



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Technologinių priedų koncentracijos įtaka torkretbetonio ilgaamžiškumo savybėms

Baigiamasis magistro projektas

Jūratė Krugelytė

Projekto autorė

Doc. dr. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Technologinių priedų koncentracijos įtaka torkretbetonio ilgaamžiškumo savybėms

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Jūratė Krugelytė

Projekto autorė

Doc. dr. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Doc. dr. Audrius Grinys

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Jūratė Krugelytė

Technologinių priedų koncentracijos įtaka torkretbetonio ilgaamžiškumo savybėms

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Jūratės Krugelytės, baigiamasis projektas tema „Technologinių priedų koncentracijos įtaka torkretbetonio ilgaamžiškumo savybėms“ 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.): KONSTRUKCIJŲ IŠ TORKRETBETONIO
ĮRENGIMAS IR ILGAAMŽIŠKUMO TYRIMAI

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-21

(lietuvių k.): TECHNOLOGINIŲ PRIEDŲ KONCENTRACIJOS ĮTAKA TORKRETBETONIO
ILGAAMŽIŠKUMO SAVYBĖMS

(anglų k.): INFLUENCE OF CONCENTRATION OF TECHNOLOGICAL ADDITIVES ON THE
DURABILITY PROPERTIES OF SHOTCRETE

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. Ernestas Ivanauskas* _____
(indėlis _____ %) _____ *pareigos, vardas, pavardė* _____ *parašas*

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

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

Studentas: _____ *Jūratė Krugelytė* _____
_____ *vardas, pavardė* _____ *parašas*

Krugelytė Jūratė. Technologinių priedų koncentracijos įtaka torkretbetonio ilgaamžiškumo savybėms. Magistro baigiamasis projektas / vadovas / doc. dr. Ernestas Ivanauskas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: torkretbetonis, greitiklis, ilgaamžiškumas, poringumas, purškiamas betonas.

Kaunas, 2021. 48 p.

Santrauka

Dėl didelės medžiagų transportavimo kainos, torkretavimo technologija yra retai pasirenkamas statybos būdas Lietuvoje. Vietinių žaliavų panaudojimas tokio tipo betono gamybai išspręstų šią problemą ir leistų tobulinti bei populiarinti torkretavimo technologiją.

Baigiamajame magistro projekte yra tiriamos torkretbetonio, pagaminto iš vietinių žaliavų, ilgaamžiškumo savybės. Darbe siekiama išanalizuoti greitiklio daromą įtaką medžiagos poringumui, fizikinėms, mechaninėms savybėms bei atsparumą šalčiui ir armatūros korozijai. Darbą sudaro trys pagrindinės dalys: literatūros duomenų analizė, torkretbetonio tyrimų metodikos, rezultatai ir jų aptarimas.

Teorinėje dalyje yra išanalizuojamos galimos torkretbetonio mišinio gamybos technologijos ir naudotinos medžiagos. Taip pat šioje dalyje aptariami mokslininkų atlikti tyrimai, kuriuose lyginamos įprasto ir purškiamo betono savybės.

Antroje dalyje aprašoma, kaip, siekiant nustatyti greitiklio kiekio daromą poveikį medžiagos ilgaamžiškumui, yra atliekamas torkretbetonio atsparumo šalčiui, atsparumo korozijai, vandens nelaidumo, vandens įgėrio bei poringumo nustatymas. Taip pat šioje dalyje aprašoma gniuždomojo stiprio ir tankio nustatymo metodika, pateikiamos bandymui naudojamos medžiagos ir jų koncentracija.

Trečioje dalyje pateikiami bei išnagrinėjami bandymų rezultatai, grafiškai palyginami laboratorinėmis ir gamybinėmis sąlygomis pagaminto torkretbetonio struktūros parametrai. Atlikus tyrimus nustatyta, jog torkretbetonio ilgalaikiškumo savybės yra susijusios su į mišinį įdėtu greitiklio kiekiu. Per didelis priedo kiekis gali lemti pastebimą gniuždomojo stiprio ir tankio sumažėjimą, padidinti įgeriamumą ir atvirą poringumą.

Darbo apimtis: 48 puslapiai teksto, 36 iliustracijos, 16 lentelių ir 43 literatūros šaltiniai.

Krugelytė Jūratė. Influence of Concentration of Technological Additives on the Durability Properties of Shotcrete. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Ernestas Ivanauskas; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: shotcrete, accelerator, durability, porosity, sprayed concrete.

Kaunas, 2021. 48 p.

Summary

Due to the high cost of material transportation, shotcrete technology is a rarely chosen construction method in Lithuania. The use of local raw materials for production of this type of concrete would solve this problem and allow to improve and popularize shotcrete technology.

The final master's thesis investigates the durability properties of shotcrete made from local raw materials. The aim of the thesis is to analyze the influence of the accelerator on the porosity, physical and mechanical properties of the material, freeze-thaw and corrosion resistance. The thesis consists of three main parts: literature review, research methodologies, results and their discussion.

In the theoretical part, the possible production technologies of shotcrete mixture and the materials are analyzed. Also, in this section the properties of Cast-in-Place and sprayed concrete are compared.

The second part describes how the freeze-thaw resistance, corrosion resistance, water permeability, water absorption and porosity test is performed to determine effect of the amount of accelerator on the shotcrete durability. This section also describes the procedure for determining the compressive strength and density, the test materials and their concentrations.

In the third part, the test results are presented and analyzed. The structural parameters of shotcrete produced in laboratory and sprayed on site are graphically compared. Studies have shown that the durability properties of shotcrete are related to the amount of accelerator added to the mix. High levels of additive can lead to a noticeable decrease in compressive strength and density, increase absorption and effective porosity.

Thesis consists of 48 pages of text, 36 figures, 16 tables, 43 references.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas.....	9
Įvadas	11
1. Literatūros duomenų analizė.....	12
1.1. Torkretbetonio konstrukcijų įrengimas ir panaudojimas.....	12
1.1.1. Architektūra	12
1.1.2. Nauji statiniai	12
1.1.3. Paviršių remontas ir konstrukcijų stiprinimas	13
1.1.4. Įrengimo būdai	13
1.2. Medžiagos.....	14
1.2.1. Cementas ir mikroužpildai.....	14
1.2.2. Cheminiai priedai	17
1.2.3. Užpildai	19
1.2.4. Užpildų iš gumos trupinių panaudojimas torkretbetonio gamybai	20
1.2.5. Stambių perdirbto betono užpildų panaudojimas torkretbetonio gamybai.....	21
Literatūros apžvalgos išvados.....	22
2. Torkretbetonio tyrimų bandymai	23
2.1. Žaliavos ir bandinių sudėtys	23
2.2. Bandinių sudarymas	24
2.3. Tyrimų metodikos	24
2.3.1. Gniuždymo stiprio nustatymas	24
2.3.2. Atsparumo šalčiui bandymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu.....	25
2.3.3. Vandens įsiskverbimo gylio veikiant slėgiui bandymas	25
2.3.4. Vandens įgėrio ir įgėrio kinetikos nustatymas.....	26
2.3.5. Torkretbetonio tankio nustatymas.....	26
2.3.6. Torkretbetonio poringumo nustatymas.....	26
2.3.7. Atsparumo šalčiui vertinimas ir prognozavimas pagal poringumą.....	27
2.3.8. Chloridų jonų prasiskverbimo bandymas	28
3. Rezultatai.....	30
3.1. Torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai.....	30
3.2. Atsparumo šalčiui bandymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu.....	32
3.3. Vandens įsiskverbimo gylio veikiant slėgiui bandymas	34
3.4. Vandens įgėrio ir įgėrio kinetikos nustatymas.....	35
3.5. Torkretbetonio tankio nustatymas.....	37
3.6. Torkretbetonio poringumo nustatymas ir atsparumo šalčiui vertinimas	38
3.7. Chloridų jonų prasiskverbimo bandymas	42
Išvados.....	44
Literatūros sąrašas.....	46

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtingų technologijų įprasta mišinio sudėtis [5].....	14
2 lentelė. Purškiamo ir įprasto betono su mikro užpildais gniuždomojo stiprio rezultatai [20]	16
3 lentelė. Torkretbetonio rišimosi greitikliai	17
4 lentelė. Purškiamo ir įprastai klojamo betono vandens įgėrio ir tūrinio poringumo bandymų rezultatai [20].....	17
5 lentelė. Slankumo bandymo rezultatai [27]	20
6 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai [27]	20
7 lentelė. Šviežio betono charakteristikos [29]	22
8 lentelė. Bandinių žymėjimas	23
9 lentelė. Sika® Sigunit© techniniai duomenys	24
10 lentelė. Statybos aikštelėje purkštų torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai	30
11 lentelė. Laboratorijoje formuotų torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai	30
12 lentelė. Torkretbetonio bandinių masės nuostoliai po tūrinio užšaldymo ir atšildymo bandymo	32
13 lentelė. Torkretbetonio bandinių vandens įgėrio rezultatai.....	35
14 lentelė. Torkretbetonio bandinių purkštų statybvietėje poringumo parametrai ir prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais	39
15 lentelė. Torkretbetonio bandinių gamintų įprastu būdu laboratorijoje poringumo parametrai ir prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais.....	40
16 lentelė. Chloridų jonų difuzijos koeficientas	42

Paveikslų sąrašas

1 pav. Monolitinio gelžbetonio kupolo įrengimas [4]	12
2 pav. Šlapio ir sauso torkretbetonio mišinio tiekimo būdai [11]	13
3 pav. Torkretavimas nuotoliniu būdu valdomu purškimo įrenginiu	14
4 pav. Torkretbetonio mišinio rišimosi laikas priklausomai nuo vandens ir rišiklio santykio ir lakiųjų pelenų kiekio. PS1, PS2, PS3 mišiniuose lakiųjų pelenų kiekis pastovus [18]	15
5 pav. 3 medžiagų mikroskopinis vaizdas: a) lakieji pelenai; b) didelio aktyvumo metakaolinas; c) silicio dulkės [19]	16
6 pav. Purškiamo betono, panardinto į prisotintą $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tirpalą (a) ir į Na_2SO_4 tirpalą (b), gniuždymo jėga po 28, 91, 182 ir 270 dienų [23]	18
7 pav. a) įprastas betonas; b) torkretbetonis su orą įtraukiančiu priedu [23]	19
8 pav. Betoninių kubelių su skirtingų frakcijų gumos užpildais gniuždomasis stipris praėjus 24 val. Juodi taškai rodo išmatuotų verčių vidurkį. Taškinė linija yra 30 % sumažėjimo riba, lyginant su etaloniniais bandiniais, kuriuos pateikė pramonės partneris, o punktyrinė linija yra J2 kreivės tipo nustatyta riba tam tikram 24 val. betono amžiui [28]	21
9 pav. Torkretbetonio mišinio bandiniai: a) bandiniai purkšti statybvietėje; b) bandiniai formuoti įprastu būdu laboratorijoje	23
10 pav. Betono atsparumo šalčiui priklausomybė nuo įtraukto oro kiekio	28
11 pav. Chloridų penetracijos bandymo schema [41]	28
12 pav. Chloridų įsiskverbimo gylio matavimo schema [41]	29
13 pav. Laboratorijoje formuotų torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas	30
14 pav. Statybvietėje purkštų bandinių gniuždomojo stiprio po 28 kietėjimo parų priklausomybė nuo greitiklio kiekio	31
15 pav. Gniuždomojo stiprio po 28 kietėjimo parų priklausomybė nuo greitiklio kiekio ir betonavimo technologijos	31
16 pav. Laboratorijoje formuotų bandinių gniuždomasis stipris po 1 ir 28 kietėjimo paros	32
17 pav. Bandiniai po tūrinio šaldymo ir atšildymo bandymo	33
18 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po atsparumo šalčiui bandymo	33
19 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po atsparumo šalčiui bandymo	34
20 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po atsparumo šalčiui bandymo	34
21 pav. Masinio vandens įgėrio priklausomybė nuo greitiklio kiekio	36
22 pav. Bandinių pagamintų statybų aikštelėje įgėrio kinetikos grafikas	36
23 pav. Torkretbetonio bandiniai vandens įgėrio bandymui: a) į keturias dalis perskelti cilindro formos bandiniai; b) bandiniai mirkomi 20 °C vandenyje	37
24 pav. Bandinių pagamintų laboratorijoje įgėrio kinetikos grafikas	37
25 pav. Tankio priklausomybė nuo greitiklio kiekio	38
26 pav. Torkretbetonio bandinių svėrimas vandenyje	38
27 pav. Gamybinėmis sąlygomis gamintų bandinių vidutinio porų dydžio rodiklis λ	39
28 pav. Gamybinėmis sąlygomis gamintų bandinių porų vienodumo rodiklis α	40
29 pav. Torkretbetonio bandinių purkštų statybos aikštelėje poringumo priklausomybė nuo greitiklio kiekio	40
30 pav. Torkretbetonio bandinių, gamintų įprastu būdu laboratorijoje, poringumo priklausomybė nuo greitiklio kiekio	41
31 pav. Torkretbetonio bandinių su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu poringumo priklausomybė nuo gaminimo technologijos	41

32 pav. Laboratorinėmis sąlygomis gamintų bandinių vidutinio porų dydžio rodiklis λ	42
33 pav. Laboratorinėmis sąlygomis gamintų bandinių porų vienodumo rodiklis α	42
34 pav. Tirta II sudėties bandinio bandomasis paviršius	43
35 pav. Tirta IV sudėties bandinio bandomasis paviršius	43
36 pav. Tirta V sudėties bandinio bandomasis paviršius	43

Įvadas

Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų įrengimas jas torkretuojant tampa žinomesniu, tačiau dėl didelės kainos vis dar retai pasirenkamu statybos būdu Lietuvoje. Torkretavimas – tai ne tik patogus ir greitas paviršių remonto sprendimas, bet ir racionalus sudėtingų formų konstrukcijų įrengimas. Betonavimas nenaudojant klojinių nevaržo architektūrinių užmojų, leidžia greitai, nenaudojant papildomo tankinimo įrengti laikančiąsias konstrukcijas ar dėl plačių techninių galimybių panaudoti torkretbetonį kaip apdailinę medžiagą.

Į Lietuvą torkretavimui naudojami statybos produktai atsivežami iš svetur ir dėl to ši technologija neekonomiška. Tuo tarpu pasaulyje mišiniai torkretbetoniui gaminami iš vietinių žaliavų – žvirgždo, smėlio, cemento. Siekiant užtikrinti aukštus kokybės, sąnaudų efektyvumo ir sveikatos apsaugos reikalavimus torkretbetonio mišiniai tiriami ir tobulinami daugelio mokslininkų. Analizuojant literatūrą galima rasti užsienio mokslininkų atliktų torkretbetonio savybių tyrimų, skirtingų mišinio optimizavimo alternatyvų, torkretavimo proceso tobulinimo sprendimų. Tačiau nėra duomenų, kad tokie tyrimai buvo atlikti Lietuvoje iš vietinių žaliavų pagamintam torkretbetoniui.

Kokybiškam betono purškimui ypač svarbus tinkamas mišinio įmaišų bei jų kiekio parinkimas. Reikiamo storio torkretbetonio sluoksnio, purškiamo ant horizontalių ar vertikalinių paviršių, užtikrinimui reikalingas greitas mišinio rišimasis ir ankstyvas stiprumas. Šioms savybėms pasiekti yra naudojami rišimosi ir kietėjimo greitikliai. Greitikliai – tai rišamųjų medžiagų kietėjimo reakcijas skatinantys cheminiai junginiai. Mokslinėje literatūroje yra kalbama apie šio technologinio priedo įtaką sukietėjusios medžiagos struktūrai ir savybėms, todėl jo kiekis projektuojamame mišinyje turi būti optimizuotas, jog būtų gaunamas mažiausias neigiamas poveikis medžiagos ilgalaikiškumui.

Baigiamojo magistro projekto tikslas – naudojant vietines žaliavas pagaminti torkretbetonį ir įvertinti jo savybes.

Uždaviniai:

1. atlikti literatūros analizę apie galimas torkretbetonio gamybos technologijas ir naudotinas medžiagas;
2. atlikti laboratorinėmis ir gamybinėmis sąlygomis pagaminto torkretbetonio struktūros analizę, įvertinant jo ilgaamžiškumą (poringumą, atsparumą šalčiui, armatūros korozijai ir kt.);
3. nustatyti, kokią įtaką torkretbetonio fizikinėms ir mechaninėms savybėms daro skirtinga greitiklio koncentracija.

1. Literatūros duomenų analizė

1.1. Torkretbetonio konstrukcijų įrengimas ir panaudojimas

Torkretbetonis arba purškiamas betonas – tai betonavimo technologija, kai torkretbetonio mišinys suslėgtu oru užpurškiamas ant įvairių paviršių. Torkretuojant remontuojami betoniniai paviršiai, stabilizuojami šlaitai, įrengiamos naujos betoninės ar gelžbetoninės konstrukcijos.

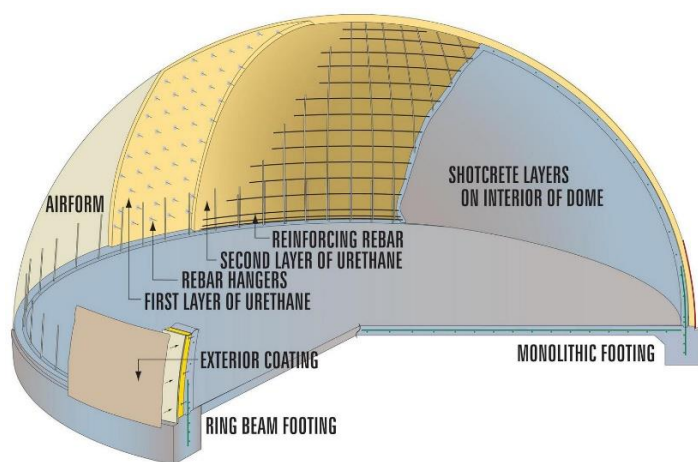
Betono mišinio purškimo technologija buvo išrasta 1909 metais gamtininko, profesoriaus Karlo Akeley. Tuo metu torkretavimas buvo skirtas didelių gyvūnų iškamšoms gaminti. Po metų parodoje pristatyta purškimo technologija ir įrenginys patyrė sėkmę ir tapo statyboje naudojamu įrankiu. Bėgant laikui dėl skirtingų purškimo metodų išradimo, betono mišinio, mechanizmų pažangos išaugo galimybė panaudoti torkretbetonį skirtingose statybos pramonės srityse.

1.1.1. Architektūra

Torkretbetonis yra universali medžiaga ir vienas iš geriausių sprendimų norint įgyvendinti architektų vizijas. Lenktos, neapibrėžtos formos išgaunamos greičiau ir kartais pigiau nei naudojant įprastas technologijas. Betoną purškiant gaunamas estetiškesnis, vientisesnis konstrukcijos vaizdas, t. y. betoniniame paviršiuje nelieka klojinių siūlių. Dabar populiariau naudoti įvairius raštus, išspaudžiamus dar nesustingusiame betono paviršiuje. Naudojant torkretbetonį galima išgauti norimą tekstūrą ir faktūrą, sukurti itin natūralų, susiliejančią su aplinka, vaizdą. Į torkretbetonio kaip ir įprasto betono mišinį galima įmaišyti pigmentus ir taip pasiekti išskirtinį rezultatą.

1.1.2. Nauji statiniai

Vis dažniau torkretavimas pasitelkiamas ne kaip konstrukcijų remonto sprendimas, bet naujų antžeminių ir požeminių statinių statybos technologija. Torkretuojant greitai įrengiami didelių plotų statiniai, tokie kaip: masyvūs pamatai, rezervuarai, tuneliai, atraminės sienutės, daromi ugniai atsparūs arba hidroizoliaciniai sluoksniai [1, 2]. Torkretbetonis taip pat plačiai naudojamas įrengiant sudėtingos formos baseinus, riedučių, dviračių parkus ar net uolų imitacijas zoologijos soduose. Konstrukcijoms iš torkretbetonio įrengti naudojami vienpusiai klojiniai arba betonuojama visai be jų. Pavyzdžiui, kupolams statyti naudojama PVC forma, kuri pripučiama ir ant jos iš vidaus užpurškiamas torkretbetonio mišinys. PVC membrana galiausiai lieka kaip hidroizoliacinė plėvelė [3, 4]. Tai modernus ir tvarus statybos metodas.



1 pav. Monolitinio gelžbetonio kupolo įrengimas [4]

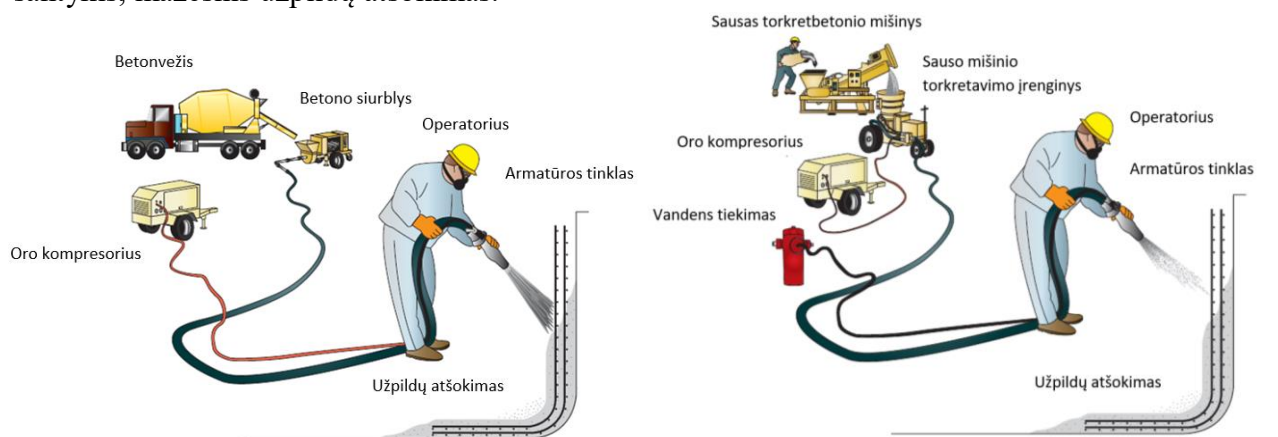
1.1.3. Paviršių remontas ir konstrukcijų stiprinimas

Vienas iš ekonomiškiausių ir efektyviausių būdų betoninių konstrukcijų remontui yra torkretavimas. Remonto ar stiprinimo darbai apima užtvankų, tiltų, tunelių, vandens tiekimo ir valymo sistemų, beveik bet kokių betoninių konstrukcijų atnaujinimą. Torkretavimas taikomas korozijos, ugnies pažeistoms konstrukcijoms, torkretuojant užtaisomi plyšiai ir sandūros. Dėl gero sukibimo su uoliena ir didelio stiprumo šlyčiai torkretavimas plačiai naudojamas stabilizuojant šlaitus [5]. Kartu su torkretbetonu šlaitų sutvirtinimui naudojami inkariniai varžtai bei į mišinį įmaišomas plieno pluoštas [6]. Torkretuojant pratęsiama konstrukcijos naudojimo laikas nepatiriant išlaidų, kurios atsirastų dėl konstrukcijos griovimo ir atstatymo darbų.

Daugeliu atveju torkretbetonio sukibimas su paviršiumi yra viena iš svarbiausių savybių stiprinant konstrukcijas nauju betono sluoksniu. Paviršių sukibimas dėl dalelių sąveikos vadinamas adhezija. Torkretuojant sukibimo stiprumas priklauso nuo paviršiaus paruošimo (nuvalymo), jo šiurkštumo, uolienu mineralinės sudėties ir purškimo technikos. Malmgreno ir bendraautorii [7] atliktų bandymų rezultatai rodo, jog betoninės sienos sukibimo stipris pastebimai didesnis, kai ši valoma 21 MPa vandens slėgiu, nei kai ši valoma 0,7 MPa vandens slėgiu. Tyrimo metu šie mokslininkai taip pat pastebėjo, jog mažesni nei 20 mm torkretbetonio sluoksniai gerai nesukimba su torkretuojamu paviršiumi, todėl jų reiktų vengti. Kimo ir kt. mokslininkų [8] atlikto tyrimo metu, nustatyta jog sukibimo stiprumui įtakos taip pat turi ir rūgščių bei sulfatų poveikis. Šaltinyje teigiama, jog sukibimo su paviršiumi stiprumas mažėja, mažėjant rūgšties tirpalo pH bei didėjant sulfatų tirpalo koncentracijai.

1.1.4. Įrengimo būdai

Dažniausiai torkretbetonio konstrukcijos įrengiamos betonuojant sauso arba šlapio mišinio tiekimo metodais. Statybose taip pat naudojamas tarpinis torkretavimo metodas, kai torkretbetonio mišinys yra drėgnas, t. y. su natūralaus drėgnio užpildais. Pagrindinis sauso ir drėgno procesų skirtumas yra vandens pridėjimo į mišinį laikas. Torkretuojant šlapio mišinio procesu, visos mišinio sudedamosios dalys sumaišomos dar prieš jį pumpuojant žarna. Torkretuojant sauso mišinio tiekimo metodu, visos kietos medžiagos (žvyras, smėlis, cementas, priedai, pluoštai) sumaišomos ir žarna transportuojamos suslėgtu oru. Vanduo į mišinį įmaišomas tik purškimo antgalyje [9]. Abu metodai turi savo pranašumų ir technologijos parinkimas priklauso nuo taikymo srities. Sauso mišinio tiekimo metodas tinkamas ten, kur reikalingas purškimas su pertraukomis [10]. Tuo tarpu šlapio mišinio tiekimo technologija labiau tinkama dideliems purškimo plotams, taip pat ten, kur reikalingas tikslus V/C santykis, mažesnis užpildų atšokimas.



2 pav. Šlapio ir sauso torkretbetonio mišinio tiekimo būdai [11]

Torkretbetonis gali būti purškiamas rankiniu būdu arba nuotoliniu būdu valdomu purškimo įrenginiu.



3 pav. Torkretavimas nuotoliniu būdu valdomu purškimo įrenginiu

1 lentelė. Skirtingų technologijų įprasta mišinio sudėtis [5]

Komponentai	Kiekis / m ³	Komponentai	Kiekis / m ³
Šlapio mišinio tiekimo technologija		Sauso mišinio tiekimo technologija	
Cementas (kg)	335	Cementas (kg)	420
Lakieji pelenai (kg)	85	Silicio dioksido mikrodulkės (kg)	50
10 mm stambūs užpildai (kg)	610	7 mm užpildai (kg)	350
Stambus smėlis (kg)	585	Stambus smėlis (kg)	755
Smulkus smėlis (kg)	530	Smulkus smėlis (kg)	625
Plastikliai (litrais)	1,6	Plieno pluoštas (kg) arba	30–40
Superplastikliai (litrais)	1,0	Makro sintetinis pluoštas (kg)	5–8
Orą įtraukiantys priedai (litrais)	0,1	Greitklis (litrais)	20
Vanduo (litrais)	200	Vanduo (litrais)	150–200

1.2. Medžiagos

Torkretbetonio mišinio savybės ir konstrukcijų kokybė priklauso nuo jam pagaminti naudojamų žaliavų, įmaišų ir jų proporcijų. Atitinkančios LST EN 14487-1 standartą [12], mišinio sudedamosios dalys turi būti tokios, kad nepakenktų betono patvarumui ar nesukeltų armatūros korozijos. Mišinio sudėtis turi būti projektuojama, atsižvelgiant į pageidaujamas šviežios ir sukietėjusios medžiagos savybes, kurias parenkamos pagal konstrukcijos paskirtį, dydį, elementų formą, purškimo proceso metodą bei pasirinktą įrangą [13]. Dažniausiai torkretbetonio mišinį sudaro cementas, smėlio ir žvyro mišinys, vanduo ir priedai, taip pat dažnai naudojamas pluoštas. Pagrindiniai įprasto ir purškiamo betono mišinio skirtumai yra užpildų dydis, vandens ir rišančiosios medžiagos santykis, tam tikrų technologinių priedų parinkimas [5].

1.2.1. Cementas ir mikroužpildai

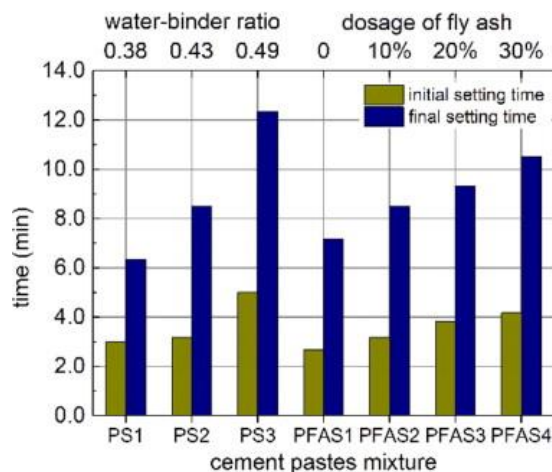
Dažniausiai purškiamam betono mišiniui gaminti naudojamas 42,5N arba 52,5R klasės portlandcementis (CEM1). Jo kiekis mišinyje, priklausomai nuo purškimo metodo ir reikalavimų

torkretbetoniui – 300–500 kg/m³ [14]. Portlandcementis – tai hidraulinė rišančioji medžiaga. Lietuvoje ji gaminama iš vietinių žaliavų – klinčių ir molio.

Siekiant mažinti portlandcemenčio gamybos išlaidas, dalį cemento klinkerio bandoma pakeisti aukštakrosnių šlakais, pucolaniniais priedais ar klintimis. Šie priedai ne tik gerina torkretbetonio savybes. Kalbant apie tvarias medžiagas, portlandcementą pakeičiančių medžiagų, gautų iš kitų pramonės šakų šalutinių produktų, naudojimas mažina CO₂ emisiją [3, 11]. Šie betono pramonėje naudojami aktyvieji mineralai yra pripažinti ir naudojami dėl dviejų pagrindinių priežasčių: priedai pagerina mišinio granulimetrinę sudėtį, dėl to jo tankis padidėja, o vandens poreikis mažėja [15]. Taip pat aktyviesiems mineralams reaguojant su cemento hidratacijos produktais, susidaro papildomi cementiniai junginiai, kurie turi teigiamą įtaką betono mikrostruktūrai ir mechaninėms savybėms [16].

Silicio dioksido (SiO₂) mikrodulkės – dažniausiai naudojamas torkretbetonio mišinio priedas. Tai labai smulkūs, bespalviai (arba balti) milteliai, dažniausiai sudaryti iš amorfinės SiO₂ atmainos. Betonas su šiuo priedu ne tik pasižymi dideliu stiprumu ir patvarumu, bet ir mažesniu pralaidumu vandeniui. Mikrosilika gali pagerinti torkretbetonio mišinio tiekimo savybes net naudojant stambius užpildus ar didelį kiekį plaušo. Silicio mikrodulkės sukuria geresnį betono mišinio sukibimą su dengiamu paviršiumi, tai leidžia užpurkšti storesnius torkretbetonio sluoksnius. Paprastai naudojamas silicio dulkių kiekis torkretbetonio mišinyje yra 2–8 % cemento masės [6]. Mokslininkų nustatyta, jog produktas yra kancerogeninė medžiaga ir kai kuriose jurisdikcijose šis betono priedas yra uždraustas. Mokslininkas Wilfredas ir bendraautoriai [16] rado betono mišinio alternatyvą, kurio sudėtyje nebūtų kancerogeninių medžiagų ir kartu būtų gaunami panašūs rezultatai į pasiekiamus torkretbetonio mišinyje, naudojant silicio mikrodulkes, rezultatus. Nustatyta, jog ceolitas taip pat pasižymi dideliu labai reaktyviu paviršiaus plotu, kuris suteikia jam puikių absorbcinių savybių. Geriausios dujų absorbcijos ir vandens nepralaidumo savybės pasiektos, kai torkretbetonio mišinyje ceolito buvo naudojama 2–19 % cemento masės.

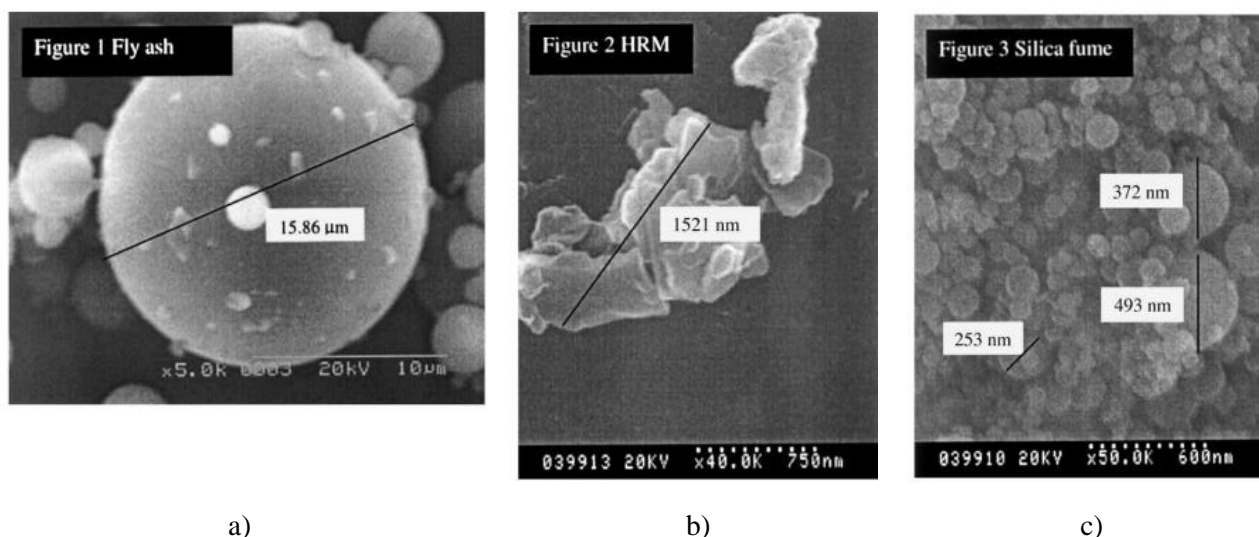
Lakieji pelenai – tai biokuro degimo šalutinis produktas. Šis mineralinis priedas taip pat gerina mišinio su stambiais užpildais reologines savybes, didina adheziją ir koheziją, tai naudinga, kai reikia vengti pernelyg didelio cemento kiekio mišinyje. Mokslininkų atlikti bandymai rodo, jog cementą pakeičiant lakiaisiais pelenais, rekomenduojamas jų kiekis turėtų neviršyti 9 %. Priešingu atveju, torkretbetonio stiprumas ženkliai sumažėja [17].



4 pav. Torkretbetonio mišinio rišimosi laikas priklausomai nuo vandens ir rišiklio santykio ir lakiųjų pelenų kiekio. PS1, PS2, PS3 mišiniuose lakiųjų pelenų kiekis pastovus [18]

Iš 4 paveikslo matyti, jog į torkretbetonio mišinį įdėjus didesnę kiekį lakiųjų pelenų jo rišimosi pradžia ir pabaiga prasideda vėliau. Didelis vandens ir rišiklio santykis bei lakiųjų pelenų kiekis gali turėti neigiamos įtakos ankstyvajam torkretbetonio stiprumui [18].

Metakaolinas – pucolaninė medžiaga, pagaminta kaitinant kaoliną iki 650–900 °C. Metakaolinas, kurio sudėtyje yra didžiausias silicio dioksido kiekis, vadinamas aukšto reaktyvumo metakaolinu. Jis naudojamas atsakingose konstrukcijose, kur reikalingas didelio stiprumo betonas. Kai betono hidratacijos metu pridedamas metakaolinas, jis reaguoja su laisvosiomis kalkėmis, sudarydamas papildomą kalcio silikato hidrato medžiagą, todėl betonas tampa tvirtesnis ir patvaresnis [19].



5 pav. 3 medžiagų mikroskopinis vaizdas: a) lakieji pelenai; b) didelio aktyvumo metakaolinas; c) silicio dulkės [19]

Greitas technikos progresas sąlygoja, jog betoninių konstrukcijų kokybės reikalavimai sparčiai auga. Konstrukcijų pagamintų iš purškiamo betono (torkretbetonio) esminės savybės, nustatančios jo kokybę yra: stipris, vandens nepralaidumas, atsparumas šalčiui, atsparumas korozijai, mažos susitraukimo deformacijos ir kt. Zhangas ir bendraautorai [20] palygino torkretbetonio ir įprastai liejamo betono ilgaamžiškumo savybes. Rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Purškiamo ir įprasto betono su mikro užpildais gniuždomojo stiprio rezultatai [20]

Mišiniai	Gniuždomasis stipris				Purkšto torkretbetonio stiprio padidėjimas lyginant su įprastu būdu gamintu torkretbetoniu, %	Purkšto torkretbetonio su 5 % greitikliu stiprio padidėjimas lyginant su įprastu būdu gamintu torkretbetoniu, %
	Įprastu būdu gamintas betonas, MPa	Įprastu būdu gamintas torkretbetonis, MPa	Purkštas šlapio mišinio torkretbetonis, MPa	Purkštas šlapio mišinio torkretbetonis su 5 % greitikliu, MPa,		
Cementas	46,5	40,4	47,1	49,9	17	24
Lakieji pelenai	48,8	39,3	44,9	41,9	14	7
Silicio mikrodulkės	39,4	45,1	51,5	38,1	14	-16

Eksperimento metu buvo lyginami įprasto, sauso ir šlapio mišinio tiekimo būdais įrengiami to paties V/C santykio bandiniai. Be portlandcemenčio mišinių, taip pat buvo naudojami mišiniai su lakiaisiais

pelenais arba silicio dioksido dulkėmis – tai pramonėje dažniausiai naudojami cemento pakaitalai. Mokslininkai nustatė, jog šlapio mišinio purškimo būdu gautų cemento ir cemento su silicio dulkių priedu bandinių stipris didesnis nei tos pačios sudėties įprastos betonavimo technologijos bandinių.

1.2.2. Cheminiai priedai

Rišimosi ir kietėjimo greitikliai – tai hidratacijos procesą spartinantys priedai. Torkretbetoniui dažniausiai greitikliai naudojami rišimosi trukmei pagreitinti, dar gali būti naudojami siekiant padidinti ankstyvąjį betono stiprumą. Greitikliai taip pat sumažina užpildų atšokimą ir leidžia torkretuoti storesniais sluoksniais, tačiau jie gali sumažinti torkretbetonio stiprį. [21] Torkretavimui naudojami greitikliai gali būti skysti arba miltelių pavidalu. Jų koncentracija mišinyje svyruoja nuo 3 % iki 8 % cemento masės.

3 lentelė. Torkretbetonio rišimosi greitikliai

Klasė / Kategorija	Aktyvus komponentas
Hidroksidai	NaOH, KOH
Karbonatai	Na ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃
Natrio aluminatai	NaAlO ₂
Natrio silikatai	NaO•nSiO ₂
Kalcio aluminatai	CaO-Al ₂ O ₃
Aluminio sulfatai	Al ₂ (SO ₄) ₃

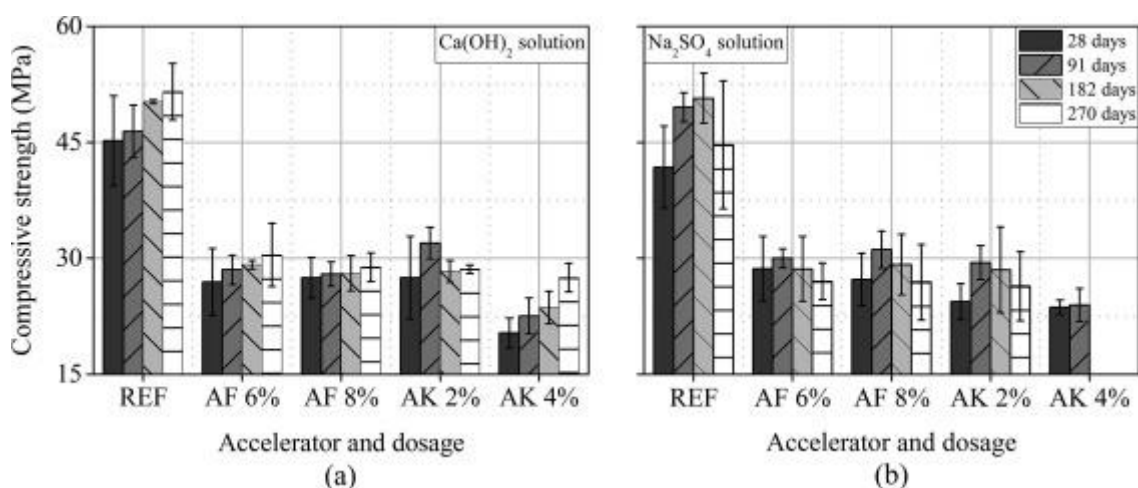
Zhangas ir bendraautorai [20] savo tyrimo metu nustatė, jog torkretbetonio bandiniai su 3 % greitikliu įgeria didesnę kiekį vandens. Tai rodo, jog įmaišius į torkretbetonio mišinį kietėjimo greitiklį, jo vandens įgeriamumas didėja (žr. 4 lentelę). R. P. Salvadoras [22] savo darbe aiškina, jog taip atsitinka dėl to, jog per greitai sukietėjus betono mišiniui, jame esantis laisvas oras nespėja išgaruoti ir tai lemia didesnę medžiagos poringumą.

4 lentelė. Purškiamo ir įprastai klojamo betono vandens įgėrio ir tūrinio poringumo bandymų rezultatai [20]

Mišinys	Vandens įgeriamumas			Sauso mišinio torkretbetonio vandens įgeriamumo sumažėjimas lyginant su įprastu būdu gaminto betono, %	Sauso mišinio torkretbetonio su 3 % greitikliu vandens įgeriamumo padidėjimas lyginant su įprastu būdu gaminto betono, %
	Įprastu būdu gamintas betonas, %	Sauso mišinio torkretbetonis, %	Sauso mišinio torkretbetonis su 3 % greitiklio, %		
Cementas	5,8	5,9	6,2	-2	7
Lakieji pelenai	5,6	4,7	5,9	16	5
Silicio mikrodulkės	4,8	3,5	5,6	27	17
Mišinys	Tūrinis poringumas			Sauso mišinio torkretbetonio tūrinio poringumo sumažėjimas lyginant su įprastu būdu gaminto betono, %	Sauso mišinio torkretbetonio su 3 % greitikliu tūrinio poringumo padidėjimas lyginant su įprastu būdu gaminto betono, %
	Įprastu būdu gamintas betonas, %	Sauso mišinio torkretbetonis, %	Sauso mišinio torkretbetonis su 3 % greitikliu, %		
Cementas	12,7	13,1	13,9	-3	9

Mišinys	Įprastu būdu gamintas betonas, %	Sauso mišinio torkretbetonis, %	Sauso mišinio torkretbetonis su 3 % greitikliu, %	Sauso mišinio torkretbetonio tūrinio poringumo sumažėjimas lyginant su įprastu būdu gaminto betono, %	Sauso mišinio torkretbetonio su 3 % greitikliu tūrinio poringumo padidėjimas lyginant su įprastu būdu gaminto betono, %
Lakieji pelenai	12,2	10,7	13,2	12	8
Silicio mikrodulkės	10,3	8,4	12,5	18	21

R. P. Salvadoras [23] kitame savo darbe teigia, jog greitiklis neigiamai veikia ir torkretbetonio atsparumą sulfatinei korozijai. Siekiant nustatyti bandinių stiprumo kitimą, tyrimo metu bandiniai su šarminiu ir bešarmiū greitiklio kiekiu buvo panardinti į kalcio hidroksido ir natrio sulfato tirpalus. Bandymo rezultatai po 28, 91, 182, 270 bandymo dienų pateikiami 5 paveiksle. Tyrimo rezultatai rodo, jog kontrolinio bandinio (be įmaišų) stiprumas po 270 dienų bandymo kalcio hidroksido tirpale yra apie 70 % didesnis už bandinių su rišimosi ir kietėjimo greitikliu.

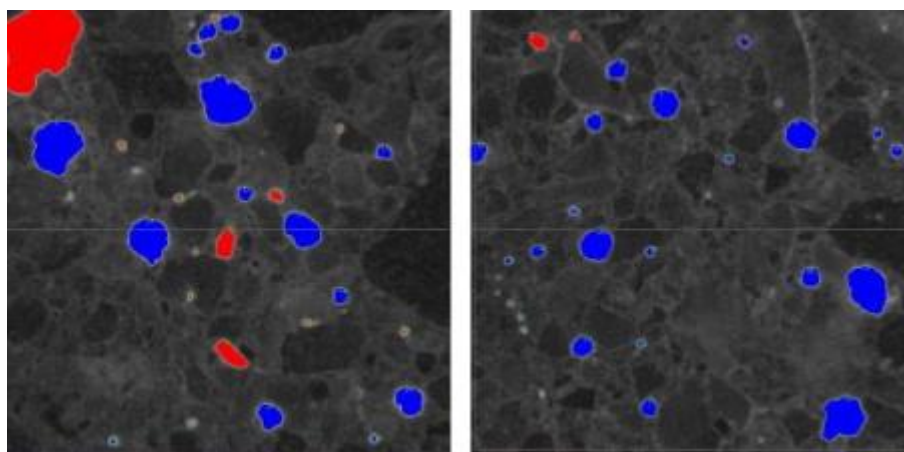


6 pav. Purškiamo betono, panardinto į prisotintą $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tirpalą (a) ir į Na_2SO_4 tirpalą (b), gniuždymo jėga po 28, 91, 182 ir 270 dienų [23]

Plastikliai ir superplastikliai – tai dalelių sukibimo jėgas mažinantys priedai. Plastiklio panaudojimas sumažina vandens poreikį reikiamo slankumo torkretbetonio mišiniui pagaminti. Tokiu būdu padidinamas medžiagos stiprumas ir ilgaamžiškumas. Paprastai plastikliai naudojami ruošiant šlapią torkretbetono mišinį. Priedo koncentracija mišinyje (priklausomai nuo jo tipo) svyruoja 0,5–2 % cementinių medžiagų masės [5].

Stabilizatoriai – tai vandens atsiskyrimą betone mažinantys priedai. Stabilizatoriai sustabdo normalų hidratacijos procesą, taip prailgindami mišinio technologiškumą. Stabilizatoriai naudojami požeminiuose darbuose, kur torkretbetonio mišinys tiekiamas dideliu atstumu [6].

Orą įtraukiantys priedai – tai uždaras poras kietėjančiame betone sudarantys priedai. Mokslininkų įrodyta, jog torkretbetonio, kuriame yra uždarų mikroporų, atsparumas cikliniam šalčio poveikiui yra didesnis.



a)

b)

7 pav. a) įprastas betonas; b) torkretbetonis su orą įtraukiančiu priedu [23]

Vandens įgėrį ir pralaidumą mažinantys priedai – kapiliarinę vandens absorbciją sukietėjusiame betone mažinantys priedai.

Temperatūrų kaita ir drėgmė daro neigiamą įtaką betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumui. Ciklinio užšalimo ir atšilimo proceso metu betono plyšiuose esantis vanduo žaloja ir naikina medžiagą. Šio proceso žalai sumažinti yra naudojami orą įtraukiantys priedai. Mokslininkas Chenas ir kiti bendraautoriai [23] po 400 užšalimo ir atšilimo ciklų nustatė torkretbetonio bandinių su orą įtraukiančiu priedu ir be jo masės nuostolius, ultragarso bangos greitį. Bandymų metu taip pat buvo nustatytos torkretbetonio bandinių porų charakteristikos (žr. 7 paveikslą).

Po 400 užšalimo ir atšilimo ciklų $100 \times 100 \times 400$ mm torkretbetonio bandinio masės nuostolis buvo 1,9 %, įprasto betono – 3,1 %. Įprasto betono bandinių dinaminis elastingumo modulis po 400 užšalimo ir atšilimo ciklų sumažėjo 22,5–37,1 %, o torkretbetonio su orą įtraukiančiu priedu dinaminis elastingumo modulis, palyginus su pradine verte, sumažėjo 8,8–18,8 %. Šaltinis teigia, jog ultragarso bangų greitis torkretbetonio bandinyje yra didesnis nei įprasto betono bandiniuose. Taigi, torkretbetonio bandiniai su orą įtraukiančiu priedu turi didesnę atsparumą šalčiui nei įprasto betono bandiniai su tuo pačiu priedu.

Wangas ir bendraautoriai taip pat atliko torkretbetonio [25] atsparumo užšalimo ir atšilimo ciklų poveikiui bandymus. Eksperimentų metu lygino įprasto betono, torkretbetonio ir tokio paties mišinio torkretbetonio armuoto plieniniu plaušu ilgalaikiškumo savybes. Gauti rezultatai parodė jog, plieninis pluoštas pagerino torkretbetonio atsparumą šalčiui, nes plieno pluoštas galėjo pagerinti mikroporų struktūrą ir sumažinti tempimo įtempių žalą torkretbetoniui.

Siekiant pratęsti konstrukcijos tarnavimo laiką, gaminant torkretbetonio mišinį, yra naudojami ir kiti cheminiai priedai tokie kaip korozijos inhibitoriai, kurie užkerta kelią armatūros oksidacijai ar susitraukimą mažinantys priedai.

1.2.3. Užpildai

Užpildai sudaro didelę (iki 75 %) torkretbetonio mišinio tūrio dalį ir sumažina brangių rišančiųjų medžiagų sąnaudas. Torkretbetonio užpildams naudojamos ir natūralios uolienos, ir dirbtinės medžiagos ar pramonės atliekos. Dėl suapvalintos formos torkretbetonio gamybai labiau tinkamas

yra natūralus žvirgždas ir smėlis. Skaldytos uolienos yra abrazyvios ir dėl to galimas betono siurblių ir mišinio tiekimo žarnos nusidėvėjimas. Rekomenduojamas stambių užpildų maksimalus dydis yra – 10 mm. Tačiau torkretavimui tuneliuose naudojami ir 16 mm dydžio užpildai [6]. Sauso mišinio purškimo technologijai naudojami smulkesni užpildai. Tačiau per didelis kiekis mažesnių nei 0,25 mm užpildų gali sukelti didelį dulkių kiekį [26].

Projektuojant betono sudėtį, užpildų parinkimas yra labai svarbus reologinėms šviežio mišinio savybėms ir sukietėjusios medžiagos struktūrai. 5 lentelėje pavaizduoti O. Okonkwo ir E. Arinze [27] atlikto betono mišinio slankumo bandymo rezultatai, kai 3 skirtingų koncentracijų mišiniam buvo naudoti 6 mm, 12 mm, 20 mm, 25 mm dydžio užpildai.

5 lentelė. Slankumo bandymo rezultatai [27]

Užpildo dydis (mm)	Slankumas (1:2:4) (mm)	Slankumas (1:1,5:3) (mm)	Slankumas (1:3:6) (mm)
6	20	50	0
12	60	161	10
20	100	118	20
25	90	114	0

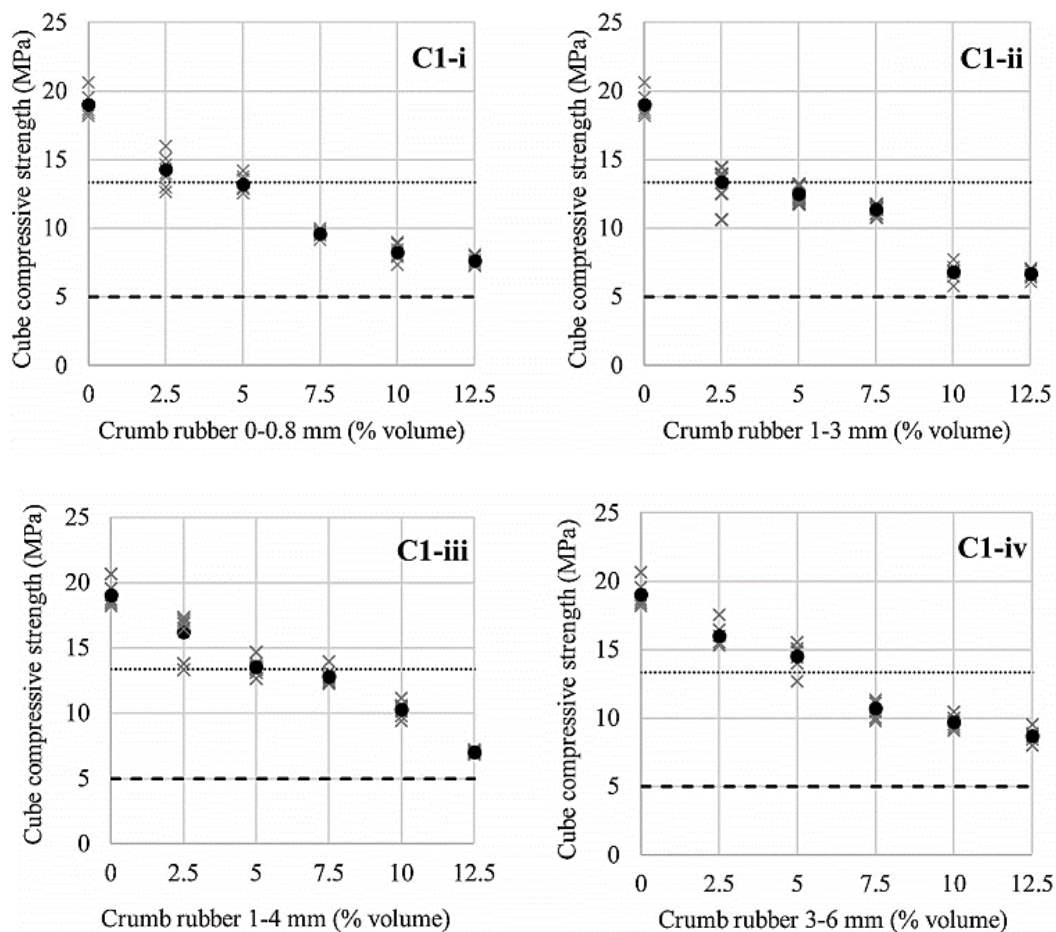
Rezultatai parodė, jog betono mišinio, kurio vandens, cemento ir užpildo santykis yra 1:1,5:3, slankumas buvo didžiausias, o mišinio, kurio koncentracija 1:3:6 – mažiausias. Lyginant 1:2:4 santykio mišinių slankumą su skirtingo dydžio užpildais, didžiausias slankumas gautas mišinio su užpildais iki 20 mm, o mišinio, kurio santykis 1:1,5:3, didžiausias slankumas buvo gautas, kai užpildų dydis neviršijo 12 mm. To pačio tyrimo metu atliktas šių bandinių stiprumo bandymas. Po gniuždomojo stiprio nustatymo gauta, jog mišinio, kurio užpildų dydis yra ne didesnis kaip 20 mm, stipris gautas didžiausias, o 6 mm – mažiausias (žr. 6 lentelę) [27].

6 lentelė. Gniuždomojo stiprio rezultatai [27]

Užpildo dydis (mm)	Vidutinis stipris (1:2:4) (N/mm ²)	Vidutinis stipris (1:1,5:3) (N/mm ²)	Vidutinis stipris (1:3:6) (N/mm ²)
6	12,29	13,63	10,07
12	17,18	18,67	13,78
20	21,92	27,11	17,63
25	20,14	20,59	16,74

1.2.4. Užpildų iš gumos trupinių panaudojimas torkretbetonio gamybai

Pakartotinis pramoninių šalutinių produktų naudojimas tapo populiaria alternatyva šalinti atliekas, išvengiant pavojingo poveikio aplinkai. Atsižvelgiant į didelį padangų atliekų kiekį visame pasaulyje, yra tiriamos padangų trupinių panaudojimo galimybės betone ir torkretbetonyje. Sovjėkas ir kiti mokslininkai [28] savo straipsnyje aprašo torkretbetonio, kurio mišinys buvo modifikuotas iki 12,5 % užpildų tūrio guma, stiprumines savybes. Tyrimų rezultatai parodė, kad gumos kiekis betone daro neigiamą poveikį bandinių stiprumui. Skirtingos frakcijos gumos grūdelių įtaka kubelių stiprumui pateikta 3 paveiksle.



8 pav. Betoninių kubelių su skirtingų frakcijų gumos užpildais gniuždomasis stipris praėjus 24 val. Juodi taškai rodo išmatuotų verčių vidurkį. Taškinė linija yra 30 % sumažėjimo riba, lyginant su etaloniniais bandiniais, kuriuos pateikė pramonės partneris, o punktyrinė linija yra J2 kreivės tipo nustatyta riba tam tikram 24 val. betono amžiui [28]

Gniuždomojo stiprio bandymo rezultatai parodė, jog geriau naudoti didesnio dydžio gumos trupinius, t. y. bandinių su 1–4 mm ir 3–6 mm gumos užpildais gniuždomasis stipris 15 % didesnis nei bandinių su to pačio tūrio 0–0,8 mm dydžio gumos grūdeliais.

1.2.5. Stambių perdirbto betono užpildų panaudojimas torkretbetonio gamybai

Nepaisant visų pliusų, torkretbetonis turi savų minusų ir vienas, su kuriuo dažniausiai susiduriama, yra užpildų atšokimas. Užpildų atšokimas - tai vienas svarbiausių torkretavimo proceso kokybės rodiklių. Purškiant vertikalius paviršius šlapio mišinio tiekimo būdu atšokusių užpildų kiekis siekia 5–10 %, sauso mišinio būdu – 20–30 %. [26] Dėl atšokusių stambių užpildų blogėja torkretbetonio mechaninės savybės.

Nobre ir kiti mokslininkai [29] atliko torkretbetonio ilgaamžiškumo ir mišinio užpildų atšokimo bandymus naudodami įprastus užpildus bei dalį jų pakeičiant 20 %, 50 % ir 100 % stambių perdirbto betono užpildų. Į torkretbetonio mišinį įmaišius stambius perdirbto betono užpildus, buvo būtina padidinti vandens ir cemento santykį, kad būtų išlaikytas tas pats mišinio klojamumas (siurbimas, purškimas) ir dėl to sumažėjo užpildų atšokimo efektas. Bandymo rezultatai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Šviežio betono charakteristikos [29]

	V/C santykis	Atšokimo sumažėjimas [%]	Δ_{RC} [%]
RC	0,46	27,27	-
C20	0,47	21,09	22,66
C50	0,50	26,14	4,14
C100	0,50	19,11	29,92

*Keturių tirtų mišinių sudėtyje yra 0 % (RC), 20 % (C20), 50 % (C50) ir 100 % (C100) stambių perdirbto betono užpildų.

To paties bandymo metu buvo pastebėta, kad panaudojus 100 % stambių perdirbto betono užpildų įprasto betono ilgaamžiškumo savybės (vandens absorbcija, chlorido difuzijos koeficientas, karbonizacijos gylis), išskyrus susitraukimą, suprastėjo, lyginant su torkretbetonio savybėmis.

Literatūros apžvalgos išvados

1. Remiantis literatūros apžvalga, paaiškėjo, jog torkretbetonio, kaip ir įprastai klojamo betono komponentų įvairovė labai didelė. Naudojant skirtingas medžiagas, galima gauti skirtingų savybių ir skirtingiems tikslams naudojamą torkretbetonį. Teorinėje dalyje aptartų bandymo metu gauta, jog torkretbetonio mišinių su cemento ir cemento su silicio dulkių priedu bandinių gniuždomieji stipriai skiriasi labai nežymiai lyginant su tos pačios sudėties įprastos betonavimo technologijos bandiniais.
2. Užsienio literatūroje pateikiamos skirtingos mišinio sudedamosios dalys ir jų koncentracijos. Lyginant su įprastu betono mišiniu, torkretbetonio mišiniui naudojami smulkesni (iki 16 mm) užpildai, rišamosios medžiagos mišinyje dažniausiai naudojama daugiau (300–500 kg/m³). Taip pat šių dienų torkretbetonio kaip ir įprasto betono gamyba beveik neapsieina be technologinių priedų. Išnagrinėjus mokslininkų atliktų tyrimų rezultatus gauta, jog greitiklis daro neigiamą poveikį torkretbetonio stiprumui, poringumui bei atsparumui sulfatinei korozijai.
3. Šiuo metu vis labiau domimasi antrinių žaliavų panaudojimu. Literatūroje rasta torkretbetonio tyrimų, panaudojant perdirbtą betoną bei gumą. 100 % stambių torkretbetonio užpildų pakeitus perdirbto betono užpildais, jo ilgaamžiškumo savybės sumažėjo mažiau lyginant su įprastai klojamu betonu. O torkretbetonio su gumos užpildais bandymo metu, nustatyta, jog smulkesni gumos užpildai daro didesnę neigiamą įtaką betono stiprumui nei stambesni.
4. Atliekant literatūros apžvalgą, apie Lietuvoje atliktus torkretbetonio bandymus informacijos nerasta. Todėl tolimesni baigiamojo projekto darbai orientuojami į torkretbetonio, pagaminto iš vietinių žaliavų, ilgaamžiškumo tyrimus. Manoma, kad atlikti tyrimai, leistų pagaminti kokybišką ir ilgaamžį produktą bei populiarintų torkretavimo technologiją Lietuvoje.

2. Torkretbetonio tyrimų bandymai

2.1. Žaliavos ir bandinių sudėtys

Viena dalis projekto tyrimams naudotų sukietėjusio torkretbetonio bandinių gauti iš statybos aikštelės. Kita dalis – tai laboratorijoje formuoti tokios pačios sudėties torkretbetonio mišinio bandiniai.

Gamybinėmis sąlygomis bandiniai buvo pagaminti šlapio mišinio tiekimo metodu. Statybų aikštelėje naudotos purškimo įrangos našumas – 6 m³/h. Torkretbetonio mišinys buvo užsakytas ir pagamintas betono mazge. Vadovaujantis LST EN 14488-1:2005 [30] standartu betono mišinys išpurkštas į 500×500 mm formas. Po 28 parų iš formų išpjauti ir nenuplaunamu rašikliu sužymėti 100 ir 150 mm skersmens bandiniai. Betono storis formoje arba jau išpjauto cilindro formos bandinio aukštis – > 100 mm.



a)



b)

9 pav. Torkretbetonio mišinio bandiniai: a) bandiniai purkšti statybvietėje; b) bandiniai formuoti įprastu būdu laboratorijoje

Torkretavimo mišiniui gaminti buvo naudojamas CEM I 42,5R klasės portlandcementis bei 0/4 mm frakcijos smėlio ir iki 8 mm stambumo granitinės skaldos užpildai atitinkantys LST EN 14487-1 [12] standartą. Torkretavimo mišinys pagamintas cemento, smėlio ir skaldos masės santykiu 1:2,6:2,6. Vandens ir cemento santykis mišinyje pastovus – 0,45. Projektuota betono gniuždymo stiprio klasė – C25/30. Bandiniams gaminti naudojamas vanduo, atitinkantis LST EN 1008:2003 [31] standarto techninius reikalavimus.

8 lentelė. Bandinių žymėjimas

Bandinio Nr.	Sudėtis
I	Bandinys su 3 % cemento masės greitiklio kiekiu purkštas statybvietėje
II	Bandinys su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu purkštas statybvietėje
III	Bandinys su 11 % cemento masės greitiklio kiekiu purkštas statybvietėje
IV	Kontrolinis bandinys be rišimosi ir kietėjimo greitiklio
V	Bandinys su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu formuotas įprastu būdu laboratorijoje

Nagrinėjant priedų įtaką torkretbetonio ilgaamžiškumo sąlyboms, torkretavimo metu į betono mišinį purškimo antgalyje arba mišinio maišymo pabaigoje įdėtas skirtingas 3 %, 7 % ir 11 % cemento masės greitiklio kiekis. Laboratorinėmis sąlygomis taip pat pagaminti ir kontroliniai torkretbetonio mišinio bandiniai be tiriamos įmaišos. Bandymams naudoto skysto greitiklio Sika® Sigunit© gamintojo deklaruoti techniniai duomenys pateikti 9 lentelėje. Naudojamas bešarmis greitiklis yra skirtas tiek šlapio, tiek sauso mišinio tiekimo metodu torkretuojamo mišinio gamybai. Rekomenduojamas greitiklio kiekis mišinyje – 4–8 % rišamosios medžiagos masės. Pagal LST EN 934-5:2008 [32] standartą bešarmiu greitikliu yra laikomas toks greitiklis, kuriame šarmų kiekis neviršija 1 % įmaišos masės.

9 lentelė. Sika® Sigunit© techniniai duomenys

Greitiklio savybės	
Medžiaga	Neorganiniai aliuminio junginiai
Spalva	Gelsva
Tankis	~ 1,41±0,01 kg/l (20 °C)
pH vertė	~ 2,7
Sausoji liekana	~ 52 %
Klampumas	≤ 120 mPa s (20 °C)
Maksimalus chorido jonų kiekis	≤ 0,1 %
Maksimalus ekvivalentinis natrio oksidų kiekis	≤ 1,0 %
Rekomenduojamas greitiklio kiekis	4–8 % rišiklio masės
Poveikis	didelis ankstyvas stiprumas minimalūs sukietėjusio torkretbetonio stiprio nuostoliai ryškus dulkelėjimo ir užpildų atšokimo sumažėjimas sukibimo su torkretuojamu paviršiumi pagerinimas

2.2. Bandinių sudarymas

Torkretbetonio tyrimų bandymams laboratorinėmis sąlygomis suformuoti dviejų sudėčių bandiniai: kontroliniai (be įmaišų) ir tiriamieji su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu. Mišinio ruošimui laboratorinėmis svarstyklėmis pasveriamos žaliavos: cementas, išdžiovinti užpildai, vanduo ir greitiklis. Specialia maišykle sumaišytas torkretbetonio mišinys liejamas į paruoštas 100×100×100 mm kubelių ir ø100 mm skersmens formas, kuriose bandiniai kietinami 20–24 valandas. Tokiu būdu sudaryti 4 kiekvienos sudėties bandiniai. Iš formų išimti bandiniai sužymimi ir panardinami į (20±1) °C vandenį.

2.3. Tyrimų metodikos

2.3.1. Gniuždymo stiprio nustatymas

Bandinių gniuždymo stipris nustatomas po 1 ir 28 torkretbetonio kietėjimo parų pagal LST EN 12390-3:2019 [33]. Bandiniai gniuždomi 0,6 MPa/s greičiu hidrauliniu presu *Pilot 4*. Tyrimui naudojami 100 mm skersmens ir 100 mm aukščio purkšti cilindro formos bandiniai ir 100×100×100 mm laboratorijoje gaminti torkretbetonio kubeliai. Prieš gniuždymą atliekamas tikslus jų matavimas

slankmačiu, apskaičiuojamos geometrinės charakteristikos. Bandymo metu gniuždomi kiekvienos sudėties du bandiniai bei fiksuojama kiekvieno maksimali presu indikuota suirimo apkrova F .

Torkretbetonio bandinių gniuždomasis stipris apskaičiuojamas pagal 2.3.1 formulę:

$$f_c = \frac{F}{A_c}; \quad (2.3.1)$$

čia f_c – bandinio gniuždomasis stipris;

F – maksimali suirimo jėga;

A_c – gniuždomas bandinio plotas.

2.3.2. Atsparumo šalčiui bandymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu

Tūrinis šaldymo ir atšildymo bandymas atliekamas vadovaujantis LST EN 1428-17:2016 [34]. Prieš bandymą bandiniai išmatuojami slankmačiu, duomenys surašomi į lentelę. Keturias paras bandiniai mirkomi vandenyje, pasveriami ir sudedami į šaldymo kamerą. Joje sudėti bandiniai šaldomi 2,5 valandos (-18 ± 2) °C temperatūroje. Praėjus numatytam laikui bandiniai laikomi pamerkti vonioje ($2 \pm 0,5$) valandas (18 ± 5) °C vandenyje. Taip bandymas atliekamas pakaitomis šaldant ir atšildant bandinius vandenyje. Per parą atliekamas ne mažiau kaip 1 bandymo ciklas.

Torkretbetonio bandinių masės ir gniuždomojo stiprio sumažėjimas po atsparumo šalčio cikliniam poveikiui bandymo apskaičiuojamas pagal 2.3.2 ir 2.3.3 formules:

$$\Delta m = \frac{m_s - m_k}{m_k} \times 100; \quad (2.3.2)$$

$$\Delta f = \frac{f_s - f_k}{f_k} \times 100; \quad (2.3.3)$$

čia Δm – bandinių masės sumažėjimas, lyginant su kontrolinių bandinių mase;

m_s – bandinio po atsparumo šalčiui bandymo masė;

m_k – kontrolinio bandinio prieš atsparumo šalčiui bandymą masė;

Δf – bandinių gniuždomojo stiprio sumažėjimas, lyginant su kontrolinių bandinių stipriu;

f_s – bandinio po atsparumo šalčiui bandymo gniuždomasis stipris;

f_k – kontrolinio bandinio prieš atsparumo šalčiui bandymą gniuždomasis stipris.

Pagal LST EN 1428-17:2016 [34] laikoma, jog bandiniai išlaikė atsparumo šalčiui bandymą, jei po numatytų užšalimo ir atšilimo ciklų skaičiaus betono bandinių Δf neviršija 5 %, o Δm – 3 %.

2.3.3. Vandens įsiskverbimo gylio veikiant slėgiui bandymas

Torkretbetonio vandens nepralaidumo bandymas atliekamas vadovaujantis LST EN 12390-8:2019 [35]. Bandiniai (72 ± 2) valandas veikiami (500 ± 50) kPa vandens slėgiu. Praėjus numatytam laikui, bandiniai perskeliami statmenai vandens slėgiu veiktam paviršiui. Pagal standarto nurodymus skilimo paviršiui leidžiama išdžiūti, kad būtų matoma vandens įsiskverbimo riba. Pasimačius šiai ribai, ji

pažymima ir bandomajame plote išmatuojamas vandens įsiskverbimo gylis milimetrais. Laikoma, jog betonai yra nelaidūs vandeniui, kai vidutinis vandens įsiskverbimo gylis yra mažesnis nei 20 mm [36].

2.3.4. Vandens įgėrio ir įgėrio kinetikos nustatymas

Torkretbetonio vandens įgėrio bandymas atliekamas remiantis LST EN 13369:2018 [37] F priedo ir GOST 12730.4-78 [38] standarte pateiktomis metodikomis. 150 mm skersmens ir 100×100×100 mm bandiniai perskeliami į keturias dalis ir džiovinami (105±5) °C temperatūroje džiovinimo krosnelėje, kol pasiekiamas pastovi masė m_2 . Trumpiausias džiovinimo laikotarpis – trys paros. Prieš sveriant bandinys aušinamas nuo 30 min iki 1 h. Po džiovinimo bandiniai laikomi panardinti (20±5) °C vandenyje. Po 15, 60 minučių, 24 ir 48 valandų ištrauktas iš vandens bandinys nuvalomas drėgnu skudurėliu ir dedamas ant svarstyklių – fiksuojama bandinio masė m_1 .

Kiekvieno bandinio vandens įgėrio vertė apskaičiuojama pagal 2.3.4 formulę:

$$W = 100 \times \frac{m_1 - m_2}{m_2}; \quad (2.3.4)$$

čia W – torkretbetonio masinis vandens įgėris;

m_1 – įmirkusio bandinio masė;

m_2 – sauso bandinio masė.

Betono vandens įgeriamumas svarbi savybė statiniams vandenyje ar nuo jo ir temperatūros poveikio neapsaugotoje aplinkoje. Šis rodiklis hidrotechninių statinių kintamojo vandens lygio zonoje turi būti mažesnis nei 5 %, kitose zonose – 7 % [39].

2.3.5. Torkretbetonio tankio nustatymas

Bandinių tankis gaunamas apskaičiavus iki pastovios masės išdžiovintų bandinių masės ir jų tūrio santykį [40]. Kiekvieno netaisyklingos formos bandinio tūris apskaičiuojamas, žinant jo įsotinto vandens masę bei jo masę vandenyje. Iš Archimedo dėsnio gauname tokią medžiagos tankio išraišką:

$$\rho = \frac{m_2}{(m_1 - m_w) \times \rho_w}; \quad (2.3.5)$$

čia ρ – bandinio tankis;

m_w – bandinio masė vandenyje;

ρ_w – 20 °C vandens tankis, laikoma, kad jis lygus 1000 kg/m³.

2.3.6. Torkretbetonio poringumo nustatymas

Nustačius torkretbetonio bandinių vandens įgeriamumo kinetiką, galima apskaičiuoti bendrą, atvirą bei uždarą medžiagos poringumą. Pagal LST EN 13230-1:2016 [41] efektyvusis (lietuvių kalbos terminologijoje suprantamas kaip atviras) betono bandinių poringumas neturi viršyti 12 %.

Bendras torkretbetonio poringumas apskaičiuojamas pagal 2.3.6 formulę:

$$P_b = 1 - \frac{\rho}{\rho_c}; \quad (2.3.6)$$

čia P_b – bendras poringumas;

ρ_c – cementinio akmens tankis, lygus 2650 kg/m³.

Atviras (kapiliarinis) torkretbetonio poringumas apskaičiuojamas pagal 2.3.7 formulę:

$$P_a = W - \frac{\rho}{1000}; \quad (2.3.7)$$

čia P_a – atviras (kapiliarinis) poringumas.

Uždaras torkretbetonio poringumas apskaičiuojamas pagal 2.3.8 formulę:

$$P_u = P_b - P_a; \quad (2.3.8)$$

čia P_u – uždaras poringumas.

Pagal GOST 12730.4-78 [38] standarte pateiktą nanogramą tirtoms torkretbetonio sudėtims parenkami porų dydį apibūdinantys santykiniai rodikliai: λ – vidutinio porų dydžio rodiklis ir α – porų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis. Rodiklių nustatymui reikalingi dydžiai:

$$W'_{t1} = \frac{W}{W_{t1}}; \quad (2.3.9)$$

$$W'_{t2} = \frac{W}{W_{t2}}; \quad (2.3.10)$$

čia W_{t1} – torkretbetonio masinis vandens įgėris po 15 minučių;

W_{t2} – torkretbetonio masinis vandens įgėris po 1 valandos.

2.3.7. Atsparumo šalčiui vertinimas ir prognozavimas pagal poringumą

Pagal GOST 12730.4-78 [38] standarte pateiktą metodiką torkretbetonio bandiniams atliekamas atsparumo šalčiui vertinimas ir prognozavimas pagal poringumą. Eksperimentais nustatyta, jog atsparus šalčiui yra toks betonas, kuriame yra rezervinių – uždarų arba nedidelių vandeniui neužpildytų porų. Kai šių porų tūris yra didesnis už betono porose esančio vandens tūrio prieaugį šalant, į jas gali pereiti visiškai užpildytose porose esantis vanduo. Kaip žinoma, šalant vandens tūris padidėja maždaug 9 %.

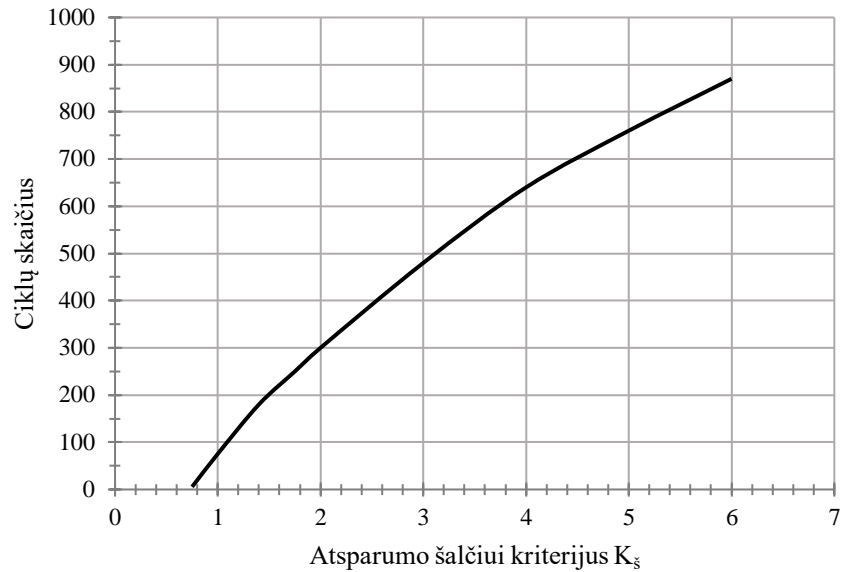
Eksperimentais nustatyta atsparumo šalčiui ciklų skaičiaus priklausomybė nuo įtraukto oro kiekio pateikiama 10 paveiksle.

Atsparumo šalčiui kriterijus apskaičiuojamas pagal 2.3.11 formulę:

$$K_s = \frac{P_u}{0,09P_a}; \quad (2.3.11)$$

čia K_{ξ} – atsparumo šalčiui kriterijus.

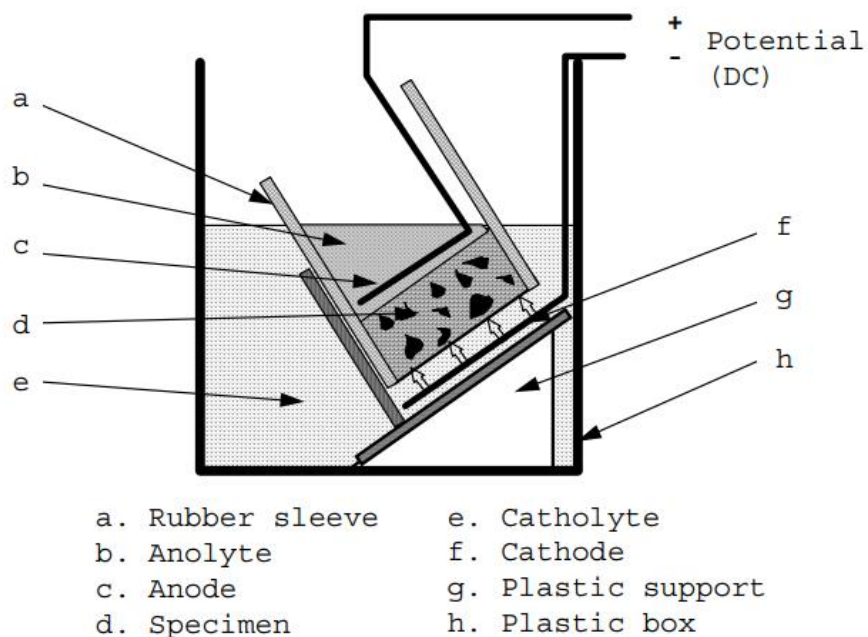
Apskaičiuotas dydis turi būti didesnis arba lygus vienetui.



10 pav. Betono atsparumo šalčiui priklausomybė nuo įtraukto oro kiekio

2.3.8. Chloridų jonų prasiskverbimo bandymas

Chloridų jonų migracijos torkretbetonyje nustatymui ir vertinimui atlikti naudojama NT BUILD 492 metodika [42]. Bandymo metu prie bandinio paviršiaus pridedami elektrodai, kurie sukelia chloridų jonų migraciją iš druskos tirpalo kapiliarais į betoną. Bandymui naudojami cilindro formos 50 mm aukščio torkretbetonio bandiniai. Tiriamas bandinys įdedamas ir užsandarinamas gumos įdėkle. Į jį ant viršaus įpilamas anodinis tirpalas, į plastikinį indą – katodinis. Anodinį tirpalą sudaro 12 g NaOH viename litre distiliuoto vandens, katodinį tirpalą sudaro 1 kg NaCl ir 9 kg distiliuoto vandens. Skirtingiems bandiniams bandymas truko nuo 10 iki 24 valandų.



11 pav. Chloridų penetracijos bandymo schema [41]

Šis bandymo metodas yra pagrįstas Nernst ir Plancko lygtimi, darant prielaidą, kad betonas, kuriame vyksta chloridų difuzija, yra homogeniška terpė [43]. Difuzijos koeficientas apskaičiuojamas pagal 2.3.12 formulę:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(x_d - 0,0238 - \sqrt{\frac{(273 + T)L \cdot x_d}{U - 2}} \right); \quad (2.3.12)$$

čia D_{nssm} – chloridų difuzijos koeficientas;

T – anodinio tirpalo pradinės ir galutinės temperatūros vidurkis;

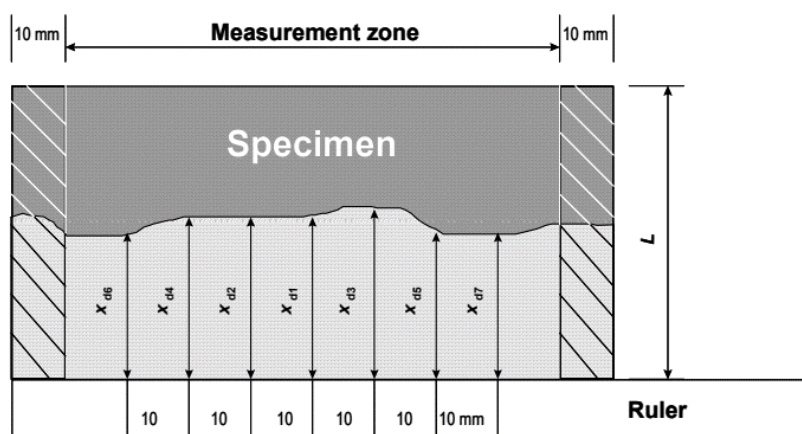
L – bandinio storis;

U – įtampos vertė;

t – bandymo trukmė;

x_d – chloridų penetracijos gylis betone.

Po bandymo bandinys perskeliamas ir apipurškiamas sidabro nitrato druskos tirpalu. Ant perskelto paviršiaus pasimačius kitai spalvai, pagal 12 paveiksle pavaizduotą schemą matuojamas pakeitusio spalvą sluoksnio storis ir skaičiuojamas chloridų įsiskverbimo gylis į betoną vidurkis.



12 pav. Chloridų įsiskverbimo gylio matavimo schema [41]

3. Rezultatai

3.1. Torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai

Iš pradžių gniuždomojo stiprio nustatymas buvo atliktas statybvietėje purkštiems kiekvienos sudėties dviem bandiniams po 28 kietėjimo parų. Vėliau bandymas pakartotas laboratorijoje formuotiems bandiniams po 1 ir 28 kietėjimo parų. Pagal gautą didžiausią ardančiąją jėgą apskaičiavus kiekvieno bandinio gniuždomąjį stiprį, išvestas aritmetinis vidurkis. Torkretbetonio gniuždomojo stiprio nustatymo rezultatai pateikiami 10 ir 11 lentelėse.

10 lentelė. Statybos aikštelėje purkštų torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai

Sudėtis ir bandinio Nr.	Matmenys		Skerspjūvio plotas A_c , mm ²	Didžiausia ardančioji jėga F , kN	Gniuždymo stipris f_{ci} , MPa	Vidutinis gniuždymo stipris f_c , MPa
	skersmuo, mm	aukštis, mm				
I-1	99,7	100,8	7797	276,2	35,4	35,2
I-2	99,5	100,0	7747	270,7	34,9	
II-1	99,6	99,3	7783	201,3	25,9	29,2
II-2	99,3	99,9	7739	251,3	32,5	
III-1	98,5	98,0	7616	204,8	26,9	26,9
III-2	98,6	97,6	7636	205,6	26,9	



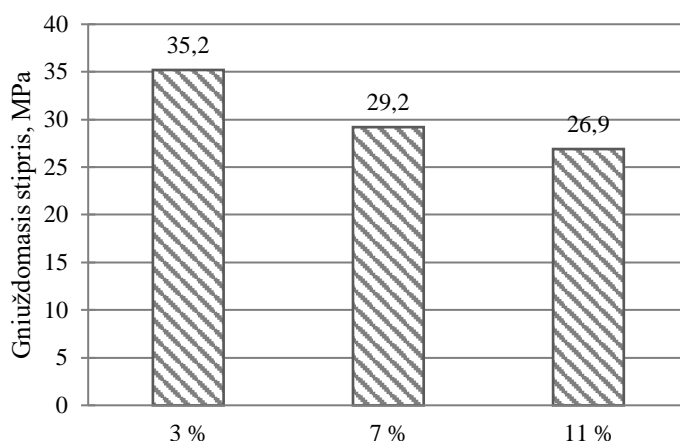
13 pav. Laboratorijoje formuotų torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas

11 lentelė. Laboratorijoje formuotų torkretbetonio bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai

Sudėtis ir bandinio Nr.	Matmenys			Skerspjūvio plotas A_c , mm ²	Didžiausia ardančioji jėga F , kN	Gniuždymo stipris f_{ci} , MPa	Cilindrinis gniuždymo stipris f_c , MPa
	plotis, mm	ilgis, mm	aukštis, mm				
Gniuždomasis stipris po 1 paros							
IV-1	100,9	100,0	100,4	10090	151,1	15,0	14,3
V-1	100,5	100,3	100,4	10080	186,3	18,5	17,6

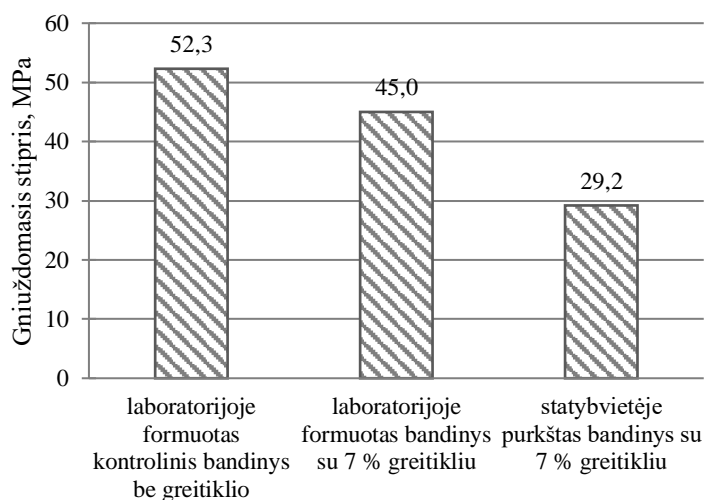
Sudėtis ir bandinio Nr.	Matmenys			Skerspjūvio plotas A_c , mm ²	Didžiausia ardančioji jėga F , kN	Gniuždymo stipris f_{ci} , MPa	Cilindrinis gniuždymo stipris f_c , MPa
	plotis, mm	ilgis, mm	aukštis, mm				
Gniuždomasis stipris po 28 parų							
IV-1	101,1	100,7	100,2	10171	560,1	55,0	52,3
V-1	101,1	101,7	100,2	10282	486,9	47,4	45,0

Gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo greitiklio kiekio ir torkretbetonio gamavimo technologijos pateikta 14 ir 15 paveiksluose. Laboratorijoje formuotų kontrolinių ir tiriamųjų bandinių su greitikliu gniuždymo stipriai po 1 paros pateikti 16 paveiksle.



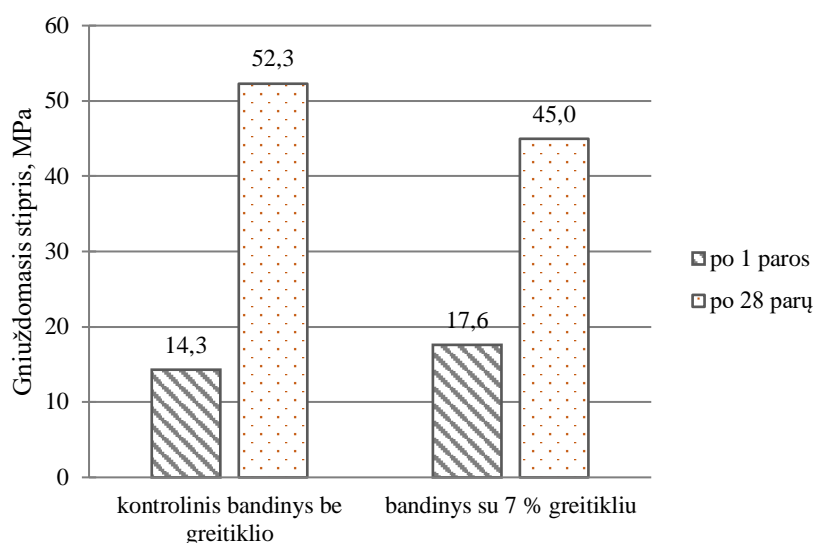
14 pav. Statybvietėje purkštų bandinių gniuždomojo stiprio po 28 kietėjimo parų priklausomybė nuo greitiklio kiekio

Iš 14 paveikslo matyti, kad į purškiamą torkretbetonio mišinį įdedant vis didesnę kiekį rišimosi greitiklio, jo stiprumas mažėja. Į tiriamą mišinį įdėjus 3 % cemento masės Sika® Sigunit© rišimosi greitiklio kiekį po 28 kietėjimo parų gautas 35,2 MPa vidutinis gniuždomasis stipris. 11 % cemento masės pakeitus greitikliu, jo gniuždomasis stiprumas sumažėja 23 % – iki 26,9 MPa. Į mišinį įdėjus didžiausią 11 % cemento masės greitiklio kiekį gautas gniuždomasis stipris (26,9 MPa) nėra mažesnis nei projektinės torkretbetonio stiprumo klasės C25/30 gniuždomojo stiprio vertė.



15 pav. Gniuždomojo stiprio po 28 kietėjimo parų priklausomybė nuo greitiklio kiekio ir betonavimo technologijos.

Išbandžius laboratorijoje ir statybvietėje gamintus bandinius, gauta jog bandinių, pagamintų įprastu būdu, gniuždomasis stipris po 28 kietėjimo parų yra 1,5 karto didesnis nei šlapio mišinio tiekimo būdu purkšto torkretbetonio. Didžiausias gniuždomasis stipris (52,3 MPa) buvo gautas laboratorijoje formuoto kontrolinio bandinio be greitiklio.



16 pav. Laboratorijoje formuotų bandinių gniuždomasis stipris po 1 ir 28 kietėjimo paros

Atlikus gniuždomojo stiprio bandymą po 1 kietėjimo paros bandiniams, kurie buvo formuoti laboratorijoje, gauta, jog į torkretbetonio mišinį įdėjus 7 % cemento masės greitiklio kiekį ankstyvasis torkretbetonio stiprumas gaunamas 23 % didesnis nei kontrolinio bandinio (žr. 16 paveikslą). Atlikus gniuždymo bandymą po 28 kietėjimo parų, gaunamas 14 % bandinio su greitikliu gniuždomojo stiprio nuostolis, lyginant su kontroliniu bandiniu.

3.2. Atsparumo šalčiui bandymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu

Bandinių su 3, 7 ir 11 % cemento masės greitiklio kiekiu atsparumas šalčiui nustatytas tūriniu užšaldymo ir atšildymo metodu. Bandymui naudoti 100 mm skersmens ir 100 mm aukščio statybvietėje purkšti torkretbetonio bandiniai. Bandinių masės pokytis pateikiamas 12 lentelėje.

12 lentelė. Torkretbetonio bandinių masės nuostoliai po tūrinio užšaldymo ir atšildymo bandymo

Sudėtis ir bandinio Nr.	Bandinio masė prieš bandymą, g	Bandinio masė po bandymo, g		Masės nuostolis po bandymo, %	
		po 150 ciklų	po 200 ciklų	po 150 ciklų	po 200 ciklų
I-3	1807,8	1844,0	-	-2,0	-
I-4	1794,6	1833,6	-	-2,2	-
I-5	1820,6	-	1859,6	-	-2,1
I-6	1752,0	-	1788,8	-	-2,1
II-3	1718,2	1766,1	-	-2,8	-
II-4	1781,4	1822,0	-	-2,3	-
II-5	1716,4	-	1775,7	-	-3,5
II-6	1743,8	-	1791,5	-	-2,7
III-3	1586,3	1624,8	-	-2,4	-

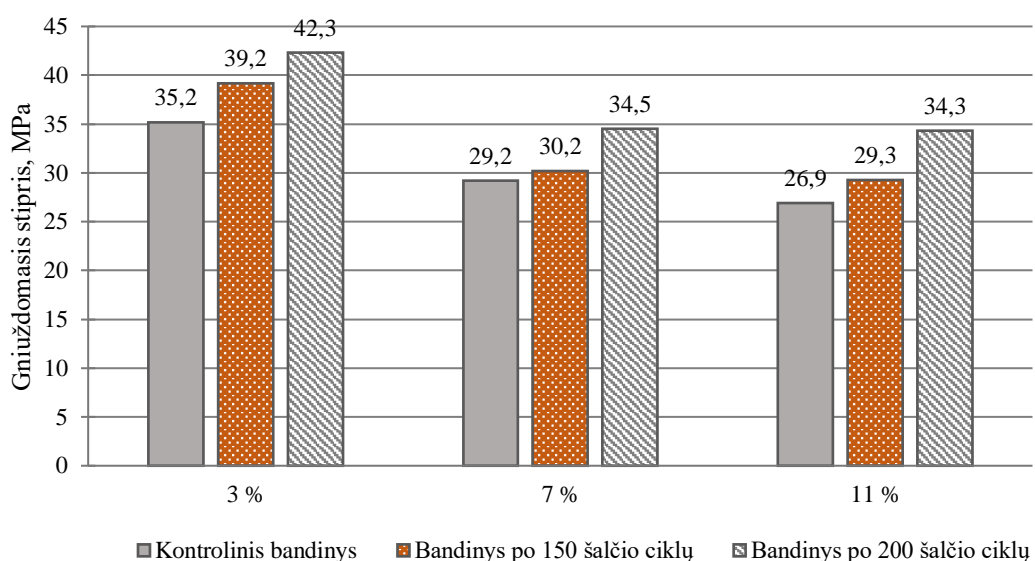
Sudėtis ir bandinio Nr.	Bandinio masė prieš bandymą, g	Bandinio masė po bandymo, g		Masės nuostolis po bandymo, %	
		po 150 ciklų	po 200 ciklų	po 150 ciklų	po 200 ciklų
III-4	1628,7	1670,6	-	-2,6	-
III-5	1613,8	-	1668,7	-	-3,4
III-6	1696,4	-	1755,5	-	-3,5



17 pav. Bandiniai po tūrinio šaldymo ir atšildymo bandymo

Visais atvejais po tūrinio šaldymo ir atšildymo bandymo gautas torkretbetonio bandinių masės prieaugis. Tai rodo, jog tirti bandiniai cikliniam šalčio poveikiui yra atsparūs. Po 150 užšalimo ir atšilimo ciklų visų sudėčių su skirtingu priedo kiekiu bandinių masės prieaugis gautas nuo 2,0 % iki 2,8 %. Po 200 šalčio ciklų masės prieaugis didesnis – iki 3,5 %. Iš rezultatų matome, jog skirtingas greitiklio kiekis masių pokyčiams įtakos neturėjo.

Kontrolinių torkretbetonio bandinių ir bandinių po 150 ir 200 užšalimo ir atšilimo ciklų gniuždomieji stipriai pateikiami 18 paveiksle.



18 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po atsparumo šalčiui bandymo

Gauti rezultatai rodo, jog tirti torkretbetonio bandiniai yra atsparūs cikliniam užšalimo ir atšilimo poveikiui, t. y. vidutinis gniuždomasis stipris nemažėja, o didėja. Didžiausias torkretbetonio gniuždomojo stiprio padidėjimas (27 %) gautas bandinio, kurio sudėtyje greitiklio kiekis yra 11 % cemento masės. Didžiausias vidutinis stipris gautas bandinių su 3 % cemento masės greitiklio kiekiu – 42,3 MPa.

3.3. Vandens įsiskverbimo gylio veikiant slėgiui bandymas

Atlikus vandens įsiskverbimo gylio veikiant slėgiui bandymą, įvertintas bandinių su skirtingu greitiklio kiekiu ir be jo nepralaidumas vandeniui. Bandymas atliktas naudojant po vieną 150 mm skersmens ir 100 mm aukščio bandinį iš kiekvienos sudėties purškto statybvietėje ir po vieną 150×150×150 mm laboratorijoje formuotą torkretbetonio kubą. Perskėlus ir išmatavus įdrėkimo atstumą nuo bandinio kraštinės veiktos slėgiu ir apskaičiavus vidutinę vertę, gauta, jog visų trijų purkštų statybvietėje bandinių vandens įsiskverbimo gylis yra 34–35 mm. Gauti rezultatai rodo, jog tirti torkretbetonio bandiniai yra laidūs vandeniui, o skirtingas greitiklio kiekis tam įtakos neturėjo. Išbandžius laboratorinėmis sąlygomis gamintus bandinius, gauta, jog bandinio su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu vandens įsiskverbimo gylis yra 16 mm, o bandinio be greitiklio – 21 mm (žr. 19, 20 paveikslus). Iš tyrimų rezultatų matyti, jog purkšti torkretbetonio bandiniai yra laidesni vandeniui nei laboratorijoje formuoti bandiniai. Pagal LST EN 12390-8:2019 [35] yra laikoma, jog betonai yra nelaidūs vandeniui, kai vidutinis vandens įsiskverbimo gylis yra mažesnis negu 20 mm.



19 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po atsparumo šalčiui bandymo



20 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po atsparumo šalčiui bandymo

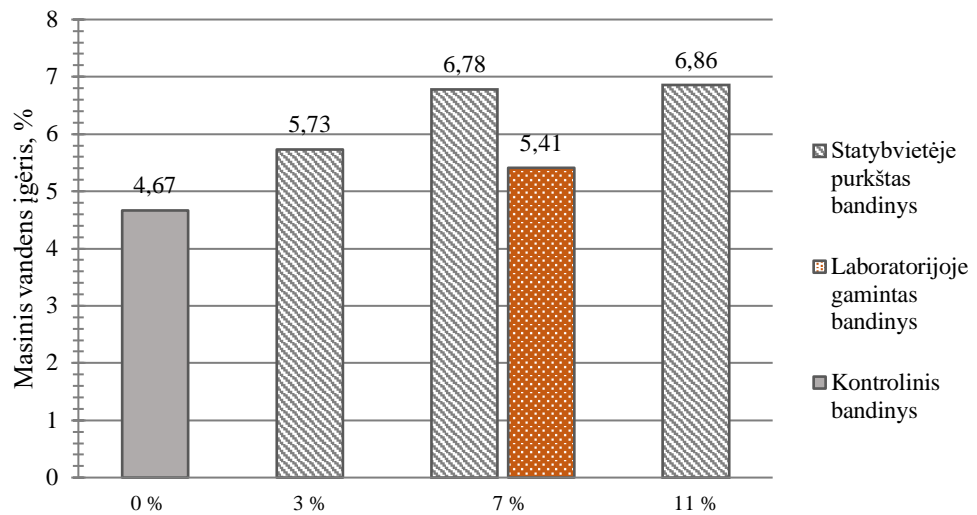
3.4. Vandens įgėrio ir įgėrio kinetikos nustatymas

Vandens įgėrio bandymui atlikti buvo naudojami 150 mm skersmens ir 100 mm aukščio purkšti ir 100×100×100 mm laboratorijoje formuoti bandiniai. Masinis vandens įgėris apskaičiuotas gavus sauso bandinio masę ir to paties 48 valandas vandenyje mirkyto bandinio masę. Gauti bandymo rezultatai pateikti 13 ir 14 lentelėse, grafinis rezultatų pateikimas matyti 21 paveiksle.

13 lentelė. Torkretbetonio bandinių vandens įgėrio rezultatai

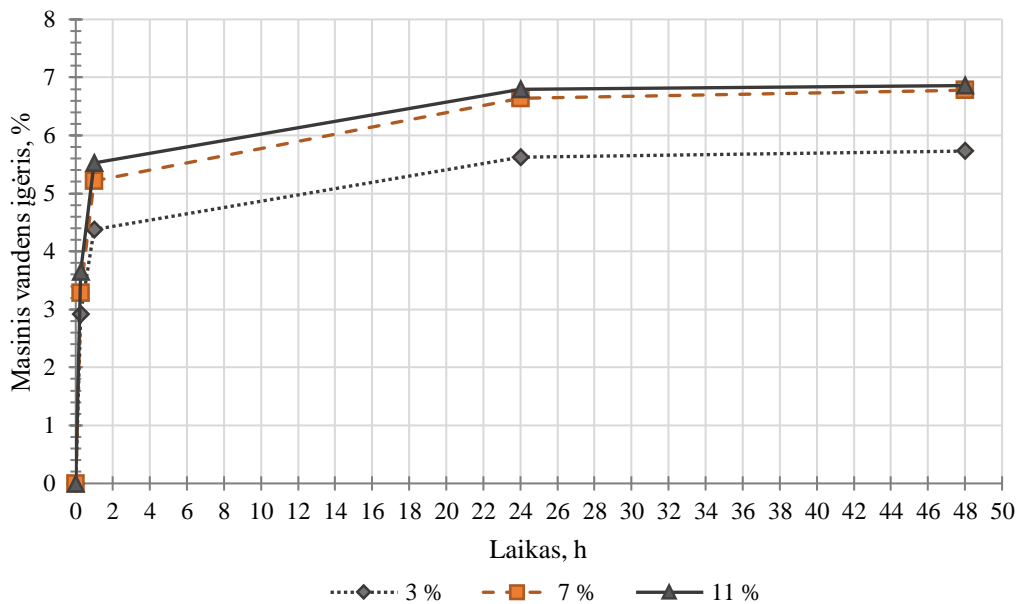
	Bandinio Nr.	Bandinio masė, g						Vandens įgėris, %	Vidurkis, %
		Sauso	Po 15 min	Po 60 min	Po 24 h	Po 48 h	Vandenyje		
Sudėtis su 3 % cemento masės greitiklio kiekiu	I-1	828,46	851,50	865,29	877,00	878,26	511,54	6,01	5,73
	I-2	708,07	728,66	739,32	747,91	748,73	438,13	5,74	
	I-3	1083,90	1112,84	1127,40	1142,10	1142,78	633,66	5,43	
	I-4	969,36	1001,69	1014,55	1024,29	1024,97	596,43	5,74	
Sudėtis su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu	II-1	885,15	914,77	931,54	942,11	943,18	544,82	6,56	6,78
	II-2	951,58	982,31	1000,84	1015,63	1016,63	583,60	6,86	
	II-3	918,06	947,95	965,93	980,54	981,53	565,51	6,91	
	II-4	877,75	906,58	923,82	935,72	937,21	538,53	6,77	
Sudėtis su 11 % cemento masės greitiklio kiekiu	III-1	797,29	827,14	841,79	851,08	851,59	488,00	6,81	6,86
	III-2	840,91	870,80	886,98	898,35	898,94	515,01	6,90	
	III-3	918,98	952,61	969,89	980,83	981,73	563,37	6,83	
	III-4	873,52	905,30	921,74	933,33	933,85	534,34	6,91	
Kontrolinė sudėtis be greitiklio gaminta laboratorijoje	IV-1	529,39	538,67	544,10	553,55	553,94	327,84	4,64	4,67
	IV-2	573,29	582,47	588,13	599,28	599,47	355,62	4,57	
	IV-3	680,35	692,18	699,45	711,50	712,04	419,52	4,66	
	IV-4	553,42	563,91	569,73	579,74	580,15	341,94	4,83	
Sudėtis su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu gaminta laboratorijoje	V-1	530,62	541,58	547,55	557,93	558,36	326,60	5,15	5,30
	V-2	643,11	657,38	664,75	677,56	678,44	395,61	5,36	
	V-3	618,48	632,14	639,08	651,83	652,61	379,51	5,39	
	V-4	531,13	542,86	548,69	559,24	559,88	326,59	5,29	

Iš grafiko matyti, jog didinat greitiklio kiekį mišinyje, didėja masinis torkretbetonio bandinių įgėris. Bandinio su 3 % cemento masės greitiklio kiekiu gautas masinis vandens įgėris – 5,73 %, bandinio su 7 % – 6,78 % ir bandinio su 11 % – 6,86 %. Lyginant skirtingomis sąlygomis pagamintus bandinius su tokiu pačiu (7 %) greitiklio kiekiu, gauta, kad torkretbetonio bandinio, gaminto įprastu būdu, vandens įgeriamumas yra mažesnis nei bandinio, kuris buvo purkštas šlapio mišinio tiekimo būdu statybvietyje. Lyginant laboratorijoje pagamintus bandinius su greitikliu ir be jo, gauta, kad į torkretbetonio mišinį įdėjus 7 % greitiklio jo įgeriamumas padidėja 13 %. Vadinasi, greitiklis didina torkretbetonio vandens įgeriamumą.



21 pav. Masinio vandens įgėrio priklausomybė nuo greitiklio kiekio

Atlikus vandens įgeriamumo bandymus nustatyta, jog optimaliausias greitiklio kiekis mišinyje yra 3 %, nes bandiniai su tokiu priedo kiekiu pasižymi mažiausiu vandens įgėriu, neviršijančiu 7 % įgeriamumo ribos. Bandinių, kurių įgeriamumas yra mažesnis nei 7 %, mišiniai yra tinkami hidrotechninių statinių nekintamojo vandens lygio zonoje statybai.



22 pav. Bandinių pagamintų statybų aikštelėje įgėrio kinetikos grafikas

Atlikus įgėrio kinetikos nustatymą statybų aikštelėje purkštiems bandiniams, gauta, jog labiausiai vandens įgėris padidėjo bandinio su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu (žr. 22 paveikslą). Nuo pradinio vandens įgėrio po 15 minučių, kuris siekė 3,28 % reikšmė padidėjo 3,5 % iki pilno vandens įgėrio nuo bandinio masės, kuris buvo – 6,78 %. Panašiai išaugo ir bandinio su 11 % cemento masės greitiklio kiekiu. Vandens įgėris nuo pradinio (3,65 %) iki įgėrio po 2 parų (6,59 %) išaugo 3,21 %. Mažiausiu įgeriamumu pasižymėjo bandiniai su mažiausiu greitiklio kiekiu – nuo 2,92 % pradinio įgėrio iki 5,73 % įgėrio po 48 valandų vandenyje. Taip pat iš grafiko matyti, jog torkretbetonio bandiniai labiausiai vandenį absorbuoja per pirmąją valandą. Po pirmos paros įgeriamumas sulėtėja, kol pasiekama pastovi masė.

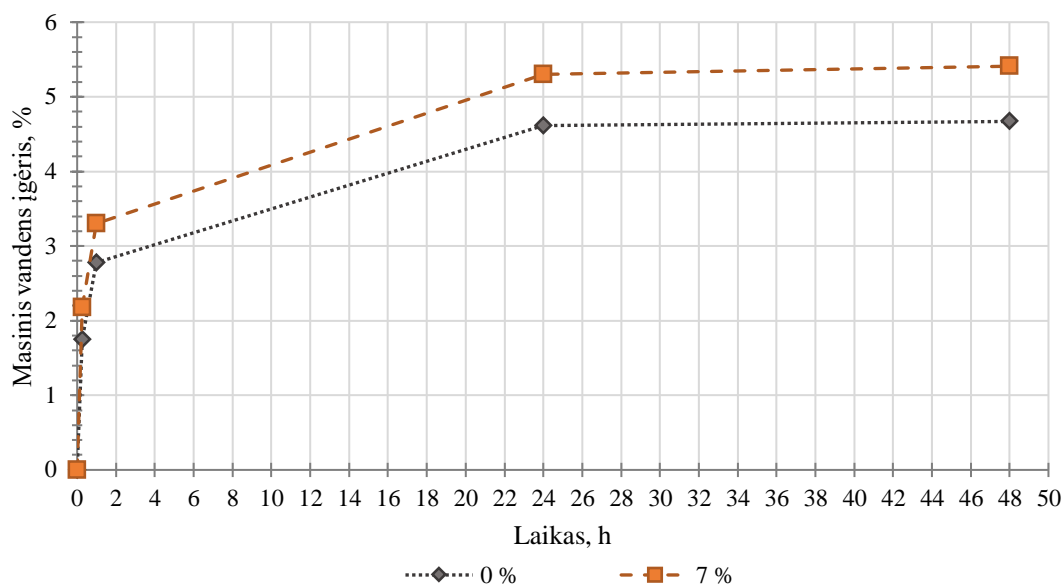


a)



b)

23 pav. Torkretbetonio bandiniai vandens įgėrio bandymui: a) į keturias dalis perskelti cilindro formos bandiniai; b) bandiniai mirkomi 20 °C vandenyje

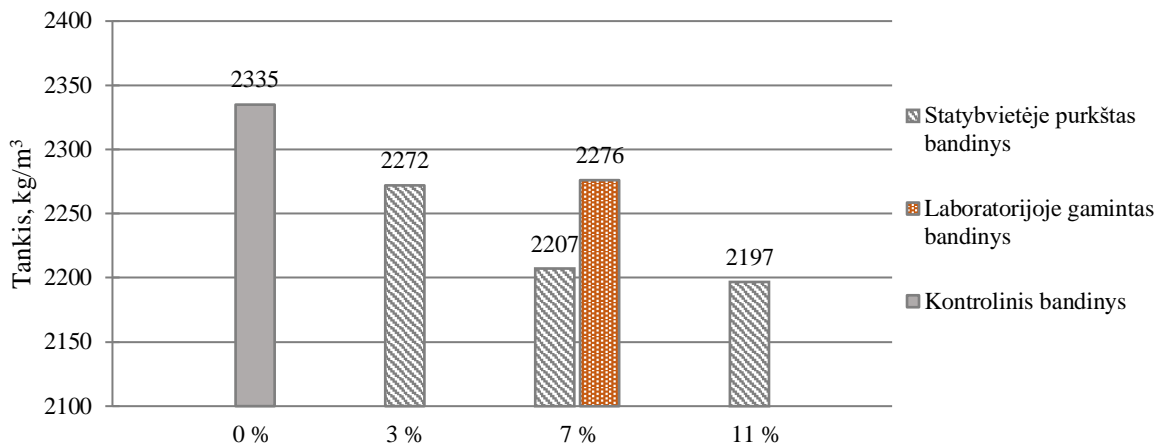


24 pav. Bandinių pagamintų laboratorijoje įgėrio kinetikos grafikas

Atlikus laboratorijoje gamintų bandinių įgeriamumo nustatymą, sudarytas įgėrio kinetikos grafikas, pavaizduotas 24 paveiksle. Iš grafiko matyti, jog sparčiausiai įgeriamumas taip pat didėja per pirmąją bandinių mirkymo vandenyje valandą. Kontrolinės sudėties bandinių ir bandinių su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu įgeriamumas nuo pradinio įgeriamumo po 15 minučių iki pilno vandens įgėrio nuo bandinio masės kinta panašiai.

3.5. Torkretbetonio tankio nustatymas

Po vandens įgėrio bandymo pasvėrus bandinius vandenyje apskaičiuotas vidutinis torkretbetonio bandinių tankis. Tankio priklausomybė nuo greitiklio kiekio mišinyje pavaizduota 25 paveiksle.



25 pav. Tankio priklausomybė nuo greitiklio kiekio

Iš 25 paveikslo matyti, jog didžiausias tankis (2335 kg/m^3) yra kontrolinio bandinio, kurio sudėtyje kietėjimo ir rišimosi procesus greitinančio priedo nėra. Tyrimų metu gauta, jog didėjant greitiklio kiekiui, sukietėjusio torkretbetonio tankis mažėja. Bandinių, kurie buvo purkšti statybvietėje ir kurių mišinyje greitiklio kiekis yra 3 % cemento masės gautas tankis – 2272 kg/m^3 , bandinių, kurių mišinyje greitiklio kiekis yra 7 % – 2207 kg/m^3 , o bandinių su 11 % cemento masės greitiklio kiekiu – 2197 kg/m^3 . Lyginant laboratorijoje gamintų ir statybvietėje purkštų bandinių tankius su tokiu pačiu greitiklio kiekiu, gauta, jog laboratorijoje gaminant ir tankinant bandinius jų tankis gaunamas didesnis nei suslėgto oro srove purškiant bandinius į formas.



26 pav. Torkretbetonio bandinių svėrimas vandenyje

3.6. Torkretbetonio poringumo nustatymas ir atsparumo šalčiui vertinimas

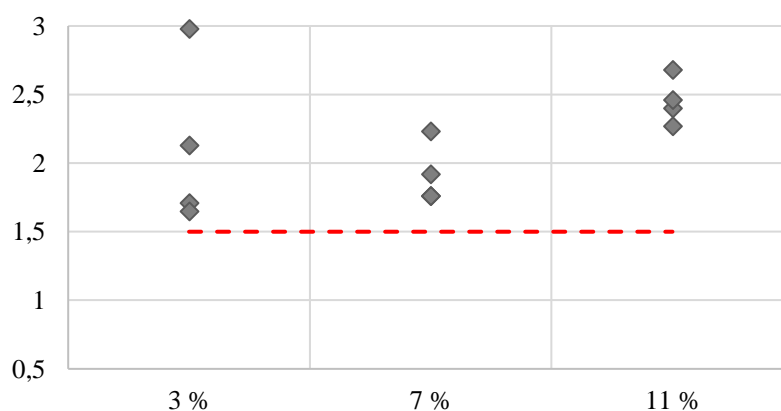
Tyrimo metu buvo atlikti torkretbetonio bendro, atviro ir uždaro poringumų skaičiavimai, įvertinti porų dydžio ir pasiskirstymo rodikliai. Remiantis GOST 12730.4–78 [38] standarte pateikiama metodika, buvo apskaičiuotas atsparumo šalčiui kriterijus K_s ir pagal betono atsparumo šalčiui

priklausomybės nuo atsparumo šalčiui kriterijaus grafiką parinktas tikėtinas atsparumas šalčiui ciklais. Gauti rezultatai pateikiami 14 ir 15 lentelėse.

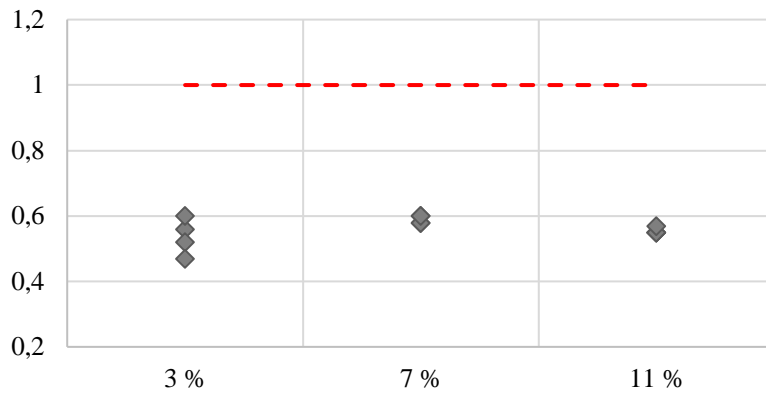
14 lentelė. Torkretbetonio bandinių purkštų statybvietėje poringumo parametrai ir prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais

Bandinio Nr.	Bendras poringumas, %	Atviras poringumas, %	Uždaras poringumas, %	α	λ	Atsparumo šalčiui kriterijus, K_s	Prognozuojamas atsparumas šalčiui, ciklais
I-1	16,0	13,6	2,4	0,56	1,71	2,00	≈303
I-2	15,2	13,1	2,1	0,52	2,13	1,82	
I-3	14,9	12,4	2,5	0,60	1,65	2,22	
I-4	15,9	13,0	2,9	0,47	2,98	2,51	
II-1	17,4	14,6	2,8	0,60	2,23	2,16	≈346
II-2	18,3	15,1	3,3	0,58	1,76	2,42	
II-3	18,0	15,3	2,7	0,58	1,76	1,97	
II-4	18,2	14,9	3,2	0,60	1,92	2,41	
III-1	18,1	15,0	3,1	0,55	2,68	2,28	≈369
III-2	18,6	15,1	3,5	0,55	2,27	2,55	
III-3	18,3	15,0	3,3	0,55	2,40	2,36	
III-4	18,3	15,1	3,2	0,57	2,46	2,46	

Tyrimų rezultatai rodo, jog greitiklio kiekis turi įtakos torkretbetonio poringumui. Torkretbetonio poringumo priklausomybė nuo greitiklio kiekio pateikiama 29 paveiksle. Iš paveikslo matyti, jog mažiausiu poringumu iš statybvietėje purkštų bandinių (15,52 %) pasižymi bandiniai su 3 % cemento masės greitiklio kiekiu. Didžiausiu poringumu, kuris siekia 18,33 % bandinio tūrio – bandiniai su 11 % cemento masės greitiklio kiekiu. Bendrai atviras torkretbetonio poringumas kinta nuo 13,02 % iki 15,06 % bandinio tūrio. Šios reikšmės viršija LST EN 13230-1:2016 nustatytą ribą – 12 %. Gautos uždaro poringumo reikšmės kinta nuo 2,1 % iki 3,5 %. Remiantis LST EN 206:2014 ir LST 1974:2012 standartais įtrauktas oro kiekis mišinyje, kurį galime prilyginti uždaram poringumui, kai užpildų dydis yra 8–16 mm, turi būti daugiau nei 5,0 %.

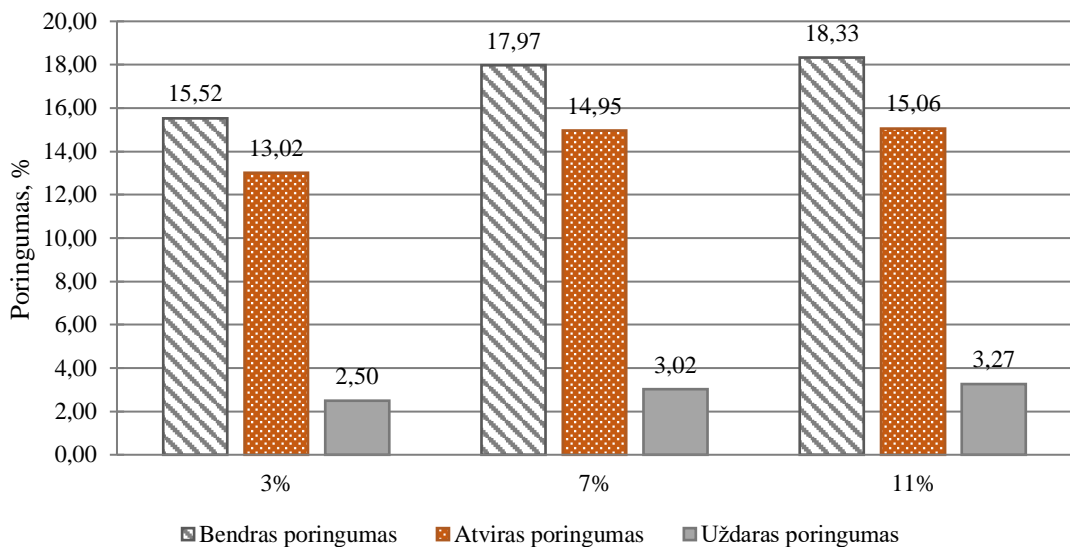


27 pav. Gamybinėmis sąlygomis gamintų bandinių vidutinio porų dydžio rodiklis λ



28 pav. Gamybinėmis sąlygomis gamintų bandinių porų vienodumo rodiklis α

Apibendrinant porų dydžio ir jų pasiskirstymo rodiklius, gamybinėmis sąlygomis gamintų bandinių λ reikšmės kinta nuo 1,65 iki 2,98 ir yra didesnės už lyginamąją vertę 1,50 (žr. 14 lentelę). Pastebimai didesnės reikšmės rodo, jog poros purkštame torkretbetonyje yra stambios. Porų pasiskirstymą rodo α rodiklis. Purkštame torkretbetonyje jis kinta nuo 0,52 iki 0,6 ir rodo, jog porų pasiskirstymas yra panašus, t. y. didžioji dalis porų yra stambios.

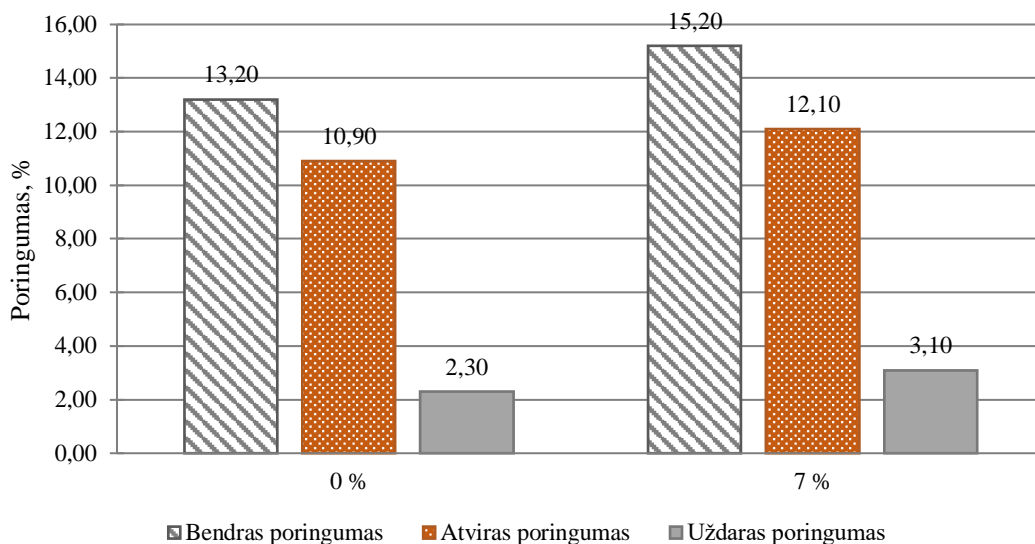


29 pav. Torkretbetonio bandinių purkštų statybos aikštelėje poringumo priklausomybė nuo greitiklio kiekio

15 lentelė. Torkretbetonio bandinių gamintų įprastu būdu laboratorijoje poringumo parametrai ir prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais

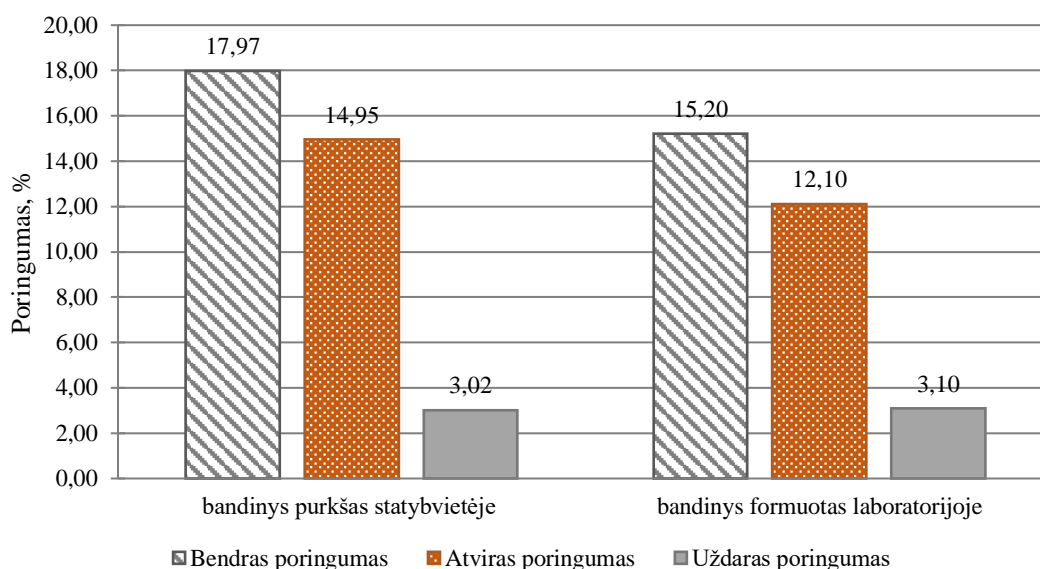
Bandinio Nr.	Bendras poringumas, %	Atviras poringumas, %	Uždaras poringumas, %	α	λ	Atsparumo šalčiui kriterijus, K_s	Prognozuojamas atsparumas šalčiui, ciklais
IV-1	13,0	10,9	2,1	0,47	0,84	2,15	≈358
IV-2	12,6	10,7	1,9	0,50	0,74	1,93	
IV-3	13,5	10,8	2,7	0,49	0,84	2,77	
IV-4	13,6	11,2	2,4	0,48	0,90	2,39	
V-1	14,7	11,8	2,9	0,46	0,94	2,75	≈449
V-2	15,2	12,2	3,0	0,49	0,98	2,72	

Bandinio Nr.	Bendras poringumas, %	Atviras poringumas, %	Uždaras poringumas, %	α	λ	Atsparumo šalčiui kriterijus, K_s	Prognozuojamas atsparumas šalčiui, ciklais
V-3	15,6	12,2	3,3	0,45	0,93	3,02	
V-4	15,1	12,1	3,0	0,41	0,93	2,80	



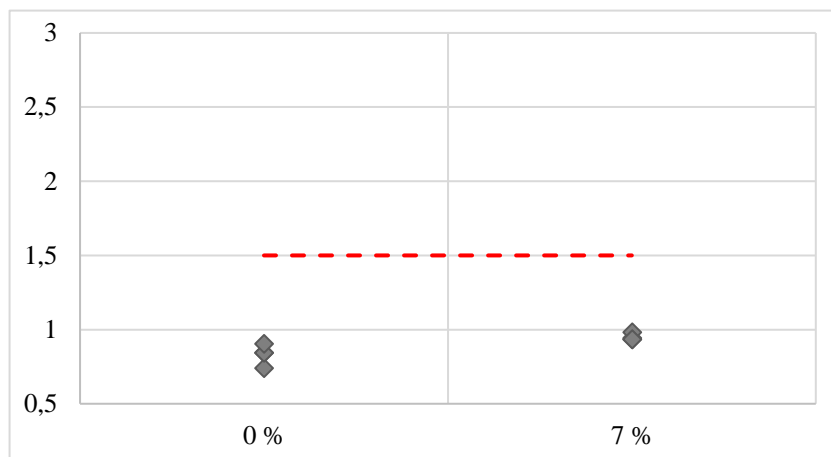
30 pav. Torkretbetonio bandinių, gamintų įprastu būdu laboratorijoje, poringumo priklausomybė nuo greitiklio kiekio

Grafiškai palyginus torkretbetonio bandinių, gamintų laboratorijoje, poringumo rezultatus matome, jog bendras kontrolinio bandinio poringumas yra mažesnis nei bandinio su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu. Atviras kontrolinio bandinio poringumas gautas – 10,9 %. Bandinio su greitikliu 1,1 karto didesnis. Kontrolinio bandinio atviro poringumo vertė neviršija 12 % ribinės atviro poringumo vertės. Kaip buvo matyti iš bandinių, purkštų statybvietėje, priklausomybės grafiko, taip ir iš šio galima pastebėti, jog į mišinį įdėjus greitiklio, jo uždaras poringumas didėja.

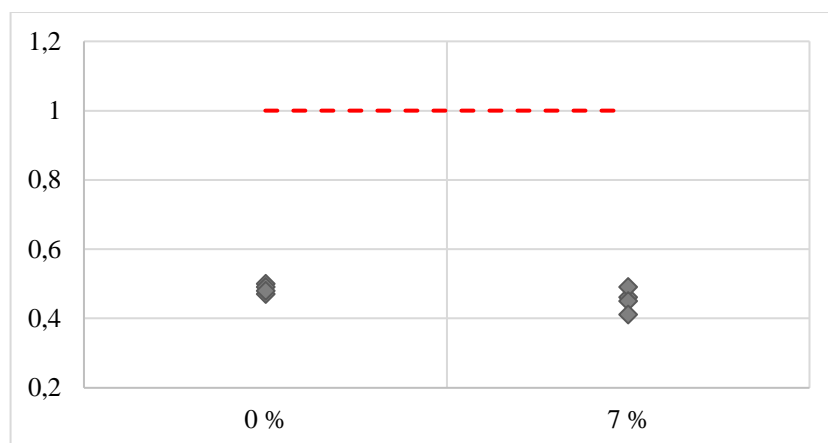


31 pav. Torkretbetonio bandinių su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu poringumo priklausomybė nuo gaminimo technologijos

Apžvelgiant skirtingas bandinių gaminimo technologijas, galima teigti, jog bandinių formavimo būdas turi įtakos medžiagos poringumui. Iš 31 paveikslo matyti, jog torkretbetonio bandinys formuotas laboratorijoje pasižymi geresniais poringumo rodikliais. Purkšto bandinio atviras poringumas 2,85 % didesnis už bandinio formuoto laboratorijoje. O šio uždaras poringumas yra nežymiai didesnis nei statybvietėje purkšto torkretbetonio bandinio.



32 pav. Laboratorinėmis sąlygomis gamintų bandinių vidutinio porų dydžio rodiklis λ



33 pav. Laboratorinėmis sąlygomis gamintų bandinių porų vienodumo rodiklis α

Laboratorinėmis sąlygomis gamintų bandinių λ reikšmės kinta nuo 0,84 iki 0,98 ir neviršija lyginamosios 1,50 vertės (žr. 15 lentelę). Nuo 0,41 iki 0,50 kintantis porų pasiskirstymo rodiklis rodo, jog poros yra labiau vienodo nei skirtingo dydžio (žr. 33 paveikslą). Tyrimu metu gauta, jog statybvietėje purkštus bandinius sudaro daugiausiai stambios, o formuotus laboratorijoje – smulkios poros. Purkštų bandinių poringumo rezultatai rodo atvirą poringumą ir visišką neatsparumą šalčiui.

3.7. Chloridų jonų prasiskverbimo bandymas

Atlikus bandymą buvo nustatytas chloridų jonų prasiskverbimo gylis ir taikant Nernsto ir Planko lygtį apskaičiuotas chloridų jonų difuzijos koeficientas. Rezultatai pateikti 16 lentelėje.

16 lentelė. Chloridų jonų difuzijos koeficientas

Bandinio Nr.	$D_{nssm}, 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
II sudėtis su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu purkšta statybvietėje	18,66

Bandinio Nr.	$D_{nssm}, 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
IV kontrolinė sudėtis gaminta laboratorijoje	16,03
V sudėtis su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu gaminta laboratorijoje	17,24

Gauti bandymo rezultatai rodo, jog torkretbetonio bandinys be hidratacijos reakciją spartinančių priedų yra atspariausias armatūros korozijai, t. y. gautas bandinio chloridų jonų difuzijos koeficientas yra mažiausias ($16,03 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Vadinasi, greitiklio kiekis torkretbetonyje didina chloridų difuzijos greitį ir betone esančios armatūros koroziją. Purkšto statybvietėje torkretbetonio bandinio su 7 % cemento masės greitiklio kiekiu gautas chloridų difuzijos koeficientas – $18,66 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Formuoto laboratorijoje bandinio chloridų difuzijos koeficientas – $17,24 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Rezultatai rodo, jog laboratorijoje formuoti bandiniai yra atsparesni chloridų poveikiui.



34 pav. Tirto II sudėties bandinio bandomasis paviršius



35 pav. Tirto IV sudėties bandinio bandomasis paviršius



36 pav. Tirto V sudėties bandinio bandomasis paviršius

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė apie torkretbetonio skirtingas gamybos technologijas ir naudojamas žaliavas. Pastebėta, jog Lietuvoje nėra atliktų torkretbetonio, pagaminto iš vietinių žaliavų, tyrimų.
2. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, jog torkretbetonio ilgalaikiškumo savybės yra susijusios su į mišinį įdėtu greitiklio kiekiu:
 - gniuždymo stiprio bandymo metu nustatyta, jog didėjant greitiklio kiekiui torkretbetonio bandinių gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų mažėja. Į tiriamąjį mišinį įdėjus 3 % cemento masės rišimosi greitiklio kiekį gautas 35,2 MPa vidutinis gniuždomasis stipris. Greitiklio kiekį padidinus iki 11 %, jo gniuždomasis stiprumas sumažėja 23 % – iki 26,9 MPa;
 - stiprumo mažėjimą patvirtina ir apskaičiuoti tankio rezultatai. Į torkretbetonio mišinį įdėjus didesnę greitiklio kiekį, jo tankis sumažėja;
 - atlikus atsparumo šalčiui bandymus, gauta, jog torkretbetonio bandiniai cikliniam šalčio poveikiui yra atsparūs ir atitiktų F200 atsparumo šalčiui klasę. Didžiausias torkretbetonio gniuždomojo stiprio padidėjimas (27 %) gautas bandinio, kurio sudėtyje greitiklio kiekis yra 11 % cemento masės. Gauti rezultatai rodo, jog greitiklis sumažina užšalimo ir atšilimo poveikį torkretbetonui;
 - įgėrio bandymo rezultatai rodo, jog didinat greitiklio kiekį mišinyje, didėja masinis torkretbetonio bandinių įgėris. Bandinio su 3 % cemento masės greitiklio kiekiu gautas masinis vandens įgėris – 5,73 %, bandinio su 7 % – 6,78 % ir bandinio su 11 % – 6,86 %;
 - atlikus poringumo parametrų skaičiavimus, gauta, jog mažiausiu poringumu iš statybvietėje purkštų bandinių (15,52 %) pasižymi bandiniai su 3 % cemento masės greitiklio kiekiu. Didžiausiu poringumu, kuris siekia 18,33 % bandinio tūrio – bandiniai su 11 % cemento masės greitiklio kiekiu;
 - gauti chloridų difuzijos bandymo rezultatai rodo, jog torkretbetonio bandinys be hidratacijos reakciją spartinančių priedų yra atspariausias armatūros korozijai. Vadinasi, greitiklio kiekis torkretbetonyje didina chloridų difuzijos greitį ir betone esančios armatūros koroziją.
3. Atlikus eksperimentinius tyrimus gauta, jog torkretbetonio ilgaamžiškumo savybės priklauso nuo naudojamos betonavimo technologijos:
 - išbandžius laboratorijoje ir statybvietėje gamintus bandinius, gauta, jog bandinių, pagamintų įprastu būdu, gniuždomasis stipris po 28 kietėjimo parų yra 1,5 karto didesnis nei šlapio mišinio tiekimo būdu purkšto torkretbetonio;
 - lyginant skirtingomis sąlygomis pagamintus bandinius su tokiu pačiu greitiklio kiekiu, gauta, jog torkretbetonio bandinių gamintų įprastu būdu vandens įgėris yra 1,37 % mažesnis nei bandinių, kurie buvo purkšti šlapio mišinio tiekimo būdu statybvietėje;
 - apibendrinant poringumo parametrus, gauta, jog didesniu atviru poringumu pasižymi gamybinėmis sąlygomis pagamintas bandinys. Gautas uždaras torkretbetonio poringumas nežymiai didesnis bandinio pagaminto laboratorijoje ir yra apie 3,0 %.

- atlikus vandens įsiskverbimo veikiant slėgiui bandymą, gauta, jog gamybinėmis sąlygomis gamintas torkretbetonis yra laidesnis vandeniui nei laboratorinėmis sąlygomis gamintas torkretbetonis.
4. Atlikus vandens įsiskverbimo gylio veikiant slėgiui bandymą, gauta, jog purkšti torkretbetonio bandiniai yra laidūs vandeniui (įsiskverbimo gylos – 35 mm), o greitiklio kiekis statybvietėje purkštų bandinių vandens nepralaidumui įtakos neturėjo.
 5. Apibendrinant torkretbetonio atsparumo šalčiui prognozavimą, gautas torkretbetonio atsparumo šalčiui vertinimas pagal skirtingus kriterijus skiriasi. Pagal atsparumo šalčiui kriterijų, prognozuojant atsparumo šalčiui ciklą skaičių, gautos reikšmės kinta nuo 303 iki 369 ciklą, kas rodo, jog betonas atitiktų F300 atsparumo šalčiui klasę. Pagal poringumo vertinimą, didelis atviras poringumas ir mažas uždarytų porų kiekis, rodo, jog torkretbetonio bandiniai šalčiui nėra atsparūs. Galima daryti išvadą, jog torkretbetonio bandinių vertinimas, atitinkantis GOST 12730.4–78 standarte pateikiamą metodiką, kuri skirta įprasto betono poringumui vertinti, yra netinkama purškiamo betono tyrimams atlikti ir atsparumas šalčiui turėtų būti nustatomas naudojant tiesioginius atsparumo šalčiui nustatymo metodus.

Literatūros sąrašas

1. GARCIA T., A. Blanco, S. H. P. Cavalaro. Shear Behaviour of Sprayed Concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, 124.
2. SPRAYED CONCRETE ASSOCIATION. *Introduction to Sprayed Concrete*. 2016
3. ZHANG, L. Is Shotcrete Sustainable? *Shotcrete*. 2010, 12(4), 20-26.
4. ZWEIFEL, C. Shotcrete Domes: A Model of Sustainability. *Shotcrete*. 2010, 12(4), 31-33.
5. CONCRETE INSTITUTE OF AUSTRALIA. *Shotcreting in Australia*. 2-nd edition. Rhodes: Concrete Institute of Australia, 2010. ISBN 0909375 79 8.
6. AUSTIN, S. A., P. J. Robins, C. I. Goodier. *Construction and Repair with Wet-Process Sprayed Concrete and Mortar*. Loughborough, 1998.
7. MALMGREN, L. E. Nordlund, S. Rolund, Adhesion strength and shrinkage of shotcrete. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2005
8. KIM D-G, G-P Lee, G-J Bae. Compressive and adhesive strengths of shotcrete deteriorated by hazardous components in the groundwater. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016, 21, 323. ISSN 0886-7798.
9. LEMAY, J-D, M. Jolin, R. Gagnè. Ultra rapid strength development in dry-mix shotcrete for ultra rapid support in challenging mining conditions. *Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*. Perth, 2014. ISBN 978-0-9870937-9-0.
10. BITTNER D. Shotcrete: Wet Process Versus Dry Process. *Concrete Repair Bulletin*. 2015
11. SCHOKKER, A. J. *The Sustainable Concrete Guide. Applications*. Farmington Hills: U.S. Green Concrete Council, 2010. ISBN: 978-0-87031-401-8.
12. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 14487-1:2006]. *Torkretbetonis. 1 dalis. Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitiktis. Europos standartas EN 14487-1:2005 turi Lietuvos statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.
13. YURDAKUL, E., K. A. Rieder, D. G. Nebot. Successful Design of Wet-Mix Shotcrete. *Concrete International*. 2017, 39(4), 55-59.
14. HÖFLER, J. J. Schlumpf, J. Markus. *Sika Sprayed Concrete Handbook*. 3-rd edition. Zürich, 2011.
15. ŠERELIS E. *Ypač stipraus betono struktūros savybių ir technologijos tyrimai: daktaro disertacija*. Kauno technologijos universitetas, 2016.
16. SHIELDCRETE LTD (CA). *Cementitious Shotcrete Composition*. Inventors: DAY W. J., R. G. Parker, F. M. MacNeil. Int. Cl.: C04B 22/00. United States Patent, 106/813. 2003 05 20.
17. LU, W., J. Wang, Z., Peng, B. Zhang. Research on influences of fly ash content on mechanical properties of shotcrete. *Materials Science and Engineering*. 2018, 452. DOI: 10.1088/1757-899X/452/2/022063
18. WANG J., D. Niu, S. Ding, Z. Mi, D. Luo. Microstructure, permeability and mechanical properties of accelerated shotcrete at different curing age. *Construction and Building Materials*. 2015, 78, 203-216. ISSN 0950-0618.
19. BINDIGANAVILE V., N. Banthia. Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin. *Cement and Concrete Composites*. 2001, 23(6), 503-514.
20. ZHANG. L., D. Morgan, S. Mindess. Comparative Evaluation of Transport Properties of Shotcrete Compared to Cast-in-Place Concrete. *Aci Materials Journal*. 2016. DOI: 14359/51688829

21. PRUDENCIO L. R. Accelerating Admixtures for Shotcrete. Cement and Concrete Composites. 1998.
22. SALVADOR R. P, S. H. P. Cavalaro, I. Segura, A. D. Figueiredo, J. Perez. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, 111, 386-398.
23. SALVADOR R. P, D. A. S. Rambo, R. M. Bueno, S. R. Lima, A. D. Figueiredo. Influence of accelerator type and dosage on the durability of wet-mixed sprayed concrete against external sulfate attack. *Construction and Building Materials*. 2020, 239. ISSN 0950-0618.
24. CHEN J., X. Zhao, Y. Luo. X. Deng. Q. Liu. Investigating freeze-proof durability of C25 shotcrete. *Construction and Building Materials*. 2014, 61.
25. WANG, J., D. Niu. Influence of freeze-thaw cycles and sulfate corrosion resistance on shotcrete with and without steel fiber. *Construction and Building Materials*. 2016, 122.
26. NEWMAN J., B. S. CHOO. *Advanced Concrete Technology*. Burlington: Elsevier Ltd., 2003 ISBN 0 7506 5105 9
27. OKONKWO O., E. Arinze. EFFECTS OF AGGREGATE GRADATION ON THE PROPERTIES OF CONCRETE MADE FROM GRANITE CHIPPINGS. *International Journal of Advancements in Research & Technology*. 2015 ISSN 2278-7763
28. SOVJÁK, R., Š. Pešková, V. Šmilauer, M. Mára, P. Ružička, L. Černá Vydrová, P. Konvalinka. Utilization of crumb rubber and FBC- based ternary binder in shotcrete lining. *Case Studies in Construction Materials*. 2019
29. NOBRE J., M. Bravo, J. De Brito. G. Duarte. Durability performance of dry-mix produced with coarse recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*. 2020, 29.
30. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 14488-1:2005]. *Torkretbetonio tyrimai. 1 dalis. Šviežio ir sukietėjusio betono ėminių ėmimas*. Vilnius. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
31. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1008:2003]. *Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant grąžinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti*. Vilnius. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
32. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 934-5:2008]. *Betono, statybinio ir injekcinio skiedinio įmaišiniai priedai. 5 dalis. Injekcinio skiedinio priedai. Apibrėžtys, reikalavimai, atitiktis, ženklinimas ir etikečių tvirtinimas*. Vilnius. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2008.
33. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-3:2019]. *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris*. Vilnius. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
34. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1428-17:2016]. *Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.
35. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-8:2019]. *Sukietėjusio betono bandymai. 8 dalis. Vandens įsiskverbimo gylis veikiant slėgiui*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
36. STATYBOS TECHINIS REGLAMENTAS. [STR 2.05.18:2005]. *Betoninės ir gelžbetoninės užtvankos ir jų konstrukcijos*. Vilnius, 2005.

37. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13369:2018]. *Bendrosios surenkamųjų betoninių gaminių taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2018.
38. ГОСТ 12730.4–78. *Бетоны. Методы определения показателей пористости*. 1994. 6 p.
39. GURSKIS V. *Statybinės medžiagos*. Kaunas: Lietuvos žemės ūkio universitetas, 2008
40. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-7:2019]. *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
41. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13230-1:2016]. *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Gelžbetoniniai pabėgiai. 1 dalis. Bendrieji reikalavimai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.
42. NORDTEST. [NT BUILD 492]. *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*. Espoo: Nordtest, 1999.
43. LEBEDEVA R. *Jūros aplinkos poveikis hidrotechninio betono ilgaamžiškumui: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2018.