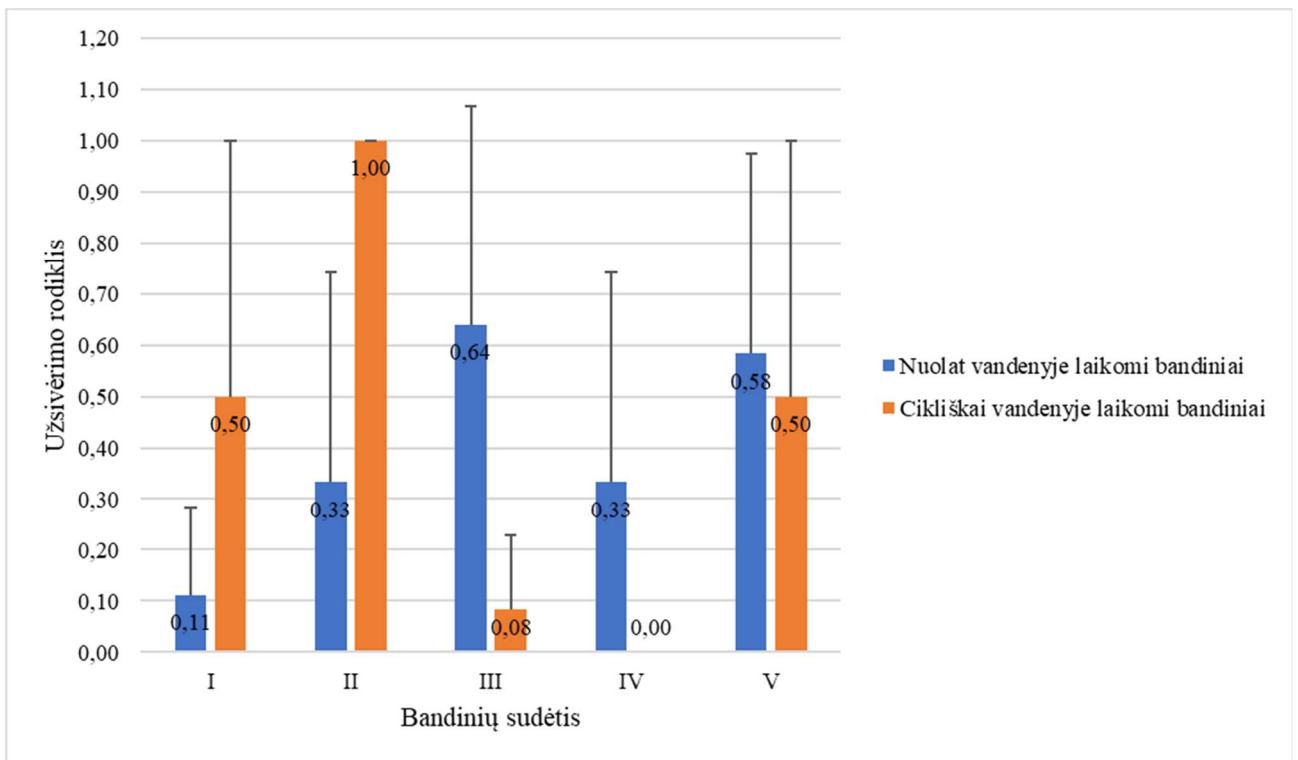


(b)

37 pav. S sudėties bandinys laikomas dalinai pamerktas į vandenį. Plyšio paviršius laikytas ore. Plyšio pločio nr. 1: (a) – ką tik perskėlus bandinį, (b) – po 83 parų

3.1.2. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais atsinaujinimo efektyvumo vertinimas

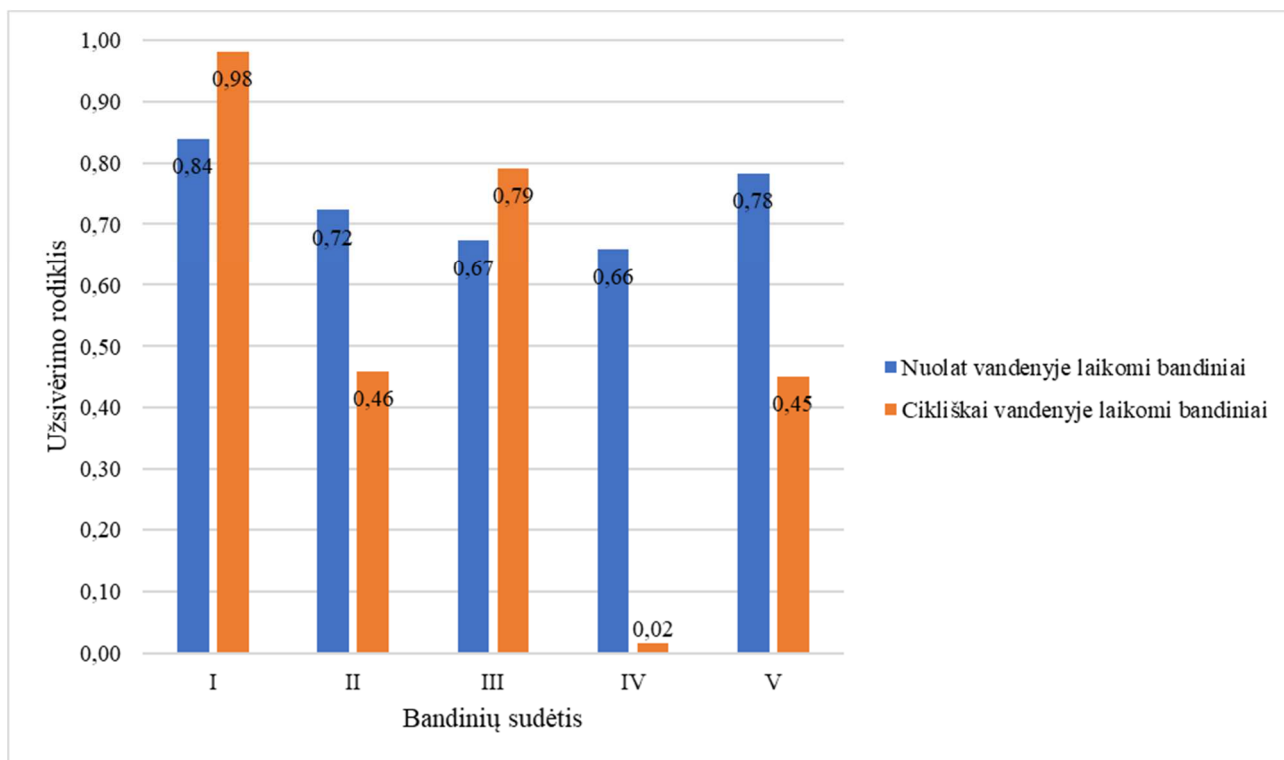
Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais priedais atsinaujinimo efektyvumas vertintas dviem būdais: plyšio pločio sumažėjimu plyšio paviršiuje bei vandens pralaidumo metodu. Skirtingų sudėčių bandinių plyšio užsivėrimo rodiklių, apskaičiuotų remiantis plyšio pločio matavimais, palyginimas pateiktas 38 paveiksle. Detalūs bandymo rezultatai pateikti 2 priede.



38 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių, apskaičiuotų remiantis plyšio pločio matavimais, palyginimas po 28 parų, bandinius laikant skirtingomis aplinkos sąlygomis

Iš gautų rezultatų matyti, jog efektyviausiai plyšys užsitaisė II sudėties, t. y., sudėties su komerciniu mineraliniu priedu „S“, bandinyje cikliškai laikytame vandenyje bei ore. Šiame bandinyje pasiektas visiškas plyšio užsitaisymas, remiantis plyšio pločio matavimais ką tik perskėlus bandinį bei po 28 parų. Mažiausiai efektyviai plyšiai užsitaisė cikliškai vandenyje laikytuose III (naudojant kalčio stearato priedą) sudėties bei IV (naudojant maltą amorfinį silicio dioksidą) sudėties bandiniuose. IV sudėties bandinyje laikytame kintamomis aplinkos sąlygomis nepastebėtas net minimalus plyšio pločio sumažėjimas. Bandiniai su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais, t. y., III, IV bei V (naudojant kalčio stearato, amorfinio silicio dioksido bei parafinuoto natrio alginato mišinį) sudėčių bandiniai nuolat laikyti vandenyje atsinaujino efektyviau, lyginant su bandiniais cikliškai merkiama į vandenį.

Darant išvadą apie plyšio užsivėrimo efektyvumą kai yra vertinamas plyšio pločio sumažėjimas bandinio paviršiuje, būtina atkreipti dėmesį į tai, jog analizuojant matavimų rezultatus nustatytas labai didelis duomenų išsibarstymas. Dėl šios priežasties plyšio užsivėrimo rodiklis nustatytas ir vandens pralaidumo plyšiu bandymu. Detalus cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais vandens pralaidumo bandymo rezultatai pateikti 3 priede. Rezultatų palyginimas pateiktas 39 paveiksle.



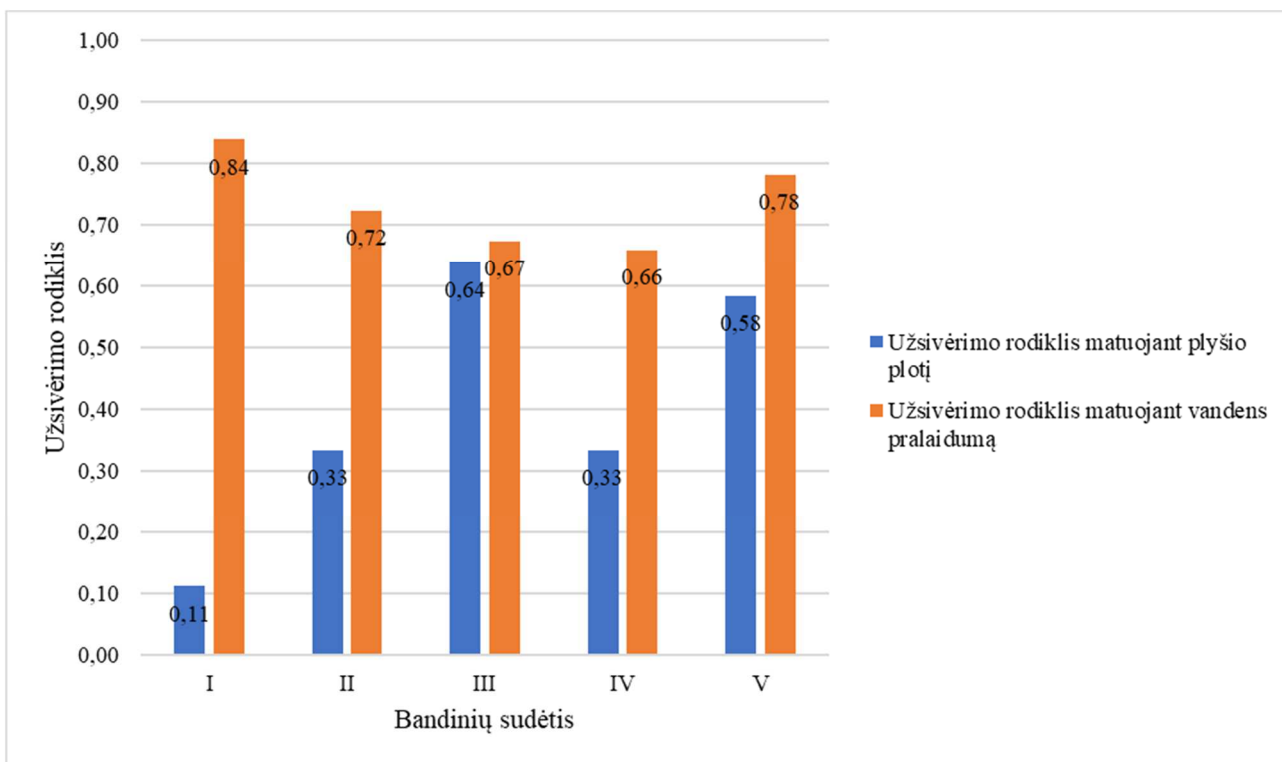
39 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių, apskaičiuotų remiantis vandens pralaidumo matavimais, palyginimas po 28 parų, bandinius laikant skirtingomis aplinkos sąlygomis

Iš gautų rezultatų matyti, jog efektyviausiai plyšys užsitaisė kontroliniuose, t. y., I sudėties bandiniuose, laikytuose tiek nuolat pamerkus į vandenį, tiek laikant bandinius vandenyje bei ore. Mažiausiai efektyviai užsitaisė IV sudėties bandinys, kurio gamyboje naudotas maltas amorfinis silicio dioksidas, laikytas kintamomis aplinkos sąlygomis. II, IV bei V sudėčių bandiniai po 28 parų efektyviau užsitaisė kai buvo laikomi nuolat pamerkti į vandenį, tuo tarpu I bei III sudėties bandiniai efektyviau taisėsi kintamomis aplinkos sąlygomis.

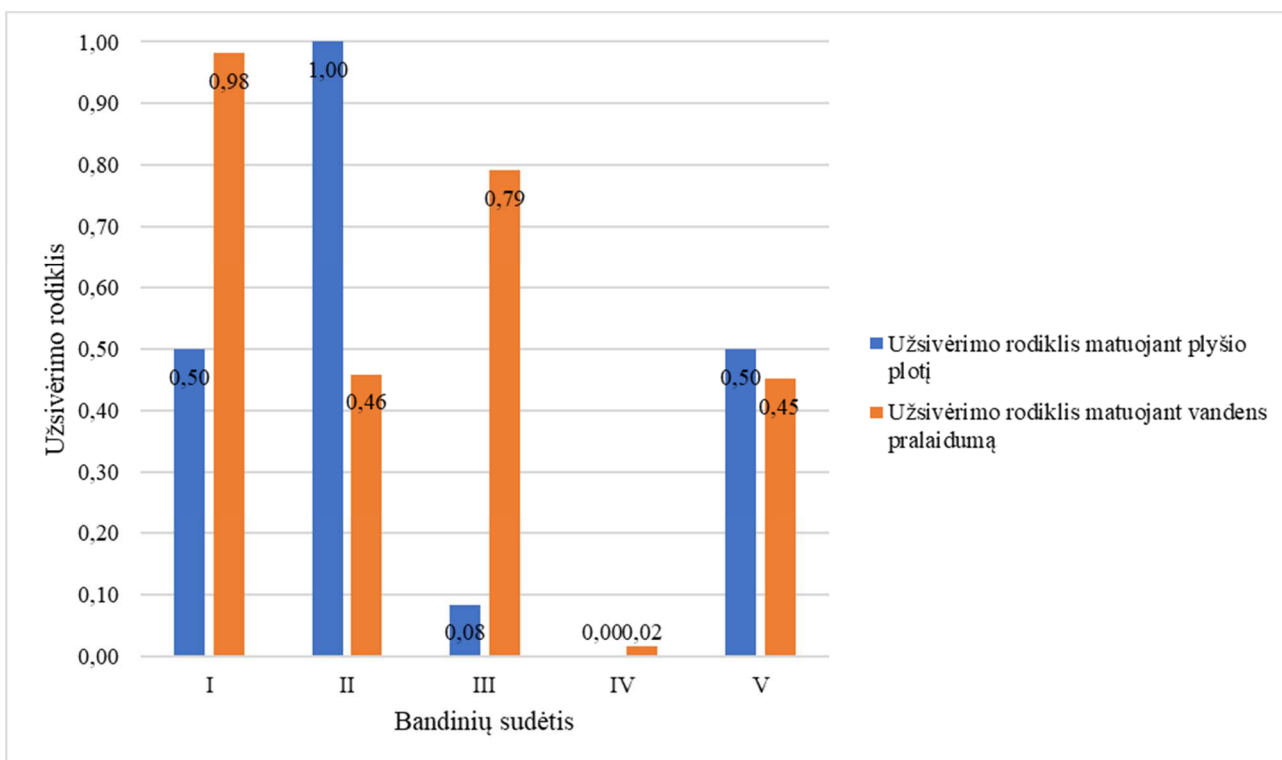
40 ir 41 paveiksluose pateiktas gautų plyšio užsivėrimo rodiklių palyginimas, juos nustatant matuojant plyšio plotį bandinio paviršiuje bei atliekant vandens pralaidumo bandymus.

Didžiausias skirtumas tarp užsivėrimo rodiklių nustatytų skirtingais metodais pastebimas kontrolinės sudėties bandiniuose. Matuojant plyšio plotį, gautas iš dalies nedidelis užsivėrimo rodiklis, tuo tarpu vandens pralaidumo bandymas rodo beveik visišką plyšio užsivėrimą. Tai reiškia, jog kristalinės medžiagos užtaisančios plyšį susidarė ne plyšio paviršiuje, o giliau bandinyje (žr. 42 pav.). Toks pat reiškinys pastebimas ir visuose kituose bandiniuose, laikytuose nuolat parkus į vandenį bei dalyje bandinių, laikytų cikliškai keičiamomis aplinkos sąlygomis.

Tačiau II (su komerciniu mineraliniu priedu „S“) bei V (su kalcio stearato, amorfinio silicio dioksido bei parafinuoto natrio alginato mišiniu) sudėčių bandiniuose, laikytuose kintamomis aplinkos sąlygomis, didesnis užsivėrimo rodiklis nustatytas matuojant plyšio plotį. Tai galėtų būti pagrįsta tuo, jog išilgai bandinio, plyšio plotis yra kintamas, o bandinyje plotis matuotas nepakankamą skaičių kartų, kad būtų galima daryti išvadą apie plyšio užsitaisymą visame bandinio ilgyje.

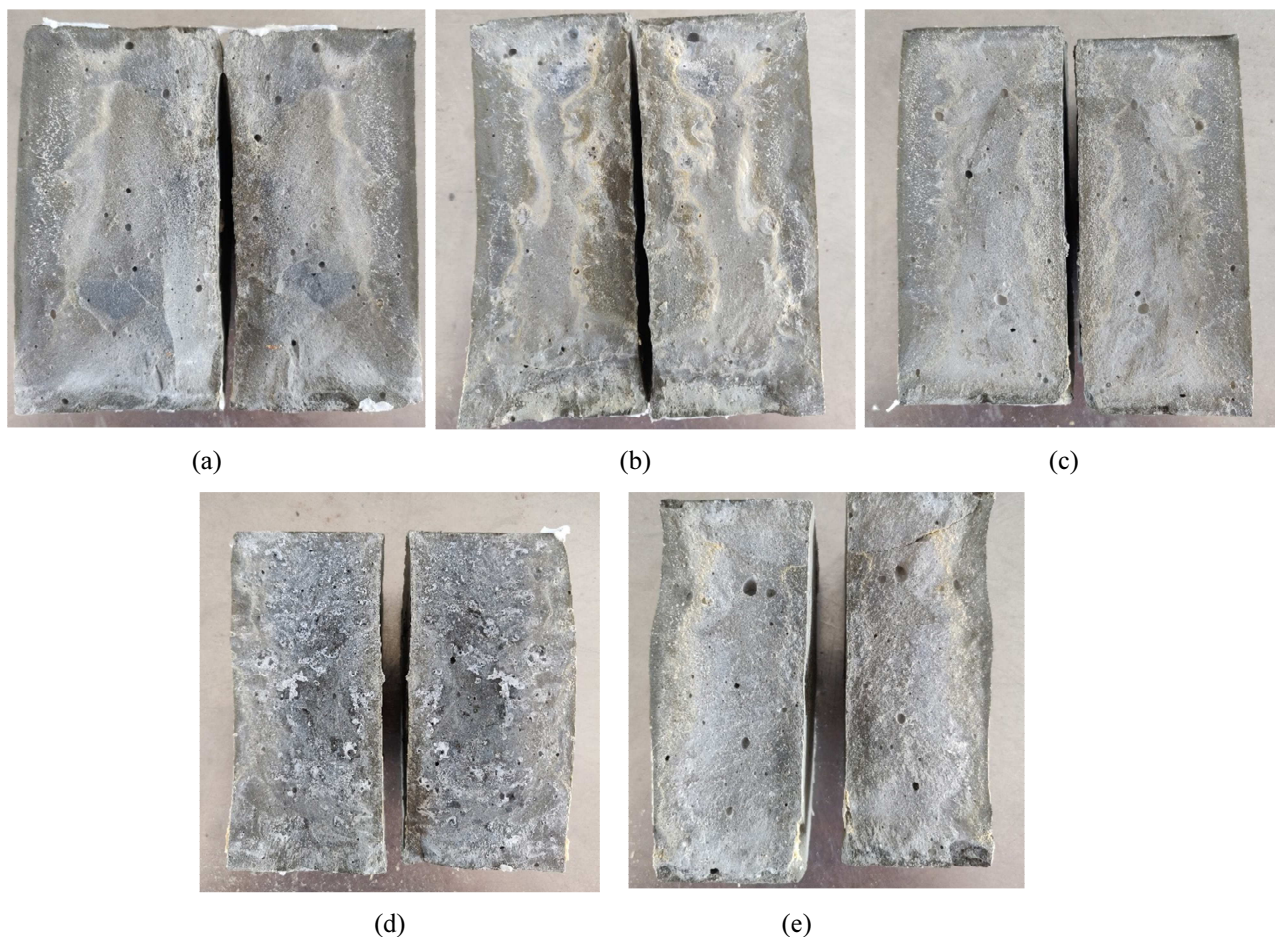


40 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių palyginimas po 28 parų, bandinius laikant nuolat pamerktus vandenyje



41 pav. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio užsivėrimo rodiklių palyginimas po 28 parų, bandinius cikliška laikant vandenyje bei ore

Vertinant naudotų priedų įtaką plyšio užsitaisymui, žymus vienos ar kitos sudėties bandinių užsitaisymas, lyginant su kontrolinės sudėties bandiniais, nepastebėtas. Tačiau išardžius bandinius matomas skirtingų kristalinių medžiagų susidarymas plyšio viduje.

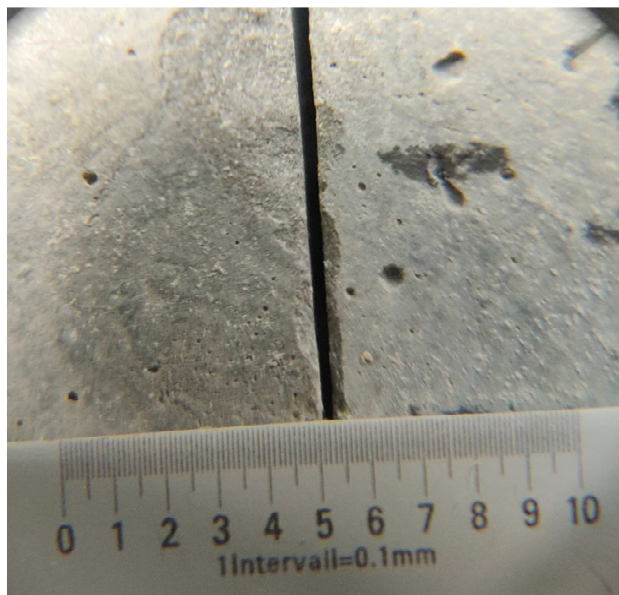


42 pav. Cementinės tešlos bandinių su skirtingais mineraliniais ir organiniais priedais perskelto plyšio vaizdas po 28 parų: (a) – I sudėties bandinys; (b) – II sudėties bandinys; (c) – III sudėties bandinys; (d) – IV sudėties bandinys; (e) – V sudėties bandinys

Lyginant užsivėrimo rodiklių vertes bei atsižvelgiant į bandinių laikymo aplinkos sąlygas, pastebima, jog didžioji dalis bandinių efektyviau taisėsi kai bandiniai buvo laikomi nuolat pamerkti į vandenį.

I (kontrolinės) bei II (su komerciniu mineraliniu priedu „S“) sudėčių bandiniuose su lygiu plyšiu, užsitaikymo efektyvumas vertintas tik matuojant plyšio plotį iškart perpjovus bandinį bei pakartotinai po 28 parų. Bandiniai, siekiant efektyvesnio lygaus plyšio užsivėrimo, laikyti vandenyje.

Po 28 parų plyšio pločio sumažėjimas nepastebėtas, tačiau atskyrus bandinio dalis pastebimos baltų kristalų sankaupos plyšio viduje (žr. 44 ir 46 pav.).



(a)



(b)

43 pav. I sudėties bandinys su lygiu plyšiu: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje

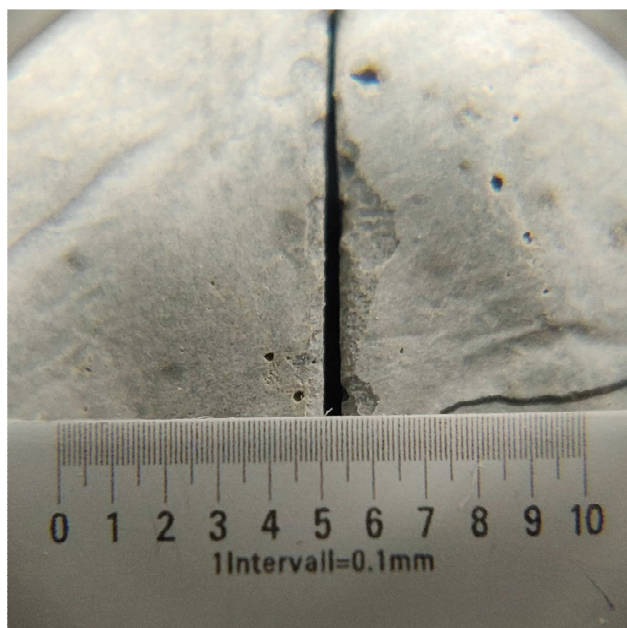


(a)



(b)

44 pav. I sudėties bandinio perskelto plyšio vaizdas: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje



(a)



(b)

45 pav. II sudėties bandinys su lygiu plyšiu: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje



(a)



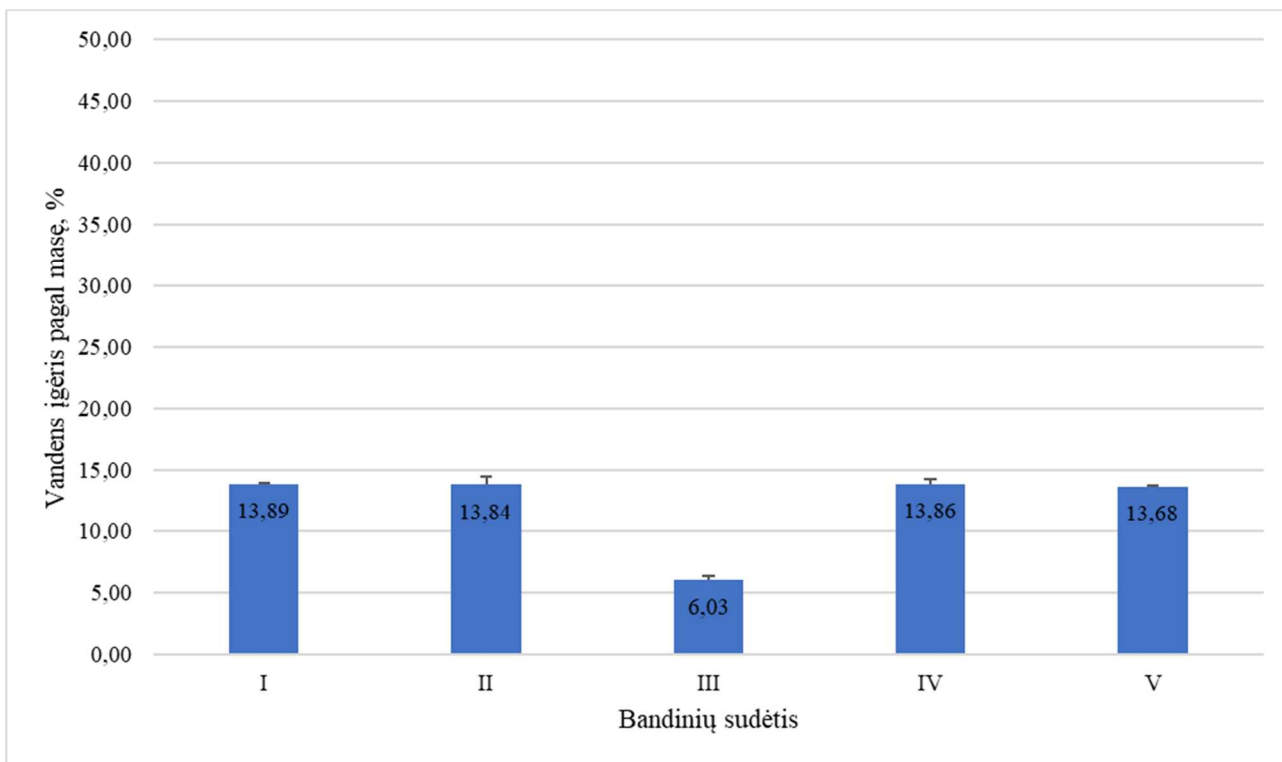
(b)

46 pav. II sudėties bandinio perskelto plyšio vaizdas: (a) – perpjovus bandinį; (b) – po 28 parų laikant vandenyje

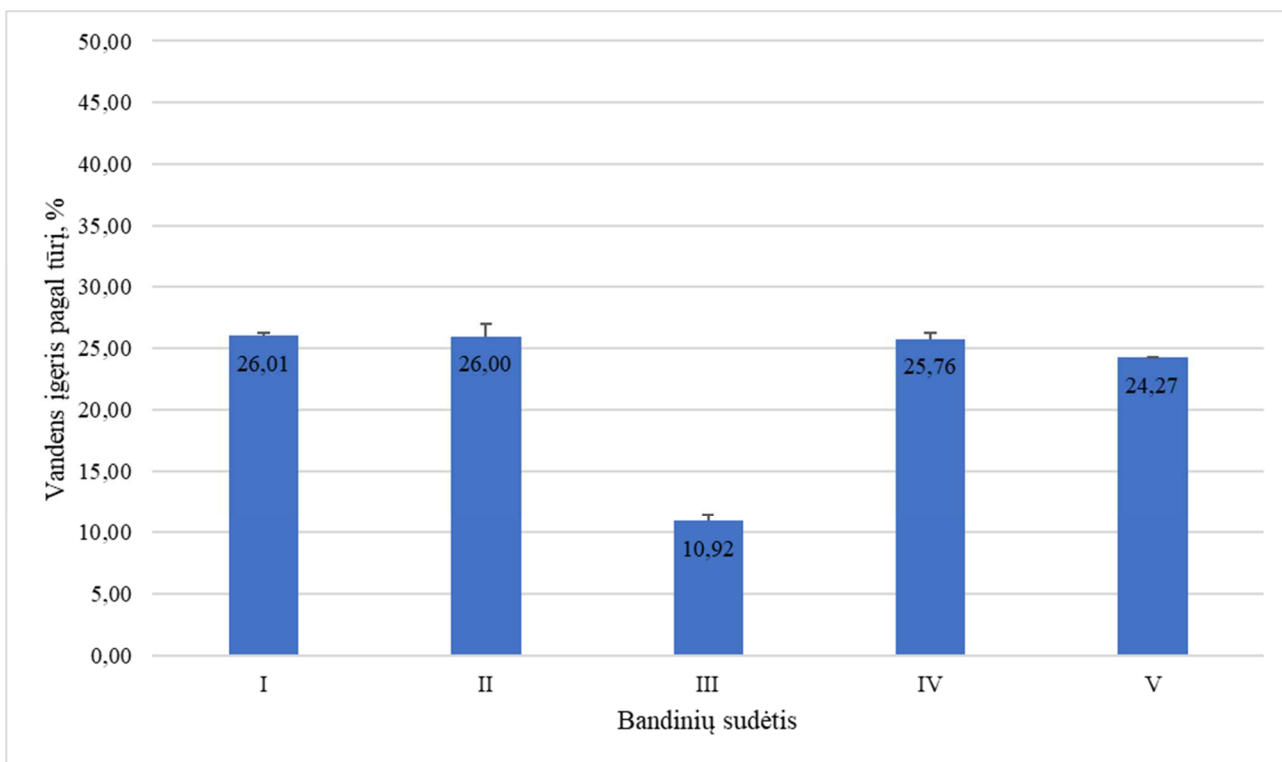
3.1.3. Cementinės tešlos bandinių su pasirinktais mineraliniais bei organiniais priedais įgeriamumo kinetika

Sudarius cementinės tešlos bandinių įgeriamumo kinetiką nustatyta, jog III sudėties bandinių vandens įgeriamumas ir pagal tūrį, ir pagal masę yra ženkliai mažesnis lyginant su kitų sudėčių bandiniais. III sudėties bandiniuose kaip priedas naudotas kalcio stearatas. Galima pastebėti, jog V sudėties bandinių vandens įgeris yra šiek tiek mažesnis, lyginant su I, II bei VI sudėčių bandinių vandens įgeriamumo rezultatais. Žinant, jog šioje sudėtyje taip pat naudotas kalcio stearatas, tačiau mažesnis jo kiekis,

galima daryti išvadą, jog būtent ši medžiaga turi didžiausią įtaką cementinės tešlos bandinių vandens įgeriamumui.



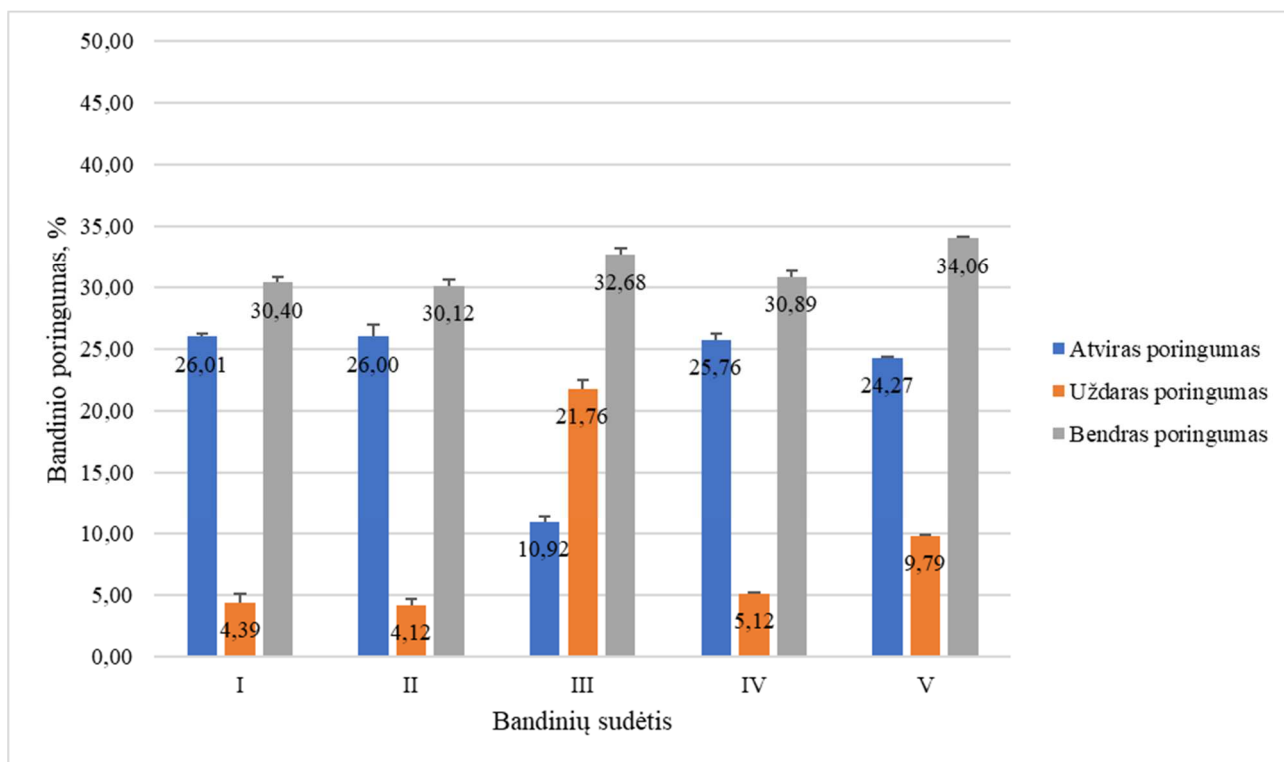
47 pav. Cementinės tešlos bandinių vandens įgerio pagal masę palyginimas



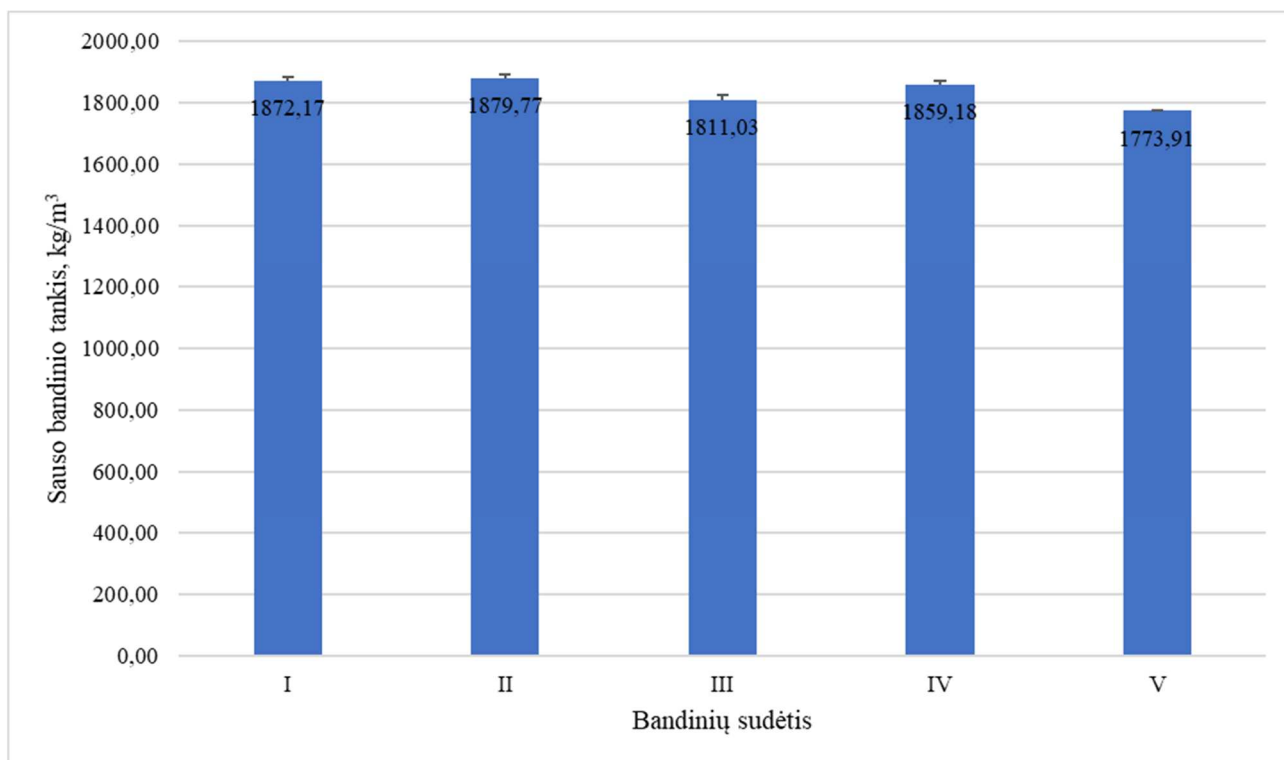
48 pav. Cementinės tešlos bandinių vandens įgerio pagal tūrį palyginimas

Apskaičiavus bandinių bendrą, atvirą bei uždarą poringumą, nustatyta, jog 2 % kalcio stearato priedo ženkliai padidina bandinių uždarą poringumą, o tuo pačiu – sumažina atvirą poringumą. Bendras

bandinio poringumas, naudojant šį priedą, padidėja nežymiai. Toks reiškinys pastebėtas abiejų grupių bandiniuose, kurių sudėtyje naudotas kalcio stearato priedas. Iš gautų duomenų matyti, jog II sudėtyje naudojamas komercinis mineralinis priedas „S“ bei IV sudėtyje naudojamas maltas amorfinis silicio dioksidas pastebimos įtakos bandinių vandens įgeriamumui ar bandinio poringumui neturi.



49 pav. Cementinės tešlos bandinių bendro, atviro bei uždaro poringumų palyginimas



50 pav. Sausų cementinių bandinių tankių palyginimas

Nagrinėjant apskaičiuotus sausų cementinės tešlos bandinių tankius matoma, jog visų sudėčių bandinių tankių reikšmės svyruoja 5 % ribose. Tačiau pastebima, jog III sudėties bandinių tankis – šiek tiek mažesnis, lyginant su kontrolinių bandinių tankiu. Tuo tarpu mažiausias nustatytas tankis – V sudėties bandinių. Todėl galima daryti prielaidą, jog bandinio tankio sumažėjimui įtakos gali turėti ne tik kalcio stearato priedas, tačiau ir parafinuoto natrio alginato priedas.

Detalūs įgeriamumo kinetikos sudarymo duomenys pateikti 4 priede.

3.2. Kristalų susidarymas medžiagų vandeniniuose tirpaluose taikant priešpriešinės difuzijos metodą

Atidarius bandymo sistemas su skirtingų medžiagų vandeniniais tirpalais, kurios buvo laikytos 28 paras, pastebėtas kristalų sluoksnių susidarymas vandeninių tirpalų paviršiuje. Šeštoje sistemoje kristalai susidarė ne tik ant tirpalo paviršiaus, tačiau ir ant indo sienelės dviejų tirpalų sandūroje. Susidariusios kristalinės medžiagos tirtos mikroskopinės analizės bei rentgeno difrakcinės analizės metodais (žr. 6 lentelę). Mikroskopinei analizei atlikti naudotas OMAX M83EZ mikroskopas.

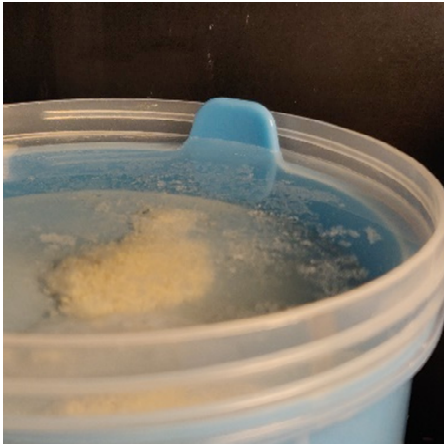
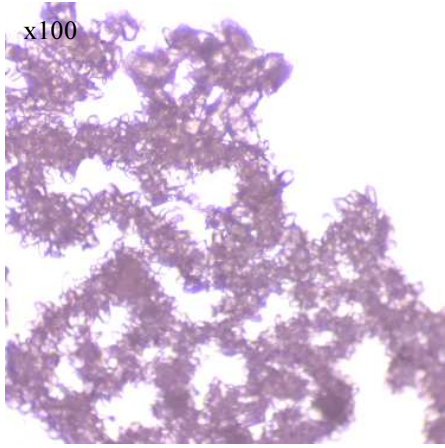
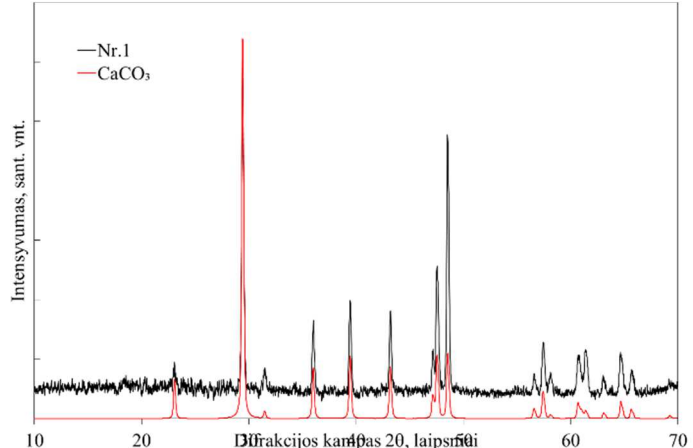
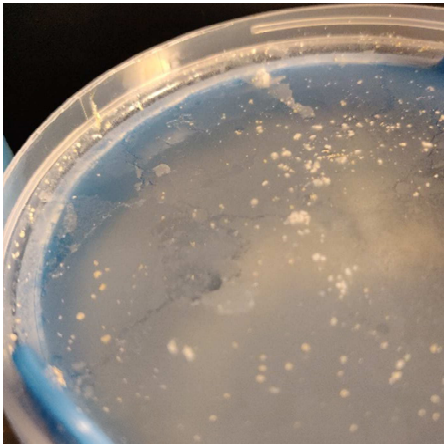
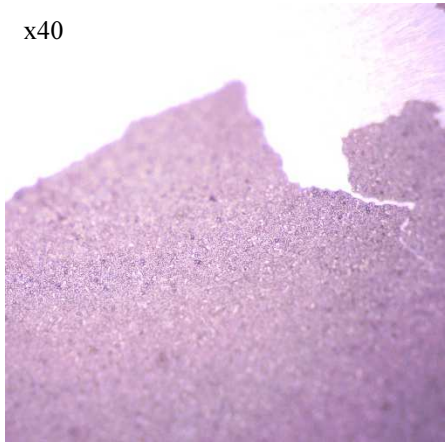
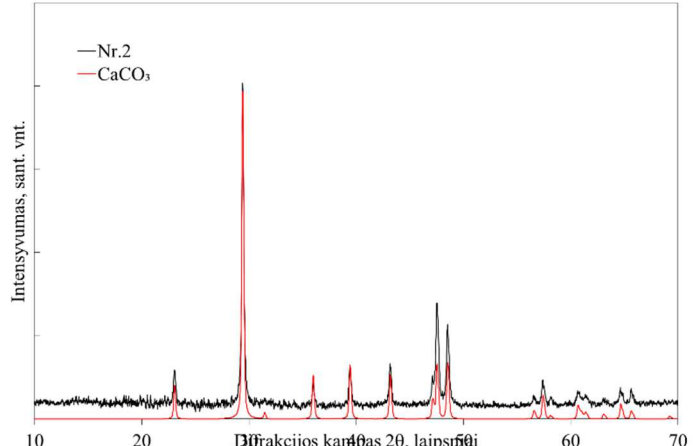
Atlikus mikroskopinę analizę galima pamatyti susidariusius skirtingų formų kristalus. Antroje bandymo sistemoje kristalai sudarė plėvelę, kai tuo tarpu kitose sistemose kristalinės medžiagos susiformavo chaotiškai.

Atlikus kristalų rentgeno difrakcinę analizę nustatyta, jog visose bandinių sistemose susidariusiuose kristaluose vyrauja kalcio karbonatas. Penktojoje sistemoje, kurioje naudotas komercinis mineralinis priedas, koduotas raide „B“, bei 42,5R klasės cementas, be $CaCO_3$ rasta ir Na_3K_7Cl .

Vis dėlto, reikia atsižvelgti į tai, jog susidariusių kristalų kiekis bandymo sistemose buvo per mažas, jog būtų galima visiškai tiksliai identifikuoti susidariusių kristalų cheminę sudėtį.


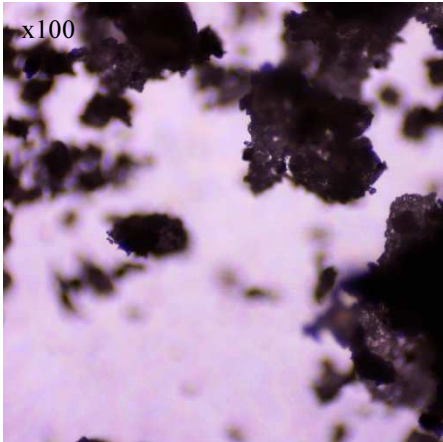
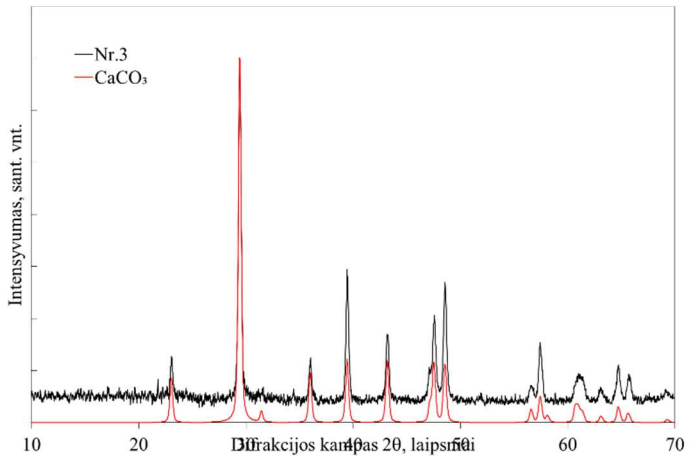

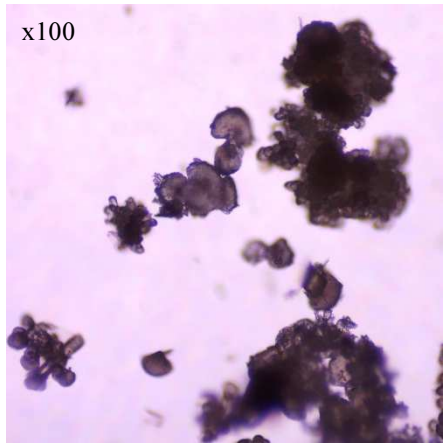
Ketvirtojoje sistemoje, kurioje nenaudotas joks kristalinis priedas, per 28 paras susidarė per mažas kristalų kiekis, jog juos būtų galima ištirti rentgeno difrakcinės analizės metodu.

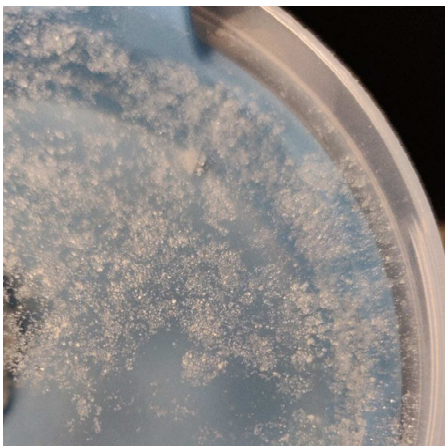
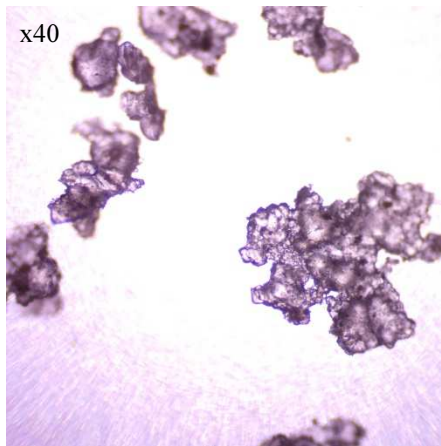
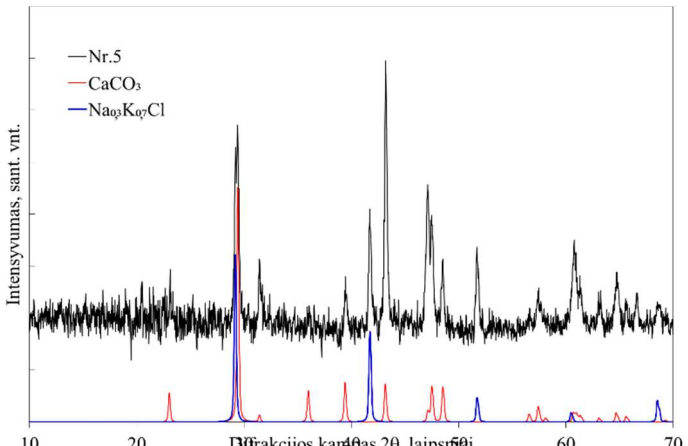

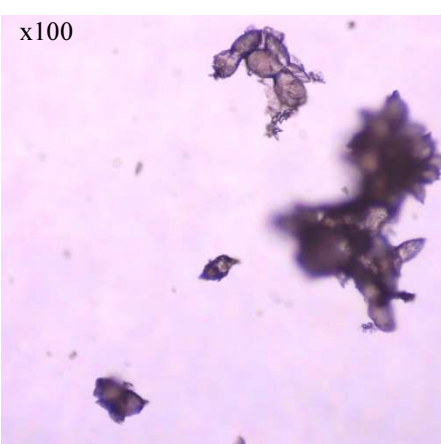
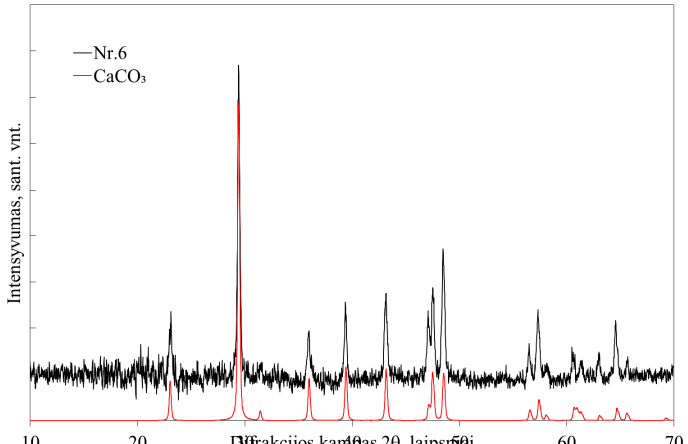
6 lentelė. Bandomo sistemos susidariusių kristalų analizė


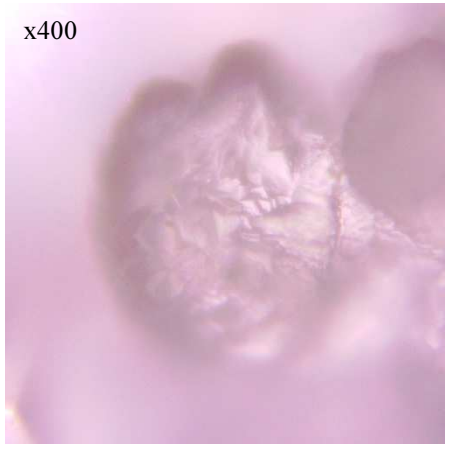
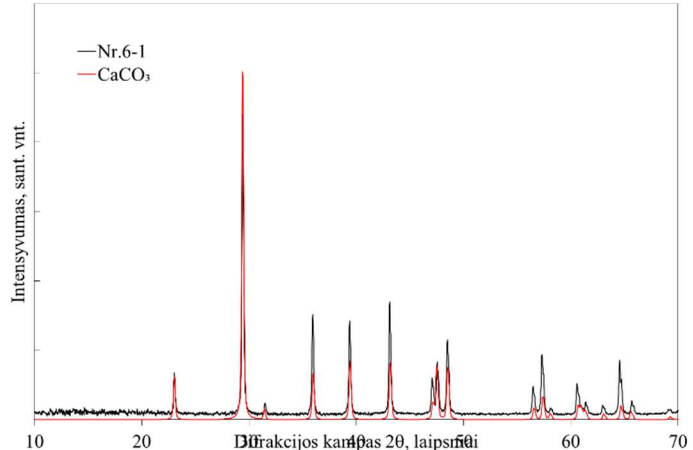
Sistemos nr.	Naudotos medžiagos	Kristalų vaizdas sistemoje	Kristalų mikroskopinis vaizdas	XRD analizė
1	S. v. ¹ – CaO + SiO ₂ ; S. a. ² – CEM		 x100	
2	S.v. – CaO; S. a. - priedas „S“		 x40	

¹ S. v. – sistemos viršuje;

² S. a. – sistemos apačioje.

Sistemos nr.	Naudotos medžiagos	Kristalų vaizdas sistemoje	Kristalų mikroskopinis vaizdas	XRD analizė
3	S. v. – priedas „S“; S. a. - CEM			
4	S. v. – CaO; S. a. - CEM			-

Sistemos nr.	Naudotos medžiagos	Kristalų vaizdas sistemoje	Kristalų mikroskopinis vaizdas	XRD analizė
5	S. v. – priedas „B“; S. a. - CEM		x40 	
6	S. v. – CaO; S. a. – priedas „B“		x100 	

Sistemos nr.	Naudotos medžiagos	Kristalų vaizdas sistemoje	Kristalų mikroskopinis vaizdas	XRD analizė
6.1 kristalai ant indo sienelių	S. v. – CaO; S. a. – priedas „B“		 <p>x400</p>	 <p>Intensyvumas, sant. vnt.</p> <p>—Nr.6-1 —CaCO₃</p> <p>10 20 40 60 70</p> <p>Diffrakcijos kampas 2θ, laipsniai</p>

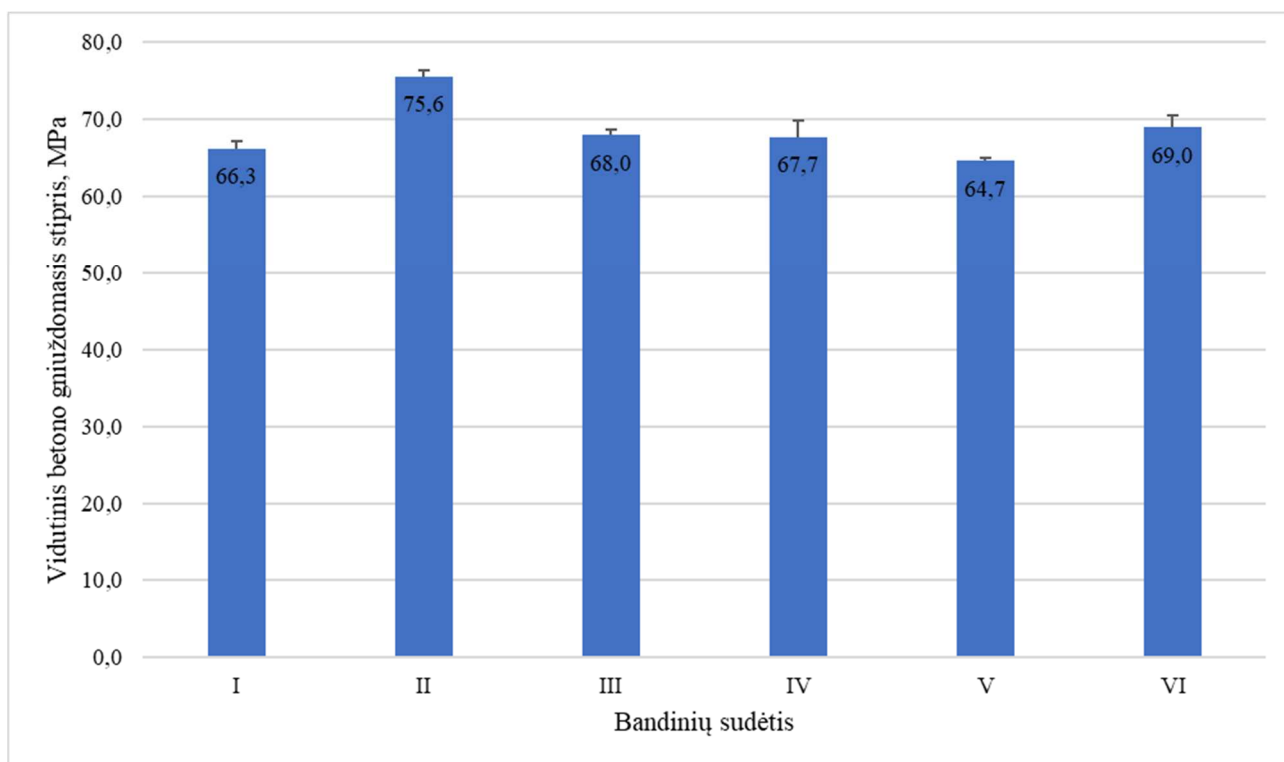
3.3. Plyšio pločio užsivėrimo efektyvumas betono bandiniuose su pasirinktais mineraliniais priedais

3.3.1. Pasirinktų priedų įtaka betono gniuždomajam stipriui bei tankiui

Betono bandinių gamybos metu suformuoti 10x10x10 cm kubeliai skirti nustatyti įvairių naudotų priedų įtaką betono gniuždomajam stipriui. Suformuoti bandiniai 28 paras laikyti vandenyje.

Atlikus gniuždomojo stiprio nustatymo bandymą gauti rezultatai parodė, jog didžiausias gniuždomasis stipris pasiektas II sudėties bandiniuose, t. y., bandiniuose su komerciniu mineraliniu priedu „S“. Panaudojant šį priedą betono gniuždomasis stipris padidėjo 12,3 %, lyginant su kontrolinės sudėties bandinių gniuždomuoju stipriui. III (naudojant kalcio bikarbonatą bei kalcio karbonatą), IV (naudojant trietalonaminą) bei VI (naudojant kalio sulfatą bei anhidritą) sudėčių betono bandiniuose taip pat nustatytas didesnis gniuždomasis stipris, lyginant su kontrolinės sudėties bandinių gniuždomuoju stipriui. III sudėties bandinių gniuždomojo stiprio prieaugis – 2,5 %, IV sudėties bandinių – 2,1 %, o VI sudėties bandinių – 4 %, lyginant su I sudėties bandiniais. Kaip priedą naudojant parafinuoto aliuminatinio cemento bei anhidrito mišinį (V bandinių sudėtis), betono gniuždomasis stipris sumažėjo 2,5 %, lyginant su kontrolinės sudėties bandiniu.

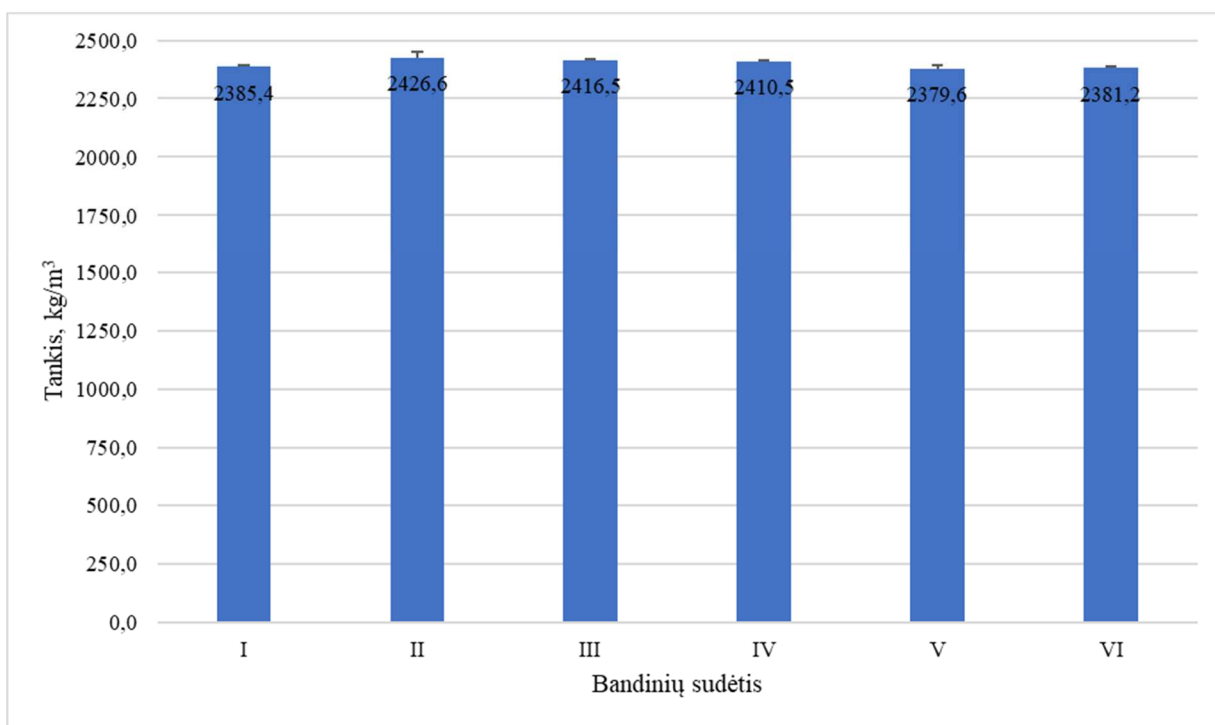
Gauti rezultatai rodo, jog naudojant atitinkamus kiekius minėtų priedų betono mišinio sudėtyje, žymi įtaka betono gniuždomojo stiprio savybėms nėra padaroma. Detalūs bandymo rezultatai pateikti 5 priede.



51 pav. Betono bandinių su skirtingais mineraliniais priedais gniuždomojo stiprio palyginimas

Naudotų priedų įtaka betono tankiui taip pat nėra žymi. Visų sudėčių bandinių tankiai skiriasi 2 % ribose. Didžiausio tankio bandiniai gauti betono sudėtyje naudojant komercinį mineralinį priedą „S“.

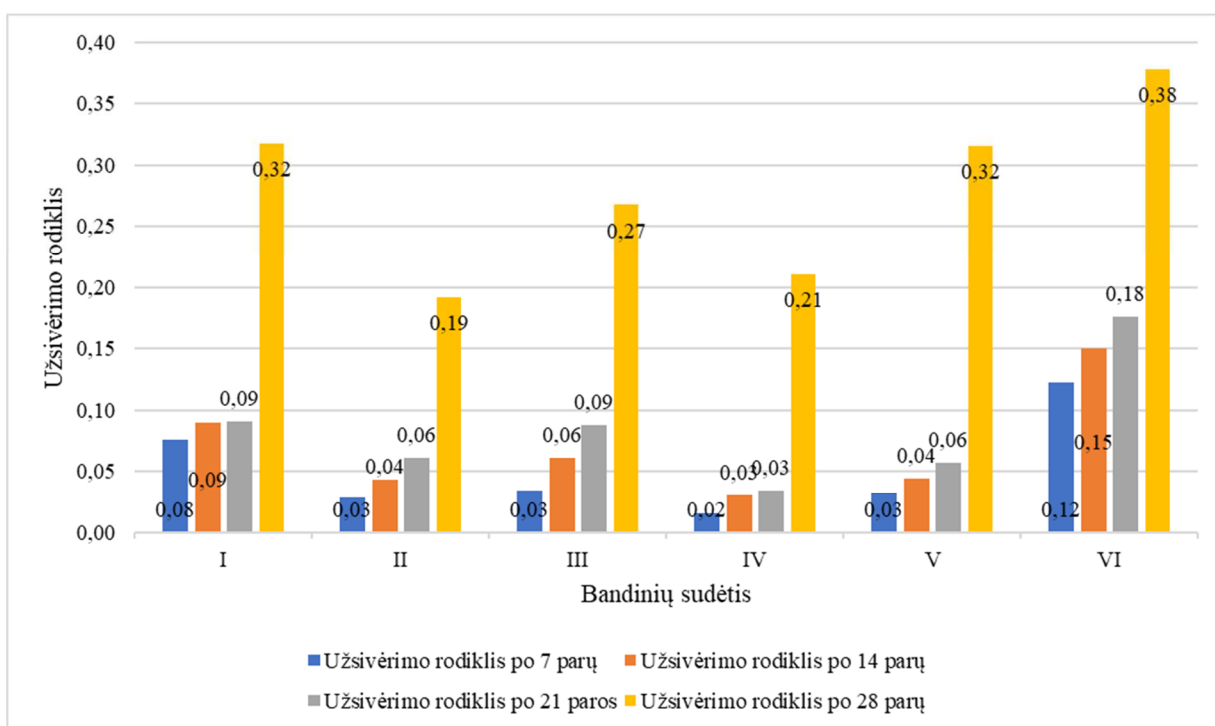
Mažiausio tankio bandiniai – su parafinuoto aluminatinio cemento bei anhidrito mišiniu (V bandinių sudėtis).



52 pav. Betono bandinių su skirtingais mineraliniais priedais tankių palyginimas

3.3.2. Skelto plyšio užsitaismo efektyvumo vertinimas

Bandinių su skeltu plyšiu užsitaismo efektyvumas vertintas periodiškai atliekant vandens pralaidumo bandymus. Bandymo metu gauti detalūs rezultatai pateikti 6 priede.



53 pav. Skirtingų sudėčių betono bandinių su skeltu plyšiu užsivėrimo rodiklių palyginimas

Gauti duomenys rodo, jog efektyviausiai užsitaisė IV sudėties bandiniai, kurių sudėtyje kaip priedas naudotas kalio sulfato bei anhidrito mišinys. Prasčiausiai plyšiai taisėsi bandiniuose su komerciniu mineraliniu priedu „S“. Ketvirtąją bandymo savaitę, pastebėjus neefektyvų betono atsinaujinimą, bandiniai pamerkami į vandenį, o gauti rezultatai rodo ženklų visų sudėčių bandinių plyšių užsitaisymo efektyvumo pagerėjimą.

Pirmąją savaitę efektyviausiai taisėsi IV bei I (kontrolinės) sudėties bandiniai, kurie pasiekė 12 % bei 8 % užsitaisymo efektyvumą per pirmąją savaitę. Kitų sudėčių bandinių užsitaisymo rodikliai per pirmąją savaitę buvo panašūs, o jų efektyvumas nesiekė 5 %. Antrąją bei trečiąją savaitę visų sudėčių bandinių plyšių užsivėrimo rodiklių prieaugis nesiekė 5 %. Ketvirtąją savaitę didžiausias užsivėrimo rodiklio prieaugis pastebimas V sudėties bandiniuose, kurių sudėtyje naudotas aliuminatinio cemento bei anhidrito mišinys. V sudėties bandiniuose per savaitę pasiektas 26 % užsitaisymo efektyvumas, bandinius nuolat laikant pamerktus vandenyje. Tai rodo efektyvaus užsitaisymo potencialą bėgant laikui ir esant pakankamai dideliame vandens kiekiui plyšyje. IV sudėties bandinių, kurių sudėtyje naudotas trietilonaminas, užsitaisymo efektyvumas per ketvirtąją savaitę padidėjo 7 kartus. Kadangi bandinių gamyboje naudotas rapidinis cementas, efektyviausio plyšio taisymosi tikėtasi pirmąją bandymo savaitę. Vis dėlto, gauti duomenys rodo, jog efektyviai plyšiai pradėjo taisytis tik pamerkus bandinius į vandenį. Šis reiškinys galėtų būti paaiškinamas tuo, jog plyšiu tekantis vanduo išplauna susiformavusius kristalus ar medžiagas ir plyšio taisymasis nėra stabilus.

Lyginant su kontrolinės sudėties bandinio galutiniu užsivėrimo rodikliu, didesnis užsitaisymo efektyvumas pastebimas tik VI sudėties bandiniuose. V sudėties bandinių užsivėrimo rodiklis lygus kontrolinės (I) sudėties bandinio užsivėrimo rodikliui, tuo tarpu II, III bei IV sudėčių bandiniai taisėsi mažiau efektyviai nei kontrolinis bandinys.

3.3.3. Lygaus plyšio užsitaisymo efektyvumo vertinimas

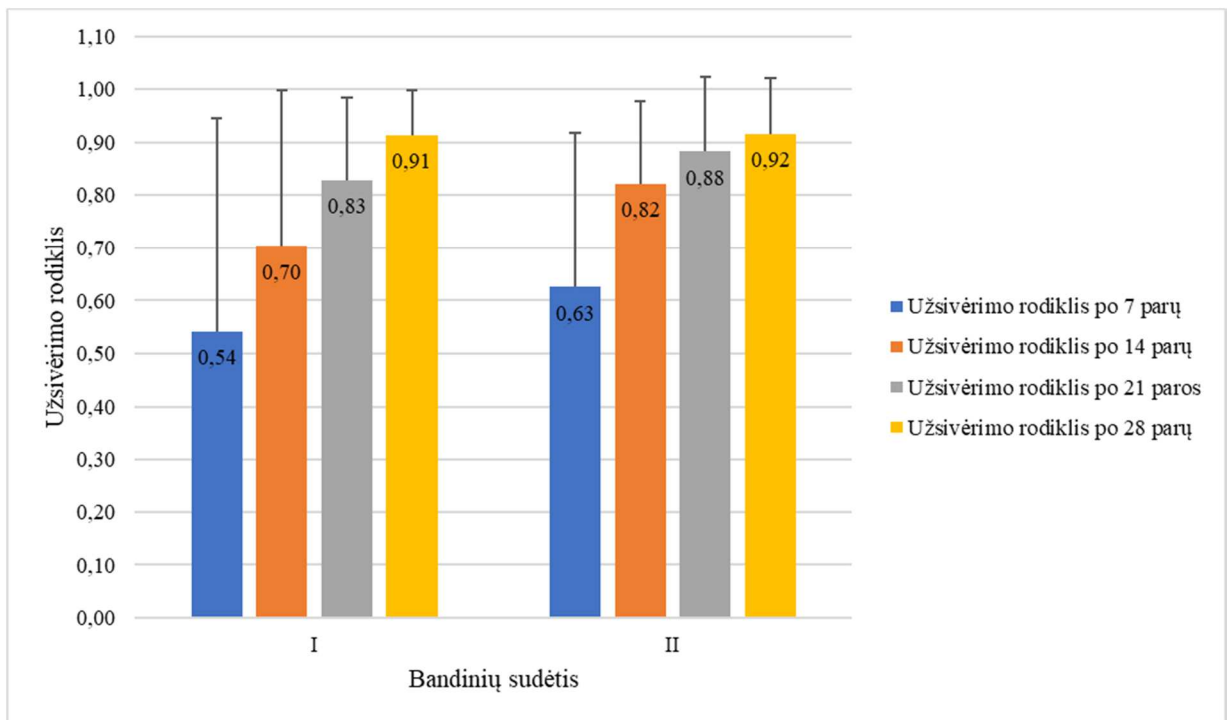
Suformuoto lygaus plyšio I bei II sudėčių bandiniuose užsivėrimo efektyvumas vertinimas atliekant vandens pralaidumo bandymą po 7, 14, 21 bei 28 parų. Detalūs bandymo rezultatai pateikti 7 priede.

Iš gautų duomenų matyti, jog po 28 parų abiejų sudėčių bandinių plyšio užsivėrimo efektyvumo vidurkiai beveik vienodi. Šiek tiek efektyviau plyšys užsitaisė II sudėties bandiniuose su komerciniu mineraliniu priedu „S“.

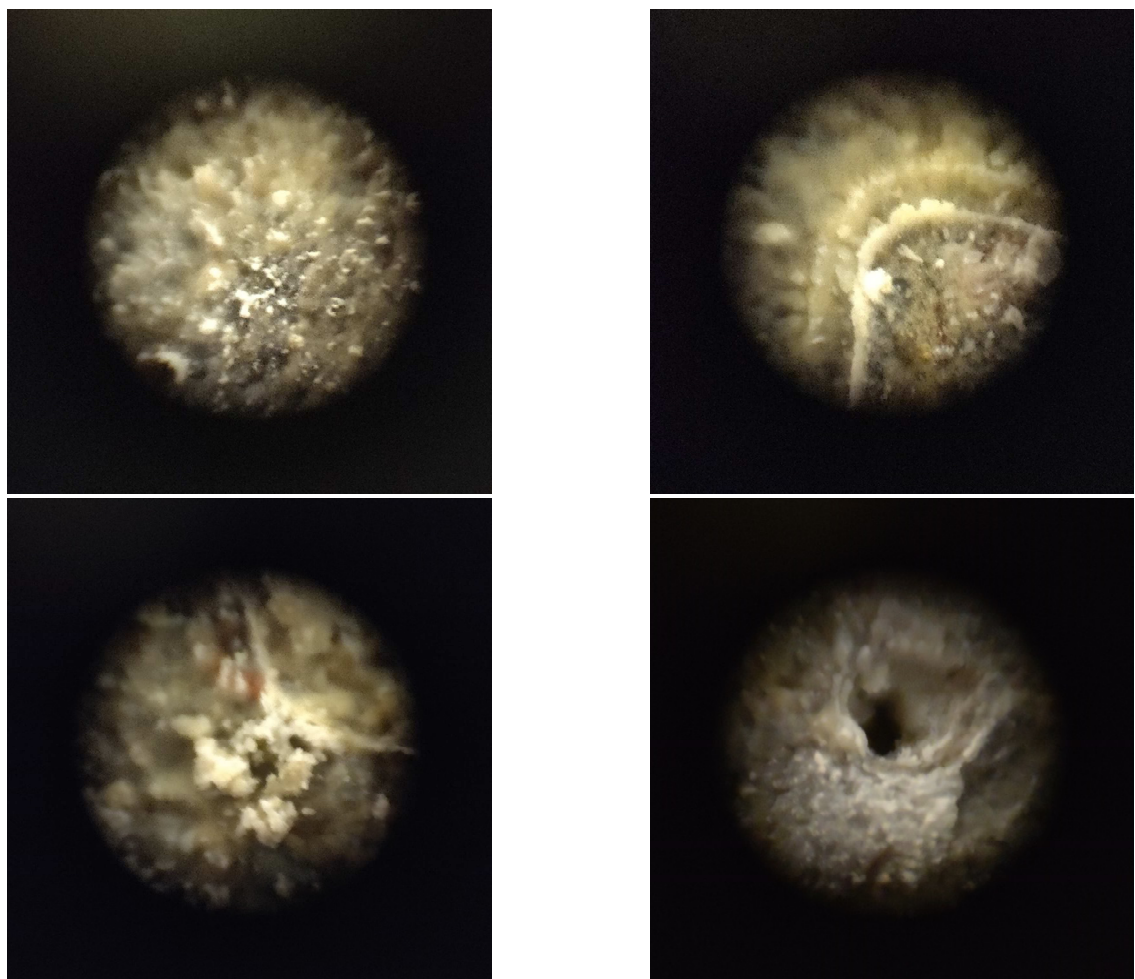
Vis dėlto, atliekant vandens pralaidumo bandymus po 7, 14 bei 21 dienos, pastebėtas kur kas efektyvesnis bandinių su komerciniu mineraliniu priedu „S“ plyšio užsitaisymas, lyginant su kontrolinės sudėties bandiniais. Po 7 dienų, II sudėties bandiniai užsitaisė 9,0 % efektyviau, lyginant su I sudėties bandiniais. Po 14 dienų, bandinių užsivėrimo rodiklių skirtumas– 12,0 %, po 21 dienos – 5,0 %, o po 28 parų pastebimas tik 1,0 % skirtumas.

Efektyviausiai bandiniai taisėsi pirmąją savaitę, o bėgant laikui, plyšio užsivėrimo efektyvumas palaipsniui mažėjo.

Išardžius lygaus plyšio bandinius vietomis pastebėtas bandinių spalvos pakitimas plyšio paviršiuje. Išanalizavus bandinių paviršių mikroskopu (didinimas 100 kartų), pastebimos kristalų sancaupos ant lygaus bandinio paviršiaus bei susiformavusios kristalinės plokštelės bandinio porose. Tai rodo, jog filtru pagalba užlaikant vandenį plyšyje gali vykti pakankamai efektyvus kristalizacijos procesas, užtaisantis net ir lygų plyšį. Lygaus plyšio bandinių vaizdas pateiktas 55 paveiksle.



54 pav. Betono bandinių su lygiu plyšiu bei vandenį plyšyje užlaikančiomis priemonėmis užsivėrimo rodiklių palyginimas



55 pav. Lygaus plyšio bandinių mikroskopinis vaizdas po 28 parų

Išvados

1. Atlikus bandymus su cementinio akmens bandiniais nustatyta, jog plyšio užsivėrimo efektyvumo vertinimas matuojant plyšio plotį bandinio paviršiuje nėra tinkamas patikimai kiekybinei analizei atlikti. Remiantis vandens pralaidumo bandymo rezultatais, didesnis atsinaujinimo efektyvumas pasiektas bandinius nuolat laikant vandenyje. Bandinių sudėtyje naudoti amorfinio silicio dioksido, kalcio stearato bei natrio alginato priedai nėra efektyvūs siekiant pilno plyšio užsivėrimo bandinyje.
2. Atlikus cementinio akmens bandinių su amorfinio silicio dioksido, kalcio stearato bei natrio alginato priedais vandens įgeriamumo kinetikos nustatymą paaiškėjo, jog kalcio stearatas ženkliai padidina medžiagos atsparumą vandens pralaidumui. Mišinio sudėtyje 2 % cemento masės pakeičiant kalcio stearato priedu, atviras cemento tešlos poringumas gali sumažėti iki 2,3 karto, tuo tarpu uždaras medžiagos poringumas gali padidėti iki 5 kartų.
3. Atlikus eksperimentą, kurio metu taikytas priešpriešinės difuzijos metodas kristalų auginimui medžiagų vandeniniuose tirpaluose, o gautus rezultatus ištyrus XRD analizės metodu nustatyta, jog bandymo sistemose susidarė plyšį užpildančios medžiagos – kalcio karbonato – kristalai. Gauti rezultatai rodo, jog priešpriešinės difuzijos kristalų auginimo metodas gali būti pritaikomas naujų kristalinių priedų kūrimo procese.
4. Atlikus vandens pralaidumo bandymus nustatyta, jog betono bandiniuose (su CEM 42,5R), kurių sudėtyje 2 % cemento masės pakeista kalio sulfato bei anhidrito mišiniu (VI sudėtis), pasiektas didžiausias – 38 % atsinaujinimo efektyvumas, tuo tarpu mažiausias atsinaujinimo efektyvumas – 19 % nustatytas bandiniuose su komerciniu mineraliniu priedu „S“ (II sudėtis). Vis dėlto, betono su rapidiniu cementu atsinaujinimo efektyvumui itin didelę įtaką turi kietinimo sąlygos, t. y., laikant bandinius nuolat pamerktus į vandenį, atsinaujinimo efektyvumas gali pagerėti iki 7 kartų.
5. Betono bandinių, kurių sudėtyje 2 % cemento masės pakeista komerciniu mineraliniu priedu „S“ (II sudėtis), kalcio bikarbonato bei kalcio karbonato mišiniu (III sudėtis), trietalonaminu (IV sudėtis) bei kalio sulfato bei anhidrito mišiniu (VI sudėtis), gniuždomasis betono stipris gautas iki 12,3 % didesnis, lyginant su kontrolinės sudėties bandiniais. Tuo tarpu betono sudėtyje naudojant 2 % aliuminatinio cemento bei anhidrito mišinio (V sudėtis) priedo, bandinių gniuždomasis stipris sumažėjo 2,5 %.
6. Baigiamojo darbo metu sukurta metodika lygaus plyšio užsitaismo efektyvumo vertinimui. Vidutinė kontrolinės (I) sudėties bandinių plyšio užsitaismo efektyvumo vertė – 91 %, bandinių sudėtyje naudojant komercinį mineralinį priedą „S“ (II sudėtis) pasiektas 92 % plyšio užsitaismas. Taikyta metodika gali būti perspektyvi, tačiau, siekiant atlikti itin tikslią kiekybinę analizę, metodiką reikia tobulinti.

Literatūros sąrašas

1. ZHA Y., J. YU, R. WANG, P. HE ir Z. COA. Effect of ion chelating agent on self-healing performance of Cement-based materials. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, 190, 308-316 [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.115>
2. PALIN D., V. WIKTOR ir H. M. JONKERS. Autogenous healing of marine exposed concrete: Characterization and quantification through visual crack closure. *Cement and Concrete research* [interaktyvus]. 2015, 73, 17-24 [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.021>
3. CHEN Z. LV. D. Overview of recent work on self-healing in cementitious materials. *Mater. Construcc* [interaktyvus]. 2014, 64, 316 [žiūrėta 2020-03-14]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.05313>
4. SIDIQ A., R. GRAVINA, F. GIUSTOZZI. Is concrete healing really efficient? A review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 205, 257-273 [žiūrėta 2020-03-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002>
5. YANG Y., M. D. LEPECH, E. YANG, V. C. LI. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet – dry cycles. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus]. 2009, 39 (5), 382-390 [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.013>
6. SCHLANGEN E., S. SANGADJI. Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self Healing Mechanisms – Recent Advances in Self Healing Concrete and Asphalt. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. 2013, 54, 39-57 [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.005>
7. CHANDRA SEKHARA REDDY T., A. RAVITHEJA. Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments. *Ain Shams Engineering Journal* [interaktyvus]. 2019, 10 (1), 23-32 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.01.005>
8. ABD-ELMOATY M. Self-healing of polymer modified concrete. *Alexandria Engineering Journal* [interaktyvus]. 2011, 50 (2), 171-178 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.03.002>
9. LEE H. X. D., H. S. WONG, N. R. BUENFELD. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus]. 2016, 76, 194-208 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.008>
10. HE Z., A. SHEN, Y. GUO, Z. LYU, D. LI, X. QIN, M. ZHAO ir Z. WANG. Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, 225, 569-590 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.139>
11. LI L., Q. ZHENG, Z. LI, A. ASHOUR, B. HAN. Bacterial technology-enabled cementitious composites: A review. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2019, 225 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111170>
12. YUAN Z., Z. JIANG, Q. CHEN. Permeability modeling of self-healing due to calcium carbonate precipitation in cement-based materials with mineral additives. *Central South University Press and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019* [interaktyvus]. 2019, 26, 567-576 [žiūrėta 2020-03-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4028-4>

13. SISOMPHON K., O. COPUROGLU, E. A. B. KOENDERS. Self-healing of cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2012, 34 (4), 566-574 [žiūrėta 2020-03-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.005>
14. SHERIR M. A. A., K. M. A. HASSAIN, M. LACHEMI. The influence of MgO-type expansive agent incorporated in self-healing system of Engineered cementitious Composites. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, 149, 164-185 [žiūrėta 2020-03-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.109>
15. HUANG H., G. YE. Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca²⁺ ions in the healing agent. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [interaktyvus]. 2015, 26 (3), 309-320 [žiūrėta 2020-03-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/1045389X14525490>
16. WANG X., C. FANG, D. LI, N. HAN, F. XING. A self-healing cementitious composite with mineral admixtures and built-in carbonate. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2018, 92, 216-229 [žiūrėta 2020-03-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.013>
17. WU S., G. LU, Q. LIU, P. LIU, J. YANG. Sustainable High-Ductility Concrete with Rapid Self-Healing Characteristic by Adding Magnesium Oxide and Superabsorbent Polymer. *Advances in Materials Science and Engineering* [interaktyvus]. 2020, straipsnio ID 5395602 [žiūrėta 2020-03-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2020/5395602>
18. CHINDASIRIPHAN P., H. YOKOTA, P. PIMPAKAN. Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 233, 116975 [žiūrėta 2020-03-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116975>
19. LEFEVER G., D. SNOECK, D. G. AGGELIS, N. DE BELIE, S. VAN VLIERBERGHE, D. VAN HEMELRIJCK. Evaluation of the Self-Healing Ability of Mortar Mixtures Containing Superabsorbent Polymers and Nanosilica. *Materials* [interaktyvus]. 2020, 13(2), 380 [žiūrėta 2020-05-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma13020380>
20. LI D., B. CHEN, X. CHEN, B. FU, H. WEI, X. XIANG. Synergetic effect of superabsorbent polymer (SAP) and crystalline admixture (CA) on mortar macro-crack healing. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 247, 118521 [žiūrėta 2020-05-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118521>
21. JIANG Z., W. LI, Z. YUAN. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2015, 57, 116-127 [žiūrėta 2020-03-19]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.014>
22. PARK B., Y. C. CHOI. Investigating a new method to assess the self-healing performance of hardened cement pastes containing supplementary cementitious materials and crystalline admixtures. *Journal of Materials Research and Technology* [interaktyvus]. 2019, 8 (6), 6058-6073 [žiūrėta 2020-03-20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.080>
23. VAN TITTELBOOM K., N. DE BELIE. Self-Healing in Cementitious Materials – A Review. *Materials* [interaktyvus]. 2013, 6 (6), 2182-2217 [žiūrėta 2020-03-19]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
24. ROIG-FLORES M., F. PIRRITANO, P. SERNA, L.FERRARA. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack

- closing tests. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2016, 114, 447-457 [žiūrėta 2020-03-19]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196>
25. KOLLEK J. J. The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation. *Materials and Structures* [interaktyvus]. 1989, 22, 225-230 [žiūrėta 2020-03-19]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/BF02472192>
 26. *ASTM C1585-13. Standart Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes* [interaktyvus]. 1996-2020 [žiūrėta 2020-03-19]. Prieiga per: <https://www.astm.org/Standards/C1585>
 27. SINGH N. B. The Activation Effect of K_2SO_4 on the Hydration of Gypsum Anhydrite, $CaSO_4(II)$. *Journal of the American Ceramic Society* [interaktyvus]. 2004, 88, 1 [žiūrėta 2020-11-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00020.x>
 28. ШУХОВА В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ в технологии получения ангидритовых вяжущих. *ВЕСТНИК БЕЛГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Г. ШУХОВА* [interaktyvus]. 2017, 2, 12 [žiūrėta 2020-11-07]. Prieiga per: https://doi.org/10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605
 29. NOCUN'-WCZELIK W., Z. KONIK, A. STOK. Blended systems with calcium aluminate and calcium sulphate expansive additives. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2011, 25 (2), 939-943 [žiūrėta 2020-11-08]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.089>
 30. ZHANG S., X. XU, S. A. MEMON, Z. DONG, D. LI, H. CUI. Effect of calcium sulfate type and dosage on properties of calcium aluminate cement-based self-leveling mortar. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, 167, 253-262 [žiūrėta 2020-11-08]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.146>
 31. ALLEVI S., M. MARCHI, F. SCOTTI, S. BERTINI, C. COSENTINO. Hydration of calcium sulphoaluminate clinker with additions of different calcium sulphate sources. *Materials and Structures* [interaktyvus]. 2016, 49, 453-466 [žiūrėta 2020-11-08]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0510-5>
 32. YAPHARY Y. L., Z. YU, R. H. W. LAM, D. LAU. Effect of triethanolamine on cement hydration toward initial setting time. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, 141, 94-103 [žiūrėta 2020-11-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.072>
 33. HAN J., K. WANG, J. SHI, Y. WANG. Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2015, 93, 457-462 [žiūrėta 2020-11-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.018>
 34. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. [ГОСТ 12730.4-78]. *Бетоны. Методы определения показателей пористости = Concretes. Methods of determination of porosity parameters*. Москва: Стандартинформ, 2007.
 35. ЮШКИН Н. П., Н. В. ВОЛКОВА, Г. А. МАРКОВА. *Оптический флюорим* [interaktyvus]. Москва, 1983 [žiūrėta 2020-10-04]. Prieiga per: <https://www.litmir.me/br/?b=576009&p=1>
 36. *DEPARTMENT OF CHEMISTRY. UNIVERSITY OF HONG KONG: Crystallization: Layering* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2020-10-04]. Prieiga per: <http://web.hku.hk/~khlow/Resources/Crystallization/>

Priedai

1 priedas. Cementinės tešlos bandinių su komerciniais mineraliniais priedais plyšio pločio matavimo rezultatai

Bandinys	Plyšio nr.	Plyšio plotis, mm		Užsivėrimo rodiklis	Užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	Standartinis nuokrypis
		Po 0 dienų	Po 83 dienų			
Nuolat vandenyje laikomi bandiniai						
K	1	0,1	0,1* ¹	0,00*	-	-
	2	0,2	0,1*	0,50*		
	3	0,5	0,3*	0,40*		
B	1	0,3	0,3*	0,00*	-	-
	2	0,5	0,4*	0,20*		
	3	0,4	0,4*	0,00*		
S	1	0,1	0,1*	0,00*	-	-
	2	0,2	0,2*	0,00*		
	3	0,7	0,7*	0,00*		
Cikliškai vandenyje laikomi bandiniai						
K	1	0,1	0,1	0,00	0,11	0,19
	2	0,3	0,2	0,33		
	3	0,4	0,4	0,00		
B	1	0,2	0,1	0,50	0,31	0,31
	2	0,4	0,3	0,25		
	3	0,6	0,5	0,17		
S	1	0,1	0,0	1,00	0,67	0,33
	2	0,3	0,1	0,67		
	3	0,3	0,2	0,33		
Daliniai vandenyje laikomi bandiniai (plyšys ant ore esančio paviršiaus)						
K	1	0,3	0,0	1,00	0,67	0,58
	2	0,1	0,0	1,00		
	3	0,5	0,5	0,00		
B	1	0,3	0,1	0,67	0,22	0,38
	2	0,3	0,3	0,00		
	3	0,4	0,4	0,00		
S	1	0,2	0,0	1,00	1,00	0,00
	2	0,2	0,0	1,00		
	3	0,3	0,0	1,00		

¹ * pažymėtos reikšmės gali būti nepatikimos, todėl tolimesnėje analizėje nevertinamos

Bandinys	Plyšio nr.	Plyšio plotis, mm		Užsivėrimo rodiklis	Užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	Standartinis nuokrypis
		Po 0 dienų	Po 83 dienų			
Daliniai vandenyje laikomi bandiniai (plyšys ant vandenyje esančio paviršiaus)						
K	1	0,2	0,2	0,00	0,28	0,25
	2	0,2	0,1	0,50		
	3	0,3	0,2	0,33		
B	1	0,3	0,2	0,33	0,50	0,17
	2	0,3	0,1	0,67		
	3	0,4	0,2	0,50		
S	1	0,2	0,0	1,00	0,83	0,29
	2	0,2	0,1	0,50		
	3	0,2	0,0	1,00		

2 priedas. Cementinės tešlos bandinių su parinktais mineraliniais bei organiniais priedais plyšio pločio matavimo rezultatai

Bandinys	Plyšio nr.	Plyšio plotis, mm		Užsivėrimo rodiklis	Užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	Standartinis nuokrypis
		Po 0 dienų	Po 28 dienų			
Nuolat vandenyje laikomi bandiniai su skeltu plyšiu						
I-3	1	0,1	0,1	0,00	0,11	0,17
	2	0,1	0,1	0,00		
	3	0,2	0,2	0,00		
I-4	1	0,3	0,2	0,33		
	2	0,3	0,3	0,00		
	3	0,3	0,2	0,33		
II-2	1	0,3	0,3	0,00	0,33	0,41
	2	0,3	0,3	0,00		
	3	0,2	0,1	0,50		
II-3	1	0,2	0,2	0,00		
	2	0,2	0,1	0,50		
	3	0,2	0,0	1,00		
III-2	1	0,2	0,1	0,50	0,64	0,43
	2	0,3	0,3	0,00		
	3	0,3	0,2	0,33		
III-3	1	0,1	0,0	1,00		
	2	0,1	0,0	1,00		
	3	0,1	0,0	1,00		
IV-2	1	0,2	0,1	0,50	0,33	0,41
	2	0,2	0,2	0,00		
	3	0,2	0,0	1,00		
IV-3	1	0,2	0,2	0,00		
	2	0,2	0,1	0,50		
	3	0,1	0,1	0,00		
V-2	1	0,3	0,2	0,33	0,58	0,39
	2	0,3	0,1	0,67		
	3	0,2	0,0	1,00		
V-3	1	0,2	0,1	0,50		
	2	0,1	0,1	0,00		
	3	0,2	0,0	1,00		

Bandinys	Plyšio nr.	Plyšio plotis, mm		Užsivėrimo rodiklis	Užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	Standartinis nuokrypis
		Po 0 dienų	Po 28 dienų			
Nuolat vandenyje laikomi bandiniai su lygiu plyšiu						
I-2	1	0,2	0,2	0,00	0,00	0,00
	2	0,2	0,2	0,00		
	3	0,2	0,2	0,00		
II-4	1	0,3	0,3	0,00	0,00	0,00
	2	0,3	0,3	0,00		
	3	0,3	0,3	0,00		
Cikliškai vandenyje laikomi bandiniai						
I-1	1	0,2	0,0	1,00	0,50	0,50
	2	0,2	0,1	0,50		
	3	0,1	0,1	0,00		
II-1	1	0,1	0,0	1,00	1,00	0,00
	2	0,1	0,0	1,00		
	3	0,1	0,0	1,00		
III-1	1	0,4	0,4	0,00	0,08	0,14
	2	0,4	0,3	0,25		
	3	0,4	0,4	0,00		
IV-1	1	0,2	0,2	0,00	0,00	0,00
	2	0,2	0,2	0,00		
	3	0,2	0,2	0,00		
V-1	1	0,2	0,1	0,50	0,50	0,50
	2	0,1	0,1	0,00		
	3	0,2	0,0	1,00		

3 priedas. Cementinės tešlos bandinių su parinktais mineraliniais bei organiniais priedais vandens pralaidumo bandymo rezultatai

Bandinys	Vamzdžio diametras, mm	Vandens tankis, kg/m ³	Pradinis vandens kiekis, g	Pradinis vandens stulpo aukštis, mm	Vandens pralaidumas per 30 min						Užsivėrimo rodiklis	Užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė			
					Vamzdyje likusio vandens kiekis po 0 dienų, g	Likusio vandens stulpo aukštis po 0 dienų, mm	Vandens stulpo aukščio pokytis po 0 dienų, Δh_0 , mm	Vamzdyje likusio vandens kiekis po 28 dienų, g	Likusio vandens stulpo aukštis po 28 dienų, mm	Vandens stulpo aukščio pokytis po 28 dienų, Δh_t , mm					
Nuolat vandenyje laikomi bandiniai															
I-3	105	1000	1000	115	833	96	19	960	111	4	0,76	0,84			
I-4					380	44	71	949	110	5	0,92				
II-2					-	-	-	-	-	-	-	0,72			
II-3					193	22	93	777	90	25	0,72				
III-2					-	-	-	-	-	-	-	0,67			
III-3					801	93	22	935	108	7	0,67				
IV-2					911	105	10	991	114	1	0,90	0,66			
IV-3					16	2	113	428	49	66	0,42				
V-2					-	-	-	-	-	-	-	0,78			
V-3					59	7	108	795	92	23	0,78				
Cikliškai vandenyje laikomi bandiniai															
I-1					105	1000	1000	115	838	97	18	997	115	0	0,98
II-1	440	51	64	697					80	35	0,46	0,46			
III-1	583	67	48	913					105	10	0,79	0,79			
IV-1	711	82	33	716					83	32	0,02	0,02			
V-1	431	50	65	688					79	36	0,45	0,45			

4 priedas. Cementinės tešlos bandinių įgeriamumo kinetikos rezultatai

Bandinys	Bandinio masė, g						Tankis, ρ , kg/m ³	Vandens įgėris, %				W'_{t1}	W'_{t2}	$\bar{\lambda}_1$	α	$\bar{\lambda}$	Poringumas, %		
	saušo, m_s	po 15min, m_{15}	po 60min, m_{60}	po 24h, m_{24}	po 120h, m_{120}	vandenyje, m_v		pagal masę, W_M	pagal tūrį, W_0	po 15 min, W_{t1}	po 60 min, W_{t2}						bendras, P_p	atviras, P_a	uždaras, P_u
I-1	125,21	137,73	141,23	141,98	142,57	75,20	1859	13,86	25,77	10,00	12,79	0,72	0,92	2,50	0,50	6,25	30,91	25,77	5,14
I-2	105,70	116,42	119,30	120,03	120,44	64,22	1880	13,95	26,22	10,14	12,87	0,73	0,92	2,50	0,46	7,33	30,11	26,22	3,86
I-3	119,15	131,13	134,30	135,17	135,67	72,22	1878	13,86	26,04	10,05	12,72	0,73	0,92	2,50	0,46	7,33	30,19	26,04	4,15
I sudėtis, vidurkinės reikšmės							1872,17	13,89	26,01	10,07	12,79	0,72	0,92	2,50	0,47	6,97	30,40	26,01	4,39
II-1	140,08	151,69	155,85	157,99	158,51	84,50	1893	13,16	24,90	8,29	11,26	0,63	0,86	1,95	0,48	4,02	29,64	24,90	4,74
II-2	107,75	117,63	121,27	122,78	123,25	65,45	1864	14,39	26,82	9,17	12,55	0,64	0,87	2,05	0,50	4,20	30,70	26,82	3,88
II-3	118,78	128,90	132,66	134,85	135,37	72,27	1882	13,97	26,29	8,52	11,69	0,61	0,84	1,85	0,48	3,60	30,02	26,29	3,73
II sudėtis, vidurkinės reikšmės							1879,77	13,84	26,00	8,66	11,83	0,63	0,85	1,95	0,49	3,94	30,12	26,00	4,12
III-1	113,81	115,83	116,52	118,97	120,57	58,31	1828	5,94	10,86	1,77	2,38	0,30	0,40	0,50	0,25	0,06	32,05	10,86	21,19
III-2	101,75	103,63	104,36	106,61	108,21	51,78	1803	6,35	11,45	1,85	2,57	0,29	0,40	0,50	0,30	0,10	32,97	11,45	21,52
III-3	113,22	115,00	115,67	117,69	119,78	56,95	1802	5,79	10,44	1,57	2,16	0,27	0,37	0,47	0,30	0,08	33,01	10,44	22,57
III sudėtis, vidurkinės reikšmės							1811,03	6,03	10,92	1,73	2,37	0,29	0,39	0,49	0,28	0,08	32,68	10,92	21,76
IV-1	125,03	133,48	137,60	141,14	141,83	75,07	1873	13,44	25,16	6,76	10,05	0,50	0,75	1,40	0,52	1,91	30,38	25,16	5,21
IV-2	129,92	139,64	144,38	147,38	148,16	78,08	1854	14,04	26,03	7,48	11,13	0,53	0,79	1,55	0,52	2,32	31,08	26,03	5,06
IV-3	119,49	128,81	133,14	135,69	136,34	71,78	1851	14,10	26,10	7,80	11,42	0,55	0,81	1,65	0,52	2,62	31,20	26,10	5,10
IV sudėtis, vidurkinės reikšmės							1859,18	13,86	25,76	7,35	10,87	0,53	0,78	1,53	0,52	2,28	30,89	25,76	5,12
V-1	119,76	124,52	126,86	134,31	136,22	68,56	1770	13,74	24,33	3,97	5,93	0,29	0,43	0,57	0,35	0,20	34,20	24,33	9,87
V-2	119,14	124,32	126,63	133,87	135,37	68,30	1776	13,62	24,20	4,35	6,29	0,32	0,46	0,62	0,35	0,26	33,96	24,20	9,77
V-3	110,09	114,63	116,70	123,57	125,14	63,13	1775	13,67	24,27	4,12	6,00	0,30	0,44	0,58	0,35	0,21	34,00	24,27	9,73
V sudėtis, vidurkinės reikšmės							1773,91	13,68	24,27	4,15	6,07	0,30	0,44	0,59	0,35	0,22	34,06	24,27	9,79

5 priedas. Betono bandinių gniuždomojo stiprio ir tankio nustatymo rezultatai

Bandinys	Bandinio paviršiaus matmenys viršuje ir apačioje, mm		Bandinio paviršiaus plotas, mm ²	Bandinio paviršių plotų vidurkis, mm ²	Bandinio aukštis, mm	Bandinio tūris, mm ³	Bandinio svoris, g	Bandinio suirimo jėga, kN	Bandinio gniuždomasis stipris, MPa	Vidutinis betono gniuždomasis stipris, MPa	Bandinio tankis, kg/m ³	Vidutinis betono tankis kg/m ³
	a	b										
I-1	100,16	100,43	10059,07	10102,94	101,46	1025044,19	2450,0	663,0	65,6	66,3	2390,1	2385,4
	101,59	99,88	10146,81									
I-2	99,20	100,25	9944,80	10041,23	101,52	1019386,06	2426,8	671,8	66,9	66,3	2380,6	2385,4
	102,38	99,02	10137,67									
II-1	99,80	100,71	10050,86	10204,43	100,23	1022790,02	2463,7	765,9	75,1	75,6	2408,8	2426,6
	102,86	100,70	10358,00									
II-2	100,35	100,22	10057,08	10061,30	100,33	1009450,65	2467,5	766,1	76,1	75,6	2444,4	2426,6
	99,57	101,09	10065,53									
III-1	100,43	99,44	9986,76	10046,84	100,61	1010812,54	2439,2	688,8	68,6	68,0	2413,1	2416,5
	99,93	101,14	10106,92									
III-2	97,55	100,21	9775,49	9901,08	100,63	996345,66	2411,1	668,2	67,5	68,0	2419,9	2416,5
	101,30	98,98	10026,67									
IV-1	101,05	101,06	10212,11	10235,44	100,77	1031425,02	2490,0	677,5	66,2	67,7	2414,1	2410,5
	102,24	100,34	10258,76									
IV-2	100,08	101,11	10119,09	10221,28	100,96	1031940,06	2483,8	708,4	69,3	67,7	2406,9	2410,5
	101,94	101,27	10323,46									
V-1	100,24	99,03	9926,77	10039,03	100,29	1006813,87	2403,9	646,1	64,4	64,7	2387,6	2379,6
	100,22	101,29	10151,28									
V-2	101,57	100,68	10226,07	10184,66	100,57	1024270,93	2429,2	661,7	65,0	64,7	2371,6	2379,6
	101,23	100,20	10143,25									

Bandinys	Bandinio paviršiaus matmenys viršuje ir apačioje, mm		Bandinio paviršiaus plotas, mm ²	Bandinio paviršių plotų vidurkis, mm ²	Bandinio aukštis, mm	Bandinio tūris, mm ³	Bandinio svoris, g	Bandinio suirimo jėga, kN	Bandinio gniuždomasis stipris, MPa	Vidutinis betono gniuždomasis stipris, MPa	Bandinio tankis, kg/m ³	Vidutinis betono tankis kg/m ³
	a	b										
VI-1	101,34	98,84	10016,45	10113,09	100,60	1017376,43	2419,6	708,6	71,1	69,0	2378,3	2381,2
	101,65	100,44	10209,73									
VI-2	101,39	103,40	10483,73	10257,37	101,31	1039174,65	2477,6	696,6	67,9	69,0	2384,2	2381,2
	100,14	100,17	10031,02									

6 priedas. Skelto plyšio bandinių vandens pralaidumo bandymo rezultatai

Bandinys	Vamzdžio diametras, mm	Vandens tankis, kg/m ³	Vandens pralaidumas per 5 min																					
			po 0 parų		po 7 parų					po 14 parų					po 21 paros					po 28 parų				
			išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis
I-1	105	1000	1743	201	1610	186	0,08	0,08	-	1586	183	0,09	0,09	-	1584	183	0,09	0,09	-	1189	137	0,32	0,32	-
II-1			3943	455	3742	432	0,05	0,03	0,03	3703	428	0,06	0,04	0,03	3684	425	0,07	0,06	0,01	3239	374	0,18	0,19	0,02
II-2			3201	370	3181	367	0,01			3121	360	0,02			3017	348	0,06			2544	294	0,21		
III-1			3804	439	3795	438	0,00	0,03	0,05	3796	438	0,00	0,06	0,08	3740	432	0,02	0,09	0,10	3303	381	0,13	0,27	0,19
III-2			1016	117	948	109	0,07			893	103	0,12			855	99	0,16			606	70	0,40		
IV-1			2484	287	2470	285	0,01	0,02	0,01	2418	279	0,03	0,03	0,01	2403	278	0,03	0,03	0,00	1928	223	0,22	0,21	0,02
IV-2			1484	171	1446	167	0,03			1433	165	0,03			1431	165	0,04			1190	137	0,20		
V-1			3498	404	3418	395	0,02	0,03	0,01	3399	393	0,03	0,04	0,02	3351	387	0,04	0,06	0,02	2849	329	0,19	0,32	0,18
V-2			684	79	655	76	0,04			643	74	0,06			635	73	0,07			379	44	0,45		
VI-1			2451	283	2448	283	0,00	0,12	0,17	2406	278	0,02	0,15	0,19	2360	273	0,04	0,18	0,20	2008	232	0,18	0,38	0,28
VI-2			710	82	537	62	0,24			509	59	0,28			486	56	0,32			301	35	0,58		

7 priedas. Lygaus plyšio bandinių vandens pralaidumo bandymo rezultatai

Bandinys	Vamzdžio diametras, mm	Vandens tankis, kg/m ³	Vandens pralaidumas per 10 min																					
			po 0 parų		po 7 parų				po 14 parų				po 21 paros				po 28 parų							
			išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis	išbėgusio vandens kiekis, g	vandens stulpo aukščio pokytis, mm	užsivėrimo rodiklis	užsivėrimo rodiklio vidutinė vertė	standartinis nuokrypis
I-1	45	1000	377	237	230	145	0,39	0,54	0,40	222	140	0,41	0,70	0,29	114	72	0,70	0,83	0,16	34	21	0,91	0,91	0,08
I-2			398	250	0	0	1,00			0	0	1,00			0	0	1,00			0	0	1,00		
I-3			260	163	199	125	0,23			78	49	0,71			55	35	0,79			44	28	0,83		
I-4 ¹			8	5	0	0	1,00	-	-	0	0	1,00	-	-	0	0	1,00	-	-	0	0	1,00	-	-
II-1			262	165	167	105	0,36	0,63	0,29	29	18	0,89	0,82	0,16	0	0	1,00	0,88	0,14	0	0	1,00	0,92	0,11
II-2			429	270	123	77	0,71			104	65	0,76			83	52	0,81			50	31	0,88		
II-3			444	279	255	160	0,43			159	100	0,64			122	77	0,73			98	62	0,78		
II-4			154	97	0	0	1,00			0	0	1,00			0	0	1,00			0	0	1,00		

¹ Duomenys nepatikimi ir bendroje analizėje nevertinami