



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Betono susitraukimą mažinančių įmaišų tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Martynas Statkauskas

Projekto autorius

Doc. Audrius Grinys

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Betono susitraukimą mažinančių įmaišų tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6121EX008)

Martynas Statkauskas

Projekto autorius

Doc. Audrius Grinys

Vadovas

Doc. Algirdas Augonis

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Martynas Statkauskas

Betono susitraukimą mažinančių įmaišų tyrimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Martynas Statkauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.): Betono susitraukimą mažinančių įmaišų tyrimai

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.:

(lietuvių k.):

Betono susitraukimą mažinančių įmaišų tyrimai

(anglų k.):

Investigation of Concrete Shrinkage Reducing Admixtures

Pradiniai duomenys darbui:

Baigiamojo projekto dalys:

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

Kita informacija (pagal poreikį):

Vadovas:

(indėlis 100 %)

Audrius Grinys

*pareigos, vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu*

Konsultantas:

(indėlis ____ %)

*pareigos, vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu*

Studentas:

Martynas Statkauskas
*pareigos, vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu*

Statkauskas Martynas. Betono susitraukimą mažinančių įmaišų tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Audrius Grinys; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: betono susitraukimai, susitraukimą mažinančios įmaišos, negesintos kalkės, polipropileno plaušas, kanapių plaušas.

Kaunas, 2022. 86 p.

Santrauka

Šiais laikais betono gamybos pramonėje ypač populiarūs ir intensyviai naudojami didelius atvirus paviršius turintys betoniniai elementai: plonasienės konstrukcijos, tiltų monolitiniai elementai ar besiulės grindys. Betono mišinio kietėjimo metu formuojasi cementinis akmuo ir susidaro susitraukimo deformacijos, dėl kurių susidaro įvairūs nepageidaujami dariniai – plyšiai ir įtrūkimai. Vienas iš būdų, padedančių išvengti šių nepageidaujamų pasėkmių yra susitraukimą mažinančių įmaišų panaudojimas.

Magistro baigiamojo projekto tikslas yra ištirti betono susitraukimą mažinančių įmaišų poveikį šviežio betono bei sukietėjusio betono savybėms ir panaudojant vietines žaliavas, sukurti sukietėjusio betono susitraukimą mažinančių įmaišų derinį. Projekte analizuojami skirtingomis įmaišomis ir jų deriniais modifikuoti betoniniai mišiniai.

Magistro baigiamąjį projektą sudaro trys dalys. Pirmojoje dalyje pateikiama literatūros apžvalga, kurioje apžvelgiami panašūs mokslininkų tyrimai. Antrojoje dalyje aprašoma teorinė tyrimo dalis, kurioje pateikiamas tyrimuose naudotų standartų ir medžiagų sąrašas, betono mišinio sudėties projektavimo eiga, tyrimų metodai ir betono CO₂ pėdsako skaičiavimas. Trečiojoje dalyje pateikiami tyrimų rezultatai.

Statkauskas Martynas. Investigation of Concrete Shrinkage Reducing Admixtures. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Audrius Grinys; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: concrete shrinkage, shrinkage reducing admixtures, quicklime, polypropylene fiber, hemp fiber.

Kaunas, 2022. 86 p.

Summary

Nowadays, wide concrete surfaces with wide open surfaces are especially popular in the concrete industry: thin-walled structures, monolithic elements of bridges or seamless floors. During the hardening of the concrete mix, a cement stone is formed and shrinkage deformations occur, which lead to various undesirable formations – cracks and fissures. One way to avoid these undesirable consequences is to use shrinkage reducing admixtures.

Master's final project aim is to investigate the efficiency of different admixtures and their combinations while observing the influence on the shrinkage deformations in concrete mixtures as well as its mechanical properties.

Master's final project consists of three parts. The first part provides a review of the literature that reviews similar studies by other researchers. The second part describes the theoretical part of the study, which lists the standards and materials used in research, the design process of the concrete mixture composition, the experimental research methods and the calculation of the CO₂ footprint of concrete. The third part presents the results of experimental studies.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Betoninių mišinių susitraukimai ir juos lemiantys veiksniai.....	13
1.2. Betoninių mišinių struktūros įtaka susitraukimui.....	15
1.3. Betoninių mišinių kietinimo sąlygų įtaka susitraukimui	18
1.4. Įmaišų įtaka betoninių mišinių susitraukimui.....	19
1.5. Vietinių žaliavų panaudojimas betono susitraukimų mažinimui.....	28
2. Teorinė dalis.....	35
2.1. Tyrimuose naudoti standartai	35
2.2. Tyrimuose naudotos medžiagos	36
2.3. Betono mišinio sudėties skaičiavimas	42
2.4. Betono CO ₂ pėdsako skaičiavimas	45
2.5. Tyrimų metodai	47
2.5.1. Granulimetrinės sudėties nustatymas	47
2.5.2. Betono mišinių sudėtys, gamyba ir bandinių formavimas	48
2.5.3. Betono mišinio bandymai.....	49
2.5.4. Susitraukimų nustatymo bandymas.....	51
2.5.5. Gniuždymo stiprio bandymas.....	53
2.5.6. Lenkimo stiprio bandymas	53
2.5.7. Atsparumo šalčiui bandymas.....	55
2.5.8. Vandens įgeriamumo kinetikos bandymas.....	55
3. Tyrimų rezultatai.....	57
3.1. Granulimetrinė sudėtis.....	57
3.2. Šviežio betono mišinio parametrai	58
3.3. Susitraukimai	60
3.4. Gniuždymo stipris	66
3.5. Lenkimo stipris.....	69
3.6. Atsparumas šalčiui.....	72
3.7. Vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas	76
Išvados	81
Literatūros sąrašas	82

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Betono mišinių sudėtys [16].....	16
2 lentelė. Fizinės savybės, cheminė ir mineraloginė rišamųjų medžiagų sudėtis [16]	16
3 lentelė. Cheminė ir mineraloginė cementų sudėtis [21].....	19
4 lentelė. Betono mišinių sudėtys [35].....	25
5 lentelė. Cemento cheminė ir mineraloginė sudėtis [35].....	25
6 lentelė. Šviežio betono mišinio savybės [35].....	25
7 lentelė. Cheminė medžiagų sudėtis [38]	28
8 lentelė. Betono mišinio sudėtys [41].....	30
9 lentelė. Cementinių skiedinių sudėtys [46]	33
10 lentelė. „ROCKET CEMENT M-600“ cemento cheminė ir mineraloginė sudėtis [53].....	37
11 lentelė. „Sika Viscocrete D-187“ techninė specifikacija [55].....	38
12 lentelė. „SikaControl -50“ techninė specifikacija [56]	39
13 lentelė. „Tradical Q 90“ kalkių cheminė sudėtis [57].....	39
14 lentelė. Plaušo „CONNECTO FIBER 38“ techninė specifikacija [58]	40
15 lentelė. Pluoštinių kanapių plaušo techninė specifikacija [59]	41
16 lentelė. Medžiagų kiekiai 1m ³ betono mišinio	44
17 lentelė. CO ₂ emisijos pėdsakas 1 m ³ betono [73]	45
18 lentelė. Betono mišinių sudėtys kg/m ³	48
19 lentelė. Granulimetrinės sudėties rezultatai	57
20 lentelė. Šviežio betono mišinio bandymų rezultatai	58
21 lentelė. Bandinių ilgių ir masių matavimų reikšmės po 1, 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų	60
22 lentelė. Susitraukimų rezultatai po 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų	61
23 lentelė. Masės pokyčiai po 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų.....	63
24 lentelė. Susitraukimų rezultatai po 2, 4, 8, 12, 16, 20 ir 24 val.....	65
25 lentelė. Gniuždymo stiprio rezultatai po 7 ir 28 parų bandinių kietinimo	66
26 lentelė. Lenkimo stiprio rezultatai po 90 dienų bandinių kietinimo	69
27 lentelė. Gniuždymo stiprio rezultatai po 100 šalčio ciklų.....	74
28 lentelė. Betoninių bandinių masių reikšmės, poringumo parametrams nustatyti.....	76
29 lentelė. Betono poringumo parametrų rezultatai pagal vandens įgeriamumo kinetiką.....	77

Paveikslų sąrašas

1 pav. Gniuždymo stiprio prieaugis betonuose [16]	17
2 pav. (a) Plieninės (užlenktais galais) fibros, (b) Polipropileno fibros, (c) Stiklo fibros [23].....	20
3 pav. Savaiminio susitraukimo bandymas naudojant Schleibinger Bending-Drain įrangą [23]	20
4 pav. Tilto konstrukcija po betono mišinio paklojimo [32].....	22
5 pav. Vidutiniai išilginiai susitraukimai [32]	23
6 pav. Tempimo stiprio nustatymo įranga [33].....	23
7 pav. Susitraukimų matavimo įranga [33].....	24
8 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai po 28 dienų kietinimo [35].....	26
9 pav. (a) Susitraukimų matavimas, (b) bandinių kietinimo sąlygos [35]	26
10 pav. Džiūvimo susitraukimų rezultatai [35].....	27
11 pav. Lakiųjų pelenų keramzitas [41].....	29
12 pav. Savaiminių susitraukimų matavimas cilindrinio metodu [41]	30
13 pav. Gniuždymo ir tempimo stiprių bandymų rezultatai [41].....	31
14 pav. Savaiminių susitraukimų bandymo rezultatai, naudojant tik PWC [41].....	31
15 pav. Savaiminių susitraukimų bandymo rezultatai, naudojant PWC ir CEA [41].....	32
16 pav. Kanapių plaušas [46].....	33
17 pav. Sukietėjusio cementinio skiedinio bandymų rezultatai [46]	34
18 pav. Žvirgždas fr. 4/16 mm	36
19 pav. Smėlis fr. 0/4 mm	36
20 pav. Portlandcementis CEM I	37
21 pav. Superplastiklis	38
22 pav. Susitraukimą mažinanti įmaiša.....	39
23 pav. Negesintos kalkės	40
24 pav. Polipropileno plaušas	40
25 pav. Pluoštinių kanapių plaušas	41
26 pav. CO ₂ emisijos pėdsako pasiskirstymas 1 m ³ betono [73].....	45
27 pav. Ryšys tarp betono eksploatacijos periodo, chloridų difuzijos koeficiento ir plyšio gylio ...	46
28 pav. Išsijotų užpildų frakcijos (a) – žvirgždas fr. 4/16, (b) – smėlis fr. 0/4.....	48
29 pav. Betono maišyklė.....	49
30 pav. Sudėties nr.2 (POLI3.0) mišinys	49
31 pav. Sudėties nr.6 (CaO1.5) suslūgimas	50
32 pav. Sudėties nr.6 (CaO1.5) įt. oro kiekis	50
33 pav. Sudėties nr.8 (CaO1.5SRA1.5) susitraukimų matavimas po 90 dienų	51
34 pav. Pirminio susitraukimo matavimo schema	52
35 pav. Mišinio paruošimas pirminio susitraukimo matavimui.....	52
36 pav. Sudėties nr.1 (CNTRL) pirminio susitraukimo matavimas	52
37 pav. Gniuždymo stiprio nustatymas po 28 dienų.....	53
38 pav. Lenkimo stiprio nustatymas po 90 dienų	54
39 pav. Šaldymo kameroje esanti talpa ir bandiniai joje	55
40 pav. Talpos skirtos betoninių bandinių įmirkymui	56
41 pav. Betono mišinio granulimetrinė kreivė.....	58
42 pav. Susitraukimų išsidėstymas laike per 90 parų	61
43 pav. Masės pokyčių palyginimas	63
44 pav. Susitraukimų ir masės pokyčių sąveika po 28 parų	64

45 pav. Pirminių susitraukimų išsidėstymas laike per 24 val.	65
46 pav. Bandinių tankių ir įtraukto oro kiekio sąveika	67
47 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai po 7 ir 28 dienų.....	68
48 pav. Lenkimo stiprio rezultatai po 90 dienų.....	69
49 pav. Lenkimo stiprio ir plyšio pločio priklausomybė	70
50 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.1 (CNTRL)	72
51 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.2 (POLI3.0)	72
52 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.3 (CNBS3.0).....	72
53 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.4 (SRA0.5)	72
54 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.5 (SRA1.5)	73
55 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.6 (CaO1.5).....	73
56 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.7 (CaO2.5).....	73
57 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.8 (CaO1.5SRA1.5).....	73
58 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.9 (CaO2.5SRA1.5).....	73
59 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.10 (POLI3.0CaO2.5SRA1.5)	74
60 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.11 (CNBS3.0CaO2.5SRA1.5).....	74
61 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai po 100 šalčio ciklų.....	75
62 pav. Masinio vandens įgėrio rezultatai.....	78
63 pav. Betoninių bandinių poringumas	79
64 pav. Ryšys tarp įtraukto oro ir uždaro poringumo	80

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

v/c – (angl. water/cement ratio) vandens ir cemento santykis;

OPC – (angl. ordinary Portland cement) įprastinis portlandcementis;

LHP – (angl. low heat Portland cement) žemoje temperatūroje degtas portlandcementis;

SF – (angl. silica fume) silicio mikrodulkės;

CSA – (angl. calcium sulfoaluminate) kalcio sulfoaluminatas;

LWA – (angl. lightweight aggregate) lengvieji užpildai;

AEA – (angl. air-entraining admixture/agent) orą įtraukianti įmaiša;

SRA – (angl. shrinkage reducing admixture/agent) susitraukimą mažinanti įmaiša;

HPCC – (angl. high-performance cement composites) aukštos klasės cementiniai kompozitai;

CEA – (angl. CaO-based expansive additive) plėtrusis kalcio oksido (CaO) priedas;

MEA – (angl. MgO-based expansive additive) plėtrusis magnio oksido (MgO) priedas;

SAP – (angl. superabsorbent polymers) superabsorbciniai polimerai;

PWC – (angl. pre-wetted ceramsite) išanksto sudrėkintas keramzitas.

Įvadas

Šiais laikais ypač populiarios ir intensyviai naudojamos betoninės bei gelžbetoninės konstrukcijos, turinčios didelius atvirus paviršius: plonasienės konstrukcijos, tiltų bei viadukų monolitiniai gelžbetoniniai elementai, atraminės sienelės ar besiulės grindys. Betono mišiniui kietėjant ir susiformuojant cementiniam akmeniui, susidaro susitraukimo deformacijos. Dėl susitraukimo deformacijų, cementiniame akmenyje susidaro įvairūs nepageidaujami dariniai – plyšiai ir įtrūkimai. Norint išvengti šių nepageidaujamų pasekmių susitraukimo deformacijas būtina minimalizuoti. Veiksmingas susitraukimo deformacijų mažinimo būdas yra cheminių įmaišų bei susitraukimą mažinančių priedų panaudojimas, kurių pagalba yra pagerinamos betono savybės.

Tyrimų objektas – betoninis mišinys, modifikuotas skirtingomis įmaišomis bei įmaišų deriniais. Šiame darbe suprojektuota betono mišinio sudėtis, skirta didelio atvirojo paviršiaus konstrukcijoms betonuoti, t. y. suprojektuotas betono mišinys – C25/30. Tyrimuose nuspręsta naudoti gerai pasaulinėje rinkoje žinomą betono susitraukimą mažinančią cheminę įmaišą (SRA) ir polimerinį priedą – polipropileno pluoštą. Kadangi lietuviškų, betono savybes reguliuojančių cheminių įmaišų bei priedų rinkoje praktiškai nėra, tyrime nuspręsta ištirti Lietuvos rinkoje gerai žinomas medžiagas – negesintas kalkes ir kanapių plaušą bei išsiaiškinti ar šios, vietinės žaliavos, turi teigiamą poveikį betonui.

Eksperimento metu, kontrolinio bandinio be įmaišų, tyrimų rezultatai buvo palyginti su betoninio bandinio, kuriame panaudotos įmaišos ar įmaišų deriniai, rezultatais.

Taigi, šiame magistriniame darbe nagrinėjamas skirtingų įmaišų ir jų derinių efektyvumas bei įtaka betoninių mišinių susitraukimo deformacijoms. Magistrinio darbo rezultatus būtų galima pritaikyti praktikoje: prekinio betono mišinių gamyboje, besiūlių grindų įrengime arba surenkamo gelžbetonio konstrukcijų gamyboje.

Darbo tikslas – ištirti betono susitraukimą mažinančių įmaišų poveikį šviežio betono bei sukietėjusio betono savybėms ir panaudojant vietines žaliavas, sukurti sukietėjusio betono susitraukimą mažinančių įmaišų derinį.

Darbo uždaviniai:

1. Suprojektuoti betono sudėtis.
2. Nustatyti betono susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką sukietėjusio betono susitraukimo deformacijoms.
3. Nustatyti betono susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką šviežio betono mišinio savybėms: šviežio betono mišinio tankiui, konsistencijai, oro kiekiui, bei ištirti betono susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką sukietėjusio betono mechaninėms savybėms ir ilgaamžiškumui: stipriui gniuždant, stipriui lenkiant, atsparumui šalčiui, poringumo parametrui.
4. Atliktus tyrimus, nustatyti ar vietinės žaliavos, gali būti pritaikytos betonuose kaip betono susitraukimą mažinančios įmaišos.

1. Literatūros apžvalga

Betonas neabejotinai yra viena plačiausiai naudojamų statybinių medžiagų visame pasaulyje. Sunku patikėti, tačiau betoną yra antra dažniausiai pasaulyje naudojama medžiaga po vandens. Betoną, kaip statybinę medžiagą yra labai paklausi, dėl prieinamos kainos ir ypač gerų mechaninių savybių. Šių dienų architektai modeliuodami pastatus betoninėmis ir gelžbetoninėmis konstrukcijomis, sugeba išgauti dar neregėtas statinių formas, o projektuotojai džiaugiasi paprastu gelžbetoninių elementų konstruktyvumu. Tuo tarpu betoninių ir gelžbetoninių gaminių gamintojai gali džiaugtis preciziškai tiksliais, automatizuotomis gamybos linijomis.

Betonas turi aibę teigiamų savybių ir yra ilgaamžė statybinė medžiaga, tačiau taip pat turi ir neigiamų savybių, viena jų – susitraukimas kietėjant. Betono susitraukimas kietėjant priklauso nuo daugybės veiksnių, tačiau kaip sumažinti arba visiškai eliminuoti betono susitraukimus, nesugadinus kitų svarbių betono savybių ir per daug neiškrepus pačios medžiagos kainos, klausimas į kurį atsakymo ieško daugybė viso pasaulio mokslininkų.

1.1. Betoninių mišinių susitraukimai ir juos lemiantys veiksniai

Pasak, Murayama ir Sugie [1] betono plyšiai bei įtrūkimai iki šiol yra aktuali problema. Didėjant cementinio akmens susitraukimų deformacijoms, automatiškai padidėja ir vidiniai betono įtempiai, o kuomet šie įtempiai viršija leistiną betono tempimo stiprio ribą – betoną ima pleišėti bei trūkinėti.

Pasak, Rezvani *et al.* [2] betono susitraukimas yra laisvas betono tūrio mažėjimas, tam tikrame laiko intervale. Cementinių medžiagų susitraukimo deformacijos susidaro dėl keturių pagrindinių tipų susitraukimų: savaiminio, džiūvimo, plastinio ir karbonizacijos susitraukimų.

Wu *et al.* [3] teigia jog betono susitraukimai iš esmės vyksta dviem skirtingais etapais: ankstyvuojū ir vėlyvuojū. Ankstyvasis etapas įvyksta per pirmąsias 24 valandas ir yra apibūdinamas, kai betono mišinys yra paklojamas ir pradeda kietėti. Vėlyvasis etapas įvyksta po 24 valandų. Abiejuose etapuose vyksta savaiminiai ir džiūvimo susitraukimai, kurių rezultatai būna gana panašūs. Pastebėta, jog savaiminis susitraukimas lemia didžiausią betono tūrio pokytį ankstyvajame etape palyginus su kitų tipų susitraukimų deformacijomis.

Pasak, Gribniak *et al.* [4] savaiminiai susitraukimai dažniausiai susidaro dėl betono mišinyje vykstančių cheminių reakcijų (cemento hidratacijos) ir savaiminio vandens kiekio praradimo. Šie susitraukimai pasireiškia po šviežio mišinio susirišimo.

Pasak, Wu *et al.* [3] kuomet betoną kietėja aplinkoje, kurioje drėgnis yra ženkliai mažesnis už betono mišinio higroskopinį drėgnį, vandeniui pasišalinant iš kietėjančio betono mišinio susidaro džiūvimo susitraukimai. Gribniak *et al.* [4] teigia jog betone esanti drėgmė juda kapiliarais, o kapiliarinė jėga bando pašalinti iš betono drėgmės perteklių, tam, kad būtų suvienodintas drėgmės kiekis su aplinka. Greičiausiai šie drėgmės nuostoliai vyksta plonuose, didelio ploto gaminiuose.

Wu *et al.* [3] padarė prielaidą, kad pagrindiniai kietėjančio betono susitraukimai susidaro dėl dviejų tipų susitraukimų – džiūstamojo ir savaiminio. Įprastinio betono savaiminiai susitraukimai yra ganėtinai neryškūs, siekiantys apie 100 μm, todėl betono susitraukimai dažniau yra vertinami analizuojant džiūvimo susitraukimų deformacijas. Tiesa, Wu *et al.* [3] įvertino didelio stiprumo betono susitraukimus. Mokslininkai ištyrė, kad savaiminio susitraukimo deformacijos būtinai turi būti

įvertintos ir net gali būti didesnės už džiūstamojo susitraukimo deformacijas, kuomet didelio stiprumo betono gamybai yra naudojamas mažas vandens ir cemento santykis ($<0,42$).

Wyrzykowski *et al.* [5] paaiškino plastinių susitraukimų susidarymo principą. Plastiniai susitraukimai susidaro ankstyvojoje stadijoje, per pirmąsias valandas, kuomet iš šviežiai pakloto betono mišinio paviršiaus staiga išgaruoja laisvas vanduo, kol betonas dar nėra sukietėjęs. Šis reiškinys turi labai paprastą paaiškinimą, kai betonas dar nėra sukietėjęs ir jis vis dar absorbuoja vandenį, didesnę tankį turintys betono mišinio komponentai (užpildai ir rišamoji medžiaga) dėl gravitacijos skverbiasi į gaminio apačią, o vanduo, kadangi yra lengvesnis, kyla į viršų, taip ant betono mišinio paviršiaus susiformuoja plonas vandens sluoksnis. Susidaręs plonas vandens sluoksnis, veikiamas atmosferos poveikių (vėjo ar saulės) po truputį išgaruoja. Jeigu paviršinis vanduo yra išgarinamas staiga, betono paviršiuje atsiranda negilūs, paviršiniai, įtrūkimai. Norint apsaugoti nuo šių įtrūkimų, reikia ypač didelį dėmesį skirti betono priežiūrai: karštą dieną pravartu apsaugoti betoną nuo tiesioginių saulės spindulių, padaryti vėjo užtvaras, naudoti atitinkamas chemines įmaišas.

Pasak, Gribniak *et al.* [4] karbonizacijos susitraukimai susidaro įvykus cheminei reakcijai tarp betono mišinio ir ore esančio anglies dioksido. Šis susitraukimas dažniausiai pasireiškia betono paviršiuje.

Mazzoli *et al.* [6] teigia jog įprastai betono džiūstamojo susitraukimo deformacijos yra didesnės palyginti su plastinio ir savaiminio susitraukimo deformacijomis. Esant tiek didelėms, tiek mažoms susitraukimų deformacijoms, kietėjančiame betone atsirandantys įtrūkimai ar plyšiai dėl plastinių arba savaiminių susitraukimų gali kombinuotai išsivystyti kartu su džiūstamojo susitraukimo deformacijomis. Natūralu, jog susidaręs betono pleišėjimas sukels nepageidaujamus konstrukcijų pokyčius bei potencialiai gali turėti neigiamą poveikį betono ilgaamžiškumui.

Betono susitraukimas yra sudėtingas reiškinys, kuris susidaro betonui kietėjant, kai cementinės tešlos susitraukimo metu inertinės medžiagos yra gniuždomos. Pasak, Žurauskienės *et al.* [7] betono susitraukimo deformacijų susidarymo galimybė priklauso nuo aibės struktūrinių ir technologinių veiksnių, tokių kaip: cemento atmaina, cemento kiekis betone, V/C santykis, įmaišų tipas, kietėjimo aplinka bei temperatūra, užpildų stambumas, drėgnis ir granulimetrinės sudėtis.

1.2. Betoninių mišinių struktūros įtaka susitraukimui

Didelę įtaką savaiminiams ir džiūvimo susitraukimams turi betono porų struktūros parametrai, kuriuos ištyrė Ma ir Ye [8]. Pasak mokslininkų, savaiminis ir džiūvimo susitraukimas turi linijinę priklausomybę su betono porų struktūros parametrais, tokiais kaip poringumas ir poros diametras. Mokslininkai ištyrė jog betono poros, kurių diametras 50 nm arba mažesnės, turi kritinę įtaką džiūvimo susitraukimams, nes lengvai susidaro kapiliarinis slėgis ir daug greičiau išgaruoja laisvas vanduo, kai poros yra būtent tokio didumo.

Pasak, Kristiawan ir Aditya [9] pagrindinė džiūvimo susitraukimų priežastis yra ta, jog pirmosiomis dienomis, kuomet cementinis akmuo formuojasi, cementinio akmens struktūroje yra mažais kanalėliais susijungusių porų, o būtent tais kanalėliais laisvas vanduo pasišalina taip sukeldamas džiūvimo susitraukimus.

Lv *et al.* [10] nustatė jog v/c santykis ir užpildai turi reikšmingos įtakos betono susitraukimų vystymuisi. Reziūmavęs savo tyrimų rezultatus Marčiukaitis [11] pateikė prielaidą jog, kuomet betono gamybos metu yra naudojamas vienodas v/c santykis, cementinio akmens susitraukimas tampa tiesiogiai proporcingas naudojamam cemento kiekiui ir atvirkščiai proporcingas v/c, kuomet vandens kiekis yra pastovus.

Maruyama ir Sugie [12] nustatė, kad padidinus cemento kiekio ir užpildų santykį arba sumažinus v/c santykį, po 180 parų, betoninio mišinio džiūstamojo susitraukimo deformacijos sumažėja. Tuo tarpu Hajibabae ir Ley [13], teigia jog standartinės cemento tešlos džiūstamojo susitraukimo deformacijų reikšmės yra 1,7 karto didesnės nei skiedinių ir net 6-8 kartus didesnės palyginti su betonu.

Kurda *et al.* [14] nustatė jog betono užpildų dalelių didumas ir granulimetrinė sudėtis iš esmės neturi įtakos betono susitraukimui, bet naudojant didesnes frakcijos užpildus galima pagaminti betono mišinį, kuriame cementinės tešlos kiekis bus mažesnis, o tai lemtų mažesnį susitraukimą.

Mokslininkas Zhang *et al.* [15] ištyrė jog sunkieji betono užpildai pagaminti iš granito, žvirgždo ar kvarcito yra praktiškai nesuspaudžiami bei pasižymi ypač dideliu tamprumo moduliui. Tuo tarpu, Marčiukaičio [11] nuomone, betono gamybai naudojamų užpildų suspaudžiamumas priklauso nuo jų stiprumo ir poringumo. Jeigu inertinės medžiagos pasižymi suspaudžiamumu, kietėjantis betono mišinys yra lengviau veikiamas susitraukimo deformacijų. Taip pat pabrėžiama tai, kad milžinišką įtaką susitraukimo deformacijoms turi inertinių medžiagų užterštumas. Betono užteršto molingomis priemaišomis traukimo deformacijos, palyginus su betonu be priemaišų, padidėja iki 70 %.

Pasak, Marčiukaičio [11] betono mišinio susitraukimui tam tikrą poveikį turi cemento cheminė sudėtis. Betono susitraukimų deformacijos padidėja, kuomet cemento cheminėje sudėtyje nėra pakankamo kiekio gipso.

Mokslininkas Wang *et al.* [16] atliko tyrimą, kuriame analizavo savaiminio bei džiūvimo susitraukimų deformacijas naudodami įprastą portlandcementį (OPC) ir žemoje temperatūroje degtą portlandcementį (LHP). Taip pat, šiame tyrime buvo nagrinėjamas silicio mikrodulkių (SF) poveikis betonui, varijuojant šios įmaišos kiekį 0–12% nuo rišiklio kiekio. Tyrimas truko 180 dienų.

Mokslininkai suprojektavo penkias betono sudėtis su skirtingais kiekiais cemento bei silicio mikrodulkių (žr. 1 ir 2 lentelė).

1 lentelė. Betono mišinių sudėtys [16]

Žymuo	v/c santykis	Silicio mikro dulkės %	Maišymo proporcijos (kg/m ³)						Suslūgimas (mm)
			vanduo	cementas	Silicio mikro dulkės	Smėlis	Stambus užpildas	Super plastiklis	
OC	0,4	0	120	300	0	628	1397	2.1	50
LC0	0,4	0	120	300	0	627	1397	2.1	50
LC4	0,4	4	120	288	12	626	1392	2.4	46
LC8	0,4	8	120	276	24	624	1388	2.7	43
LC12	0,4	12	120	264	36	622	1384	3.0	40

Mokslininkai pastebėjo, jog per pirmąsias 28 dienas įvyko beveik 80 % visų savaiminių susitraukimų, o per likusias tyrimo dienas, savaiminiai susitraukimai buvo nežymūs. Savaiminiai susitraukimai įvyksta dėl dviejų priežasčių. Pirmoji yra cemento hidratacija, kadangi pirmąsias 28 dienas ji yra intensyviausia dėl staigaus kapiliarinio slėgio, todėl įvyksta staigus savaiminis susitraukimas. Kita priežastis yra porų struktūros pakitimai būtent dėl tos pačios cemento hidratacijos.

Pasak, Deboodt *et al.* [17] staigus ankstyvasis savaiminis susitraukimas įvyksta būtent dėl staigaus medžiagos porų struktūros pakitimo ankstyvajame betono mišinio kietėjimo etape.

2 lentelė. Fizinės savybės, cheminė ir mineraloginė rišamųjų medžiagų sudėtis [16]

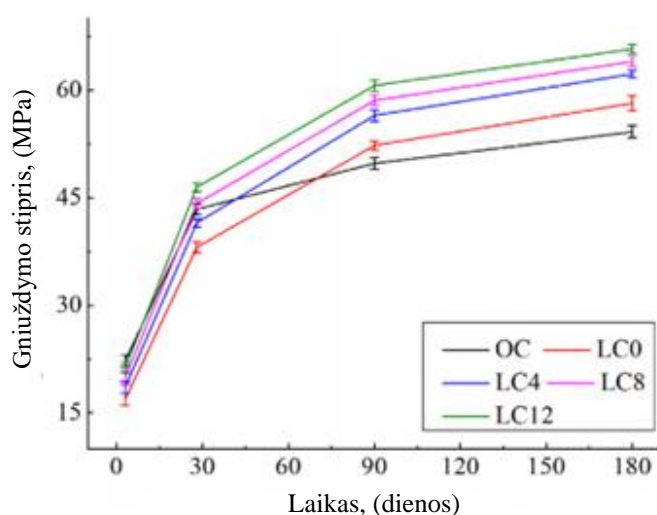
Parametrai	Medžiagos		
	LHP	OPC	SF
Cheminė sudėtis (%)			
CaO	61,86	63,10	1,4
SiO ₂	23,98	20,21	94,4
Fe ₂ O ₃	4,22	4,56	1,2
Al ₂ O ₃	4,23	4,57	0,8
MgO	2,89	3,94	0,6
SO ₃	2,31	2,36	-
R ₂ O ^a	0,31	0,35	0,5
Fizikinės savybės			
Vidutinis dalelių dydis (D50, μm)	17,5	18,2	0,14
Mineraloginė sudėtis (%) ^b			
C ₃ S	28,7	59,4	-
C ₂ S	47,0	13,2	-
C ₃ A	4,1	4,4	-
C ₄ AF	12,8	13,9	-
Gipsas	3,9	4,0	-
^a Šarmai (R ₂ O) = Na ₂ O + 0.658K ₂ O.			
^b Huaxin Cemento gamyklos pateikti duomenys, atlikus Bogue analizę.			

Tyrimų rezultatai parodė jog savaiminiai susitraukimai naudojant žemoje temperatūroje degtą portlandcementį LHP susidaro mažesni nei naudojant įprastinį portlandcementį OPC. Savaiminiai susitraukimai po 3, 28 ir 180 dienų yra apie 13×10^{-6} , 28×10^{-6} ir 30×10^{-6} mažesni nei tie kuriuose buvo

naudotas OPC. Taigi, savaiminiai susitraukimai įvykstantys OPC betono mišiniuose yra didesni lyginant su portlandcemenčiais, kuriuose belito C₂S kiekis yra didesnis [16].

Silicio mikrodulkių SF naudojimas padidino savaiminio susitraukimo deformacijų kiekį betone. Ypatingai tai matyti ankstyvojoje stadijoje ir kuomet naudojamas didžiausias kiekis silicio mikrodulkių. Tyrime silicio mikrodulkės buvo dozuojamos 4%, 8% ir 12% nuo viso vandens kiekio ir visi bandiniai su silicio mikrodulkių įmaišomis parodė neigiamus rezultatus, susidarė savaiminio susitraukimo deformacijos. SF įmaišos kartu su LHP atitinkamai padidino savaiminius susitraukimus 19 %, 38 % ir 118 % po 3 dienų, 14 %, 29 % ir 71 % po 28 dienų ir 13 %, 23 % ir 60 % po 180 dienų. Tuo tarpu džiūvimo susitraukimų per pirmąsias 14 betoninio bandinio kietėjimo dienų susidarė 60 %, vėliau džiūvimo susitraukimai nebuvo tokie intensyvūs. Tyrimų rezultatai parodė jog džiūvimo susitraukimų deformacijos naudojant LHP cementą susidaro mažesnės nei naudojant įprastinį portlandcementį OPC. Džiūvimo susitraukimai po 3, 28 ir 180 dienų yra apie 42 %, 26 % ir 24 % mažesni nei tie kuriuose buvo naudotas OPC [16].

Silicio mikrodulkių poveikis džiūstamojo susitraukimo deformacijoms toks pat kaip ir savaiminiam susitraukimui – padidėjo susitraukimų kiekis betone. SF įmaišos kartu su žemoje temperatūroje degtu portlandcemenčiu atitinkamai padidino džiūvimo susitraukimus apie 25 %, 38 % ir 87 % po 3 dienų, 12 %, 22 % ir 43 % po 28 dienų ir 10 %, 20 % ir 39 % po 180 dienų. Taigi silicio mikrodulkės nėra tinkamos džiūstamojo susitraukimo mažinimui dėl dviejų priežasčių. Pirmoji, silicio milteliai turi didelę įtaką betono porų struktūrai, dėl kurios padidėja savaiminis betono susitraukimas. Antroji, pucolaninis silicio miltelių (SF) efektas pagreitina cemento hidratacijos reakciją ir atsiranda vandens trūkumas, todėl sumažėja santykinės drėgmės kiekis betono viduje ir suintensyvėja laisvo vandens savaiminis išgarinimas [16].



1 pav. Gniuždymo stiprio prieaugis betonuose [16]

Atlikę gniuždymo stiprio nustatymo bandymą, mokslininkai nustatė jog gniuždymo stipris bėgant laikui vis didėjo (žr. 1 pav.). Silicio mikrodulkių panaudojimas betone iš esmės pagerina betono gniuždymo stiprumą. Betono mišinyje, kuriame yra 4 %, 8 % ir 12 % silicio mikrodulkių, gniuždymo stipris po 3 dienų padidėja atitinkamai 10 %, 18 % ir 26 %, po 28 dienų padidėja 9 %, 16 % ir 22 %, o po 180 dienų atitinkamai 7 %, 10 % ir 13 %, palyginus su kontroline betono sudėtimi, kurioje nėra SF [16].

1.3. Betoninių mišinių kietinimo sąlygų įtaka susitraukimui

Pasak, Marčiukaičio [11] kietėjančių betoninių mišinių susitraukimas – ilgas procesas, tačiau didžioji dalis betono susitraukimų pasireiškia per pirmas 60–90 parų, praėjus 1 kietėjimo parai, nuo mišinio maišymo pradžios. Vėliau, kuomet betono kietėjimo trukmė – ilgėja, betono susitraukimų intensyvumas palaipsniui – mažėja.

Yalçınkaya ir Yazıcı [18] teigia, kad ilgalaikio kietėjimo metu dalis betono mišinio susitraukimo deformacijų susidaro dėl karbonizacijos, tačiau aplinkos veiksniai – drėgmė ir temperatūra, turi didžiausią įtaką betono susitraukimo deformacijų susidarymui.

Hajibabae ir Ley [19] teigia, kad tyčia pailginus betono kietėjimo trukmę vandenyje, cementinio akmens susitraukimo pradžia yra pavėlinama. Toks betono kietinimo efektas galutinėms susitraukimo deformacijoms yra nedidelis, tačiau kompleksiškas, kadangi nehidratavusių dalelių kiekis cementiniame akmenyje sumažėja. Pasak, Hajibabae ir Ley [19] betoninių gaminių forma, dydis ir paviršiaus ploto ir tūrio santykis, turi įtakos betono susitraukimo deformacijų didumui, kadangi betoniniai gaminiai kietėti pradeda būtent nuo gaminio paviršiaus.

Dönmez ir Bažant [20] nurodo, kad betono kietėjimo greitis betono susitraukimams didelės įtakos neturi, išskyrus, kuomet staiga pasikeičia kietėjimo sąlygos. Staiga pasikeitus kietėjimo sąlygoms betone, jo susitraukimas padidėja, ko pasekoje atsiranda plyšių atsiradimo tikimybė. Mokslininkai teigia jog betone esantis vanduo, veikiamas vėjo ar priverstinės šilumos, nepasišalina iš betono greičiau nei įprastai. Taip pat, mokslininkai išskiria išimtį jog minėti poveikiai, vandens pasišalinimo greičiui turi įtakos, kuomet betonas yra šviežiai paklotas. Dönmez ir Bažant [20] nustatė, kad betono laidumas drėgmei – nedidelis, todėl potencialiai gali atsirasti tik menkas garavimas iš betono, o jis neintensyvėja orui judant.

1.4. Įmaišų įtaka betoninių mišinių susitraukimui

Usanova *et al.* [21] tyrė betoną, kuriame panaudotas polikarboksilato pagrindu pagamintas superplastifikatorius ir metakaolinas. Tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti v/c santykio, superplastiklio ir metakaolino poveikį plastiniams betono susitraukimams. Tyrime panaudoti dviejų tipų cementai (žr. 3 lentelė): alito-aluminato (cementas A) ir belito-celito (cementas B).

3 lentelė. Cheminė ir mineraloginė cementų sudėtis [21]

Cemento tipas	Cheminė sudėtis [%]								Mineraloginė sudėtis [%]			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Cementas A	20,7	4,6	3,5	65,0	1,2	2,9	0,8	0,2	73,0	8,1	5,2	12,0
Cementas B	20,9	4,1	4,9	64,4	1,1	2,5	0,5	0,2	65,0	12,5	2,6	15,7

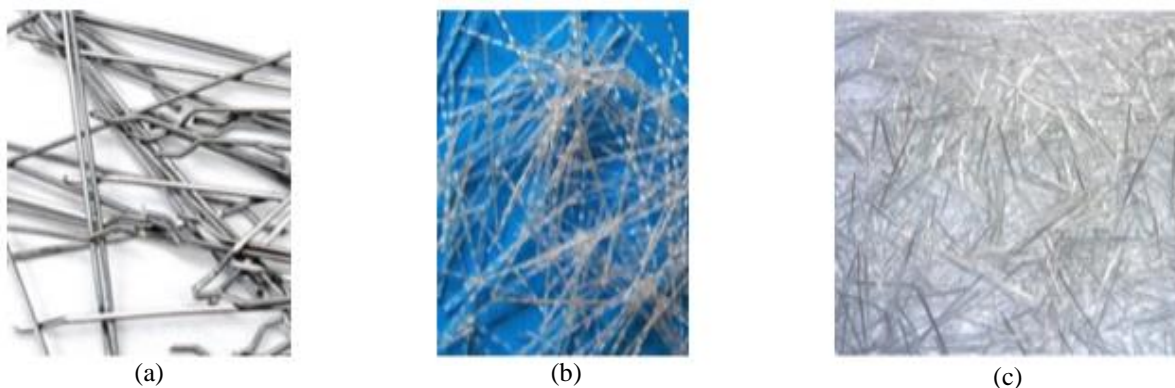
Usanova *et al.* [21] tyrimų rezultatai parodė jog, kuomet v/c santykis yra padidinamas, plastiniai susitraukimai naudojant abiejų tipų cementus suintensyvėja ir padidėja, tačiau v/c santykis, didesnę įtaką turi cementui A, kadangi per pirmąsias 8 valandas, betonas, kuriame buvo naudojamas šis cementas susitraukė 1,71–5,21 mm/m, kai v/c santykis 0,2–0,35. Atitinkamai naudojant cementą B, per pirmąsias 8 valandas betonas susitraukė 0,95–2,63 mm/m. Mokslininkai nustatė, kad naudojant cementą A, plastiniai susitraukimai susidarė 1,51–1,98 kartų didesni nei naudojant cementą B.

Taip pat, Usanova *et al.* [21] nustatė jog padidinus polikarboksilato superplastifikatoriaus kiekį betono mišinyje, kuriame naudojamas cementas A, susitraukimai vidutiniškai padidėjo maždaug 40%, o betono mišinyje, kuriame naudojamas cementas B, atitinkamai apie 80 %. Taigi, mokslininkai teigia jog betone panaudojus alito-aluminato cementą (cementas A) susidaro tokie pat susitraukimai, kaip panaudojus belito-celito cementą (cementas B) su 1,89 karto didesniu superplastifikatoriaus kiekiu.

Usanova *et al.* [21] teigia, kad dalį cemento pakeitus metakaolinu, pradinis susitraukimas sumažėja. Jeigu metakaolino kiekis betono mišinyje padidėjo, tuomet abiejų cementų susitraukimai sumažėjo, tačiau metakaolino poveikis cementui A buvo ryškesnis.

Zhu *et al.* [22] savo tyrime išskiria tai, kad superplastifikatoriai yra linkę didinti ankstyvuosius džiūstamuosius betoninių mišinių susitraukimus. Taip pat, mokslininkai pabrėžia tai jog bandinio, kuriame panaudotas superplastifikatorius, džiūstamasis susitraukimas, lyginant su kontroliniu bandiniu be plastifikatoriaus, kietėjant nuo 90 ir daugiau parų, susitraukimų prieaugis yra nežymus ir vis mažėjantis.

Mokslininkas Ullah *et al.* [23] atliko išsamų tyrimą, kurio tikslas buvo išsiaiškinti skirtingų tipų fibrų įtaką ankstyvajam savaiminiam betono susitraukimui. Tyrimams naudotos plieninės fibros užlenktais galais, polipropileno fibros bei stiklo fibros (žr. 2 pav.). Tyrimuose naudoti granitiniai užpildai, o cementai parinkti net kelių skirtingų rūšių. Taip pat buvo naudojama keletas cheminių įmaišų, tokių kaip traukumą mažinanti (SRA), orą itraukianti (AEA) ir superplastiklis (SP). Mokslininkai suprojektavo 10 skirtingų betono mišinių, kuriuose panaudoti įvairūs fibrų, cementų bei cheminių įmaišų deriniai.



2 pav. (a) Plieninės (užlenktais galais) fibros, (b) Polipropileno fibros, (c) Stiklo fibros [23]

Savaiminės susitraukimo deformacijos buvo išmatuotos remiantis EN 13892-9:2018. Fibrų įtaka betonui buvo tiriama naudojant 1 metro ilgio formą (Schleibinger Testing Systems) su specialiais davikliais, kurie fiksuoja ankstyvuosius savaiminius susitraukimus (žr. 3 pav.) [23].



3 pav. Savaiminio susitraukimo bandymas naudojant Schleibinger Bending-Drain įrangą [23]

Ullah *et al.* [23] šios įrangos pagalba išmatavo dešimt skirtingų betono mišinių. Bandinių temperatūra ir linijinės deformacijos buvo fiksuojamos 48 val., bandymo aplinkoje, kurioje buvo 20°C temperatūra. Bandymas buvo pradėtas maždaug 40 min. po to kai vandens ir cemento dalelės buvo sumaišytos. Tam kad būtų galima palyginti skirtingų fibrų poveikį, skirtinguose cementuose, visuose betono mišiniuose buvo naudojamas toks pat kiekis fibrų (0,38 % nuo viso betono mišinio tūrio). Kadangi fibrų tankiai skiriasi, 0,38 % nuo viso tūrio atitinka 30 kg/m³ plieninių fibrų su užlenktais galais, 3,82 kg/m³ polipropileno fibrų ir 10,24 kg/m³ stiklo fibrų. Suprojektuotas betonas buvo C30/37 klasės, konsistencijos klasė S3, o V/C santykis 0,50–0,55.

Ullah *et al.* [23] nustatė, kad ankstyvieji savaiminiai susitraukimai betono mišiniuose, kuriuose buvo naudojamos fibros susidarė ženkliai mažesni, nei betono mišiniuose, kuriuose fibrų nebuvo. Patvirtinta jog 0,38 % fibrų nuo viso betono mišinio tūrio pakako, kad būtų sumažintas ankstyvasis savaiminis susitraukimas. Nustatyta, kad ankstyvųjų savaiminių susitraukimų sumažinimui polipropileno fibros buvo daug efektyvesnės už plienines fibras užlenktais galais. Nustatyta, kad cemento tipas turi įtakos betono susitraukimui, kuo daugiau cemento cheminėje sudėtyje trikalcio aluminato (C_3A) tuo didesnės gali susidaryti ankstyvosios savaiminės bei vėlyvosios džiūvimo susitraukimų deformacijos. Taip pat įsitikinta jog 1 % susitraukimą mažinančių įmaišų (SRA) yra efektyvus būdas sumažinti ankstyvasias savaimines bei vėlyvasias džiūvimo susitraukimų deformacijas.

Pasak, Rahman *et al.* [24] įtrūkimai betoniniuose elementuose gali būti sumažinti dalį įprastinio portlandcemenčio pakeičiant plėtriuoju, K–tipo cementu. K–tipo plėtrusis cementas yra sudarytas iš kalcio sulfoaluminato (CSA). Plėtrusis cementas (CSA) yra ženkliai ekologiškesnis produktas lyginant jį su įprastiniu cementu, kadangi plėtriojo cemento gamybos metu yra išskiriamas daug mažesnis CO_2 kiekis. Richardson *et al.* [25] teigia jog ankstyvasis cemento plėtimasis betone sukuria gniuždymo įtempius, o pastarieji neutralizuoja betone esančius ankstyvuosius tempimo įtempius, todėl yra sumažinami betono susitraukimai.

Chaunsali ir Mondal [26] ištyrė plėtriojo cemento (CSA) įtaką ankstyvajam betono plėtrumui bei hidratacijai. Buvo tiriami trys skirtingi cementiniai mišiniai, kuriuose 7 %, 15 % ir 30 % įprastinio cemento buvo pakeista plėtriuoju cementu (CSA). Mokslininkai nustatė, kad mišinys kuriame buvo 7 % plėtriojo cemento, pasižymėjo nedideliu plėtrumu, tuo tarpu mišinys kuriame buvo 30 % plėtriojo cemento pasižymėjo ženkliai didesniu plėtrumu, kuris vėliau peraugo į įtrūkimus. Mišinys, kuriame buvo 15 % plėtriojo cemento parodė adekvatų plėtrumą ir kompensavo susitraukimus, susidariusius dėl tempimo įtempių.

Pasak, Ardeshirilajimi *et al.* [27] cemento hidratacijos reakcijai, labai svarbus yra vanduo bei jo pasiskirstymas betono mišinyje. Vidinis kietinimas yra veiksmingas būdas tiekti pakankamą vandens kiekį hidratacijos laikotarpiu. Tinkamai naudojami lengvieji užpildai (LWA) gali būti naudojami, kaip vidiniai agentai, pernešantys vandenį, taip veikdami, kaip betono susitraukimo mažinimui. Veiksmingas būdas yra lengvuosius užpildus sudrėkinti prieš paruošiant betono mišinį, tai palengvintų cemento hidratacijos procesą, kadangi vidinis kietinimo procesas yra ženkliai efektyvesnis lyginant su išoriniu kietinimu, nes vanduo yra paskirstomas viduje, o ne nuo paviršiaus.

Arezoumandi [28], teigia jog susitraukimą mažinančios įmaišos (SRA) yra dar viena plačiai naudojama technologija, padedanti sumažinti džiūvimo susitraukimus bei betono pleišėjimą. Susitraukimą mažinančios įmaišos sumažina vandens paviršiaus įtempius, susidariusius betono porose. Paviršiaus įtempių sumažėjimas taip pat sumažina kapiliariniu įtempius, todėl betone susidaro mažesnės susitraukimo deformacijos.

Saliba *et al.* [29] ištyrė susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką betonui, naudojant 1 % cheminės įmaišos, nuo visos rišiklio masės. Nustatyta jog po 7 dienų džiūvimo susitraukimai sumažėja iki 56 %, kuomet v/c santykis yra 0,65. Taip pat pastebėta, kad naudojant 2 % SRA, po 28 dienų susitraukimai sumažėja iki 62 %. Padaryta išvada jog į betono mišinį įdėjus susitraukimą mažinančių įmaišų sumažėja savaiminis susitraukimas, lyginant su kontroliniu bandiniu.

Chaunsali *et al.* [30] teigia jog naudojant didelį kiekį SRA džiūvimo susitraukimai sumažėja apie 50 %.

Mehdipour ir Khayat. [31] ištyrė susitraukimą mažinančios įmaišos ir plėtriojo cemento įtaką džiūvimo traukumui. Mokslininkai suformavo keturis cementinius mišinius, kuriuose buvo naudojami skirtingi minėtų medžiagų deriniai. Pirmasis – kontrolinis bandinys su įprastu portlandcemenčiu, antrasis – 15 % portlandcemenčio pakeista plėtriuoju cementu, trečiasis – 5 % SRA, ketvirtasis – 15 % plėtriojo cemento ir 5 % SRA. Rezultatai parodė jog susitraukimą mažinanti įmaiša (SRA) su plėtriuoju cementu sukėlė reikšmingą ankstyvąją plėtimąsi, todėl sumažėjo cementinio akmens susitraukimas.

Moksliškai įrodyta jog yra keletas skirtingų būdų, kaip sumažinti betoninių mišinių susitraukimų bei įtrūkimų susidarymą. Rahman *et al.* [32] atliko tyrimą, kurio tikslas buvo naudojant skirtingas medžiagas įvertinti trijų, tiltų konstrukcijoms skirtų, betono mišinių savybes, didžiausią dėmesį skiriant betone susidarantiems įtempiams, susitraukimams bei jų sumažinimui.

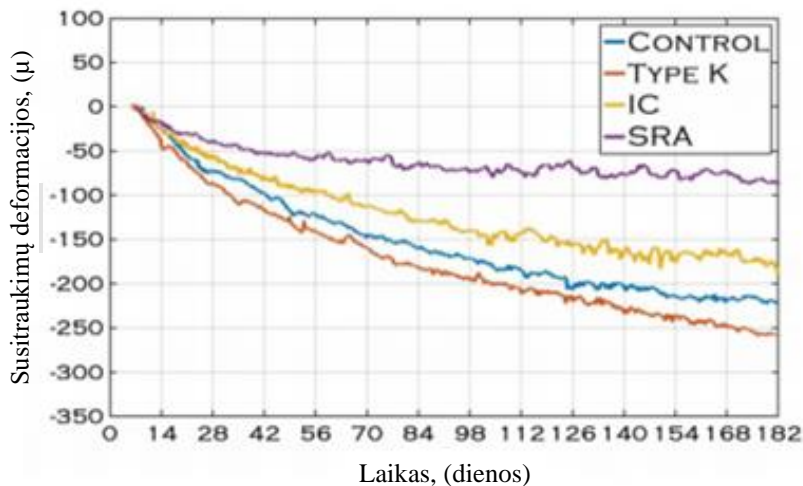
Bandymams buvo naudojama įprastinė betono mišinio sudėtis, o pakoregavus kontrolinę betono mišinio sudėtį buvo išgautos kitos trys betono sudėtys. Pirmojoje betono mišinio sudėtyje dalį įprastinio portlandcemenčio pakeitė susitraukimą kompensuojantis K-tipo cementas (15 % visos mišinio masės). Antroje betono mišinio sudėtyje dalis įprastinio smulkiojo užpildo buvo pakeista iš anksto sudrėkintais lengvaisiais–smulkiisiais užpildais (28 % visos mišinio masės). Trečiojoje betono mišinio sudėtyje buvo naudojama 7 l/m³ susitraukimą mažinančios įmaišos „SRA-Eclipse“ [32].

Norėdami tiksliai išmatuoti betone susidarantiems įtempiams Rahman et al. [32] nusprendė pagaminti realią tilto konstrukciją (žr. 4 pav.), kurios ilgis ir plotis atitinkamai 3 ir 2 metrai, o storis 20 cm. Įtempiai susidarantys tilto konstrukcijoje buvo matuojami bandinyje sumontavus 20 vnt. jutiklių, kurie buvo pririšti prie armatūros karkasų. Tuo tarpu betono susitraukimai buvo matuojami pagal ASTM C157, naudojant standartines betonines prizmes. Tyrimai truko 6 mėnesius. Tyrimų rezultatai buvo lyginami su kontroline betono mišinio sudėtimi, kuri nebuvo modifikuota K-tipo cementu, sudėkintais lengvaisiais–smulkiisiais užpildais ar SRA įmaiša.



4 pav. Tiltų konstrukcija po betono mišinio paklojimo [32]

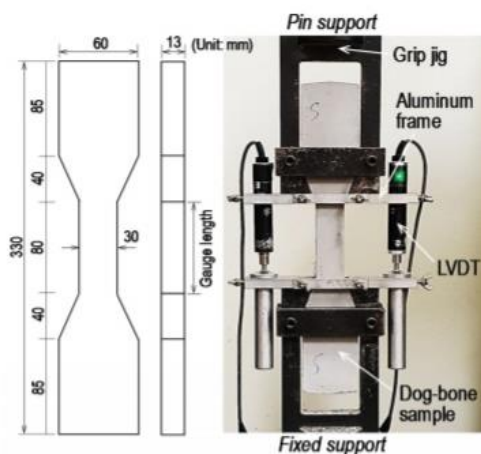
Gavę tyrimų rezultatus Rahman *et al.* [32] padarė išvadą jog po 7 dienų betone naudojant K-tipo cementą, lyginant su kontroliniu betonu, betonas išsiplėtė 209 %, naudojant IC – 49 %, naudojant SRA – 117 %. Lėčiausiai susitraukimai susidaro naudojant traukumą mažinančią įmaišą (SRA), taip pat naudojant SRA susidaro mažiausi susitraukimų įtempiai, o naudojant plėtrųjį K-tipo cementą įtempiai – didžiausi (žr. 5 pav.).



5 pav. Vidutiniai išilginiai susitraukimai [32]

Rahman *et al.* [32] nustatynėjo betono gniuždymo stiprį, suformavus ir sugniuždžius cilindrinį bandinį, kurio matmenys 150×300 mm. Betono gniuždymo stiprio nustatymo bandymas atliktas pagal amerikietišką standartą ASTM C39. Tyrimų rezultatai parodė jog kontrolinio bandinio vidutinis gniuždymo stipris po 28 dienų buvo 31,4 MPa, betono, kuriame panaudotas K-tipo cementas, gniuždymo stipris atitinkamai buvo 29,9 MPa, betono su sudrėkintais lengvaisiais užpildais, gniuždymo stipris – 48,1 MPa, o betono su SRA – 42,89 MPa.

Park *et al.* [33] atliko tyrimą, kuriame tyrė aukštos klasės cementinius kompozitus (HPCC), t. y. betoną kuris pasižymi ypač geromis mechaninėmis savybėmis. Tyrime buvo naudojamos medžiagos, kurios galėtų turėti įtakos betono susitraukimų sumažinimui. Tyrime buvo naudojami dviejų tipų titano dioksido TiO_2 milteliai, baltasis ir įprastasis portlandcemenčiai, dviejų tipų sintetinės fibros: stiklo ir polipropileno. Taip pat buvo naudojamos susitraukimą mažinančios įmaišos SRA, kurios dozuotos nuo 0 % iki 3 %.



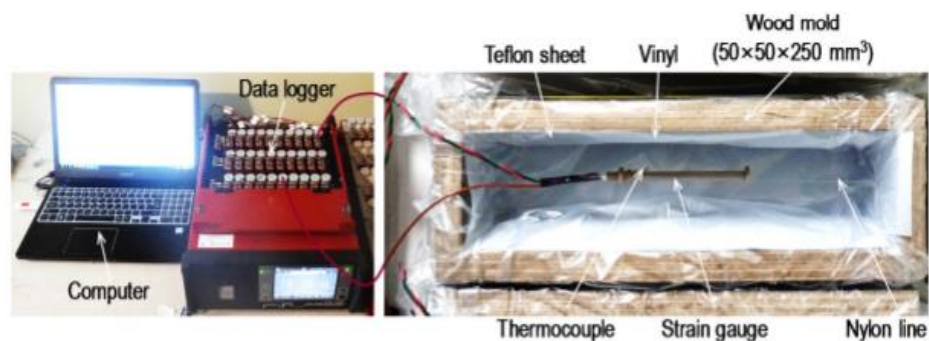
6 pav. Tempimo stiprio nustatymo įranga [33]

Park *et al.* [33] betono gniuždymo stiprį ištyrė naudodamas 100×200 mm cilindrinis bandinius bei juos sugniuždydamas hidrauliniu presu. Tuo tarpu tempimo stipris buvo nustatomas pagal Japonijos statybos inžinierių asociacijos rekomendacijas, naudojant kaulo formos bandinį (žr. 6 pav.).

Tyrimų rezultatai parodė jog polipropileno fibros yra efektyvesnės nei stiklo fibros, norint pagerinti betono mechanines savybes, t. y. gniuždymo ir tempimo stiprius. Taip pat tyrimų rezultatai patvirtino jog susitraukimą mažinančių įmaišų ir titano dioksido TiO₂ miltelių kombinavimas sumažina betono gniuždymo ir tempimo stiprius.

Zhang *et al.* [34] teigia jog nano-TiO₂ panaudojimas cementiniuose mišiniuose padidina gniuždymo stiprį dėl paspartintos cemento hidratacijos reakcijos ir sumažintos porų struktūros.

Park *et al.* [33] betono susitraukimų matavimui paruošė keletą prizmės formos bandinių, kurių matmenys 50×50×250 mm. Medinėje formoje buvo paklotas plonas teflono sluoksnis tam, kad būtų išvengta trinties tarp šviežio betono mišinio ir vidinių formos sienelių. Viduryje formelės buvo idėtas įtempimų matavimui skirtas jutiklis. Visi jutikliai buvo prijungti prie kompiuterio, kuriame realiu laiku buvo galima matyti betono susitraukimo rezultatus (žr. 7 pav.).



7 pav. Susitraukimų matavimo įranga [33]

Park *et al.* [33] tyrimų rezultatai parodė jog aukštos klasės cementinių kompozitų susitraukimą galima sumažinti į betono mišinį įdėjus stiklo ir polipropileno fibrų (bent 1 % nuo viso mišinio tūrio). Stiklo fibros lyginant su polipropileno fibromis efektyviau sumažino susitraukimo įtempimų susidarymą betone. Išsiaiškinta jog susitraukimą mažinančios įmaišos yra labai efektyvus būdas sumažinti savaiminius ir džiūvimo susitraukimus. Kuo didesnis kiekis SRA yra dedamas, tuo geresnius rezultatus, po 28 dienų kietėjimo galima pasiekti. Apytiksliai 43 % visų betono susitraukimų betone buvo sumažinta panaudojus 3 % susitraukimą mažinančių įmaišų. Titano dioksido TiO₂ milteliai neturi reikšmingo poveikio betono susitraukimų sumažinimui bei hidratacijos procesui. Taip pat nustatyta jog baltojo portlandcemenčio panaudojimas vietoje įprastinio portlandcemenčio yra gana veiksmingas būdas sumažinti betono susitraukimus, kurių sumažėja iki 20 %.

Kioumarsı *et al.* [35] atliko tyrimą, kurio tikslas buvo iširti susitraukimą mažinančių įmaišų SRA įtaką betono mechaninėms savybėms ir susitraukimams, kuomet betono mišinys yra suprojektuotas su skirtingais v/c santykiais. Mokslininkai pagamino betoninius bandinius, kurių v/c santykiai atitinkamai buvo 0,6, 0,5 ir 0,4. Trys bandiniai pagaminti su susitraukimą mažinančiomis įmaišos, kurių panaudota 1,5 % nuo visos cemento masės ir trys kontroliniai bandiniai be susitraukimą mažinančių įmaišų (žr. 4 lentelė).

4 lentelė. Betono mišinių sudėtys [35]

Grupė	Bandinio žymuo	Cementas (kg/m ³)	Vanduo (kg/m ³)	v/c	Smulkus užpildas (kg/m ³)	Stambus užpildas (kg/m ³)	SRA % (nuo cemento masės)	Superplastiklis % (nuo cemento masės)
1	Plain-0.6	350	210	0,6	1151	619	-	-
	SRA-0.6	350	210	0,6	1151	619	1,5	-
2	Plain-0.5	350	175	0,5	1173	632	-	0,5
	SRA-0.5	350	175	0,5	1173	632	1,5	0,5
3	Plain-0.4	350	140	0,4	1196	644	-	0,9
	SRA-0.4	350	140	0,4	1196	644	1,5	0,9

Tyrimams atlikti buvo naudotas portlandcementis CEM II (žr. 5 lentelė). Taip pat naudota skystos fazės propilenglikolio eterio pagrindu pagaminta susitraukimus mažinanti įmaiša SRA, vandentiekio vanduo, stambusis užpildas – granito skalda, smulkusis užpildas – smėlis ir polikarboksilato eterio pagrindu pagamintas superplastiklis.

5 lentelė. Cemento cheminė ir mineraloginė sudėtis [35]

Kompozicija	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	64,3	21,8	4,5	3,9	1,5	0,54	0,17	56	20	5	12

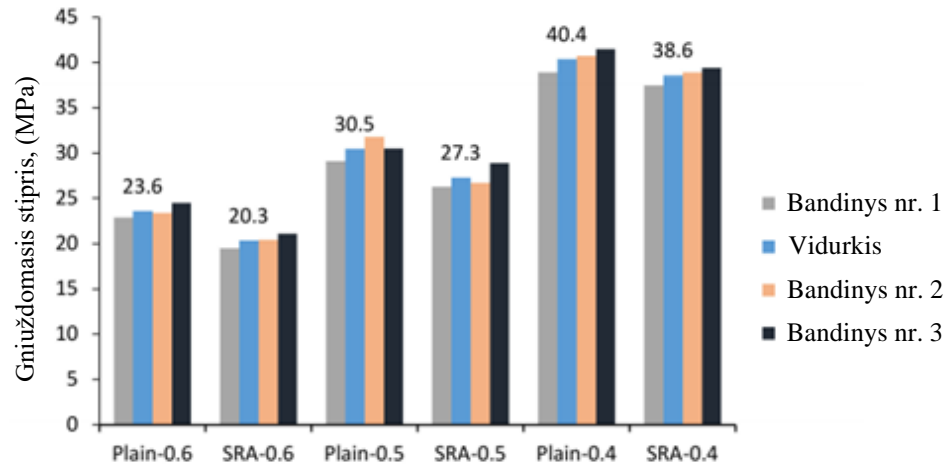
Kiourmarsi *et al.* [35] vadovaudamiesi amerikietiškais standartais, atliko du šviežio betono mišinio bandymus – konsistencijos (slankumo) bandymą, pagal ASTM C143 ir oro kiekio bandymą, pagal ASTM C231 (žr. 6 lentelė).

6 lentelė. Šviežio betono mišinio savybės [35]

Grupė	v/c	Bandinio žymuo	Suslūgimas (cm)	Oro kiekis (%)
1	0,6	Plain-0.6	21	1,6
	0,6	SRA-0.6	18	2,1
2	0,5	Plain-0.5	15	2,0
	0,5	SRA-0.5	12	2,4
3	0,4	Plain-0.4	15	2,6
	0,4	SRA-0.4	11	3,0

Galima pastebėti tai jog naudojant SRA, oro kiekis yra apie 2–3%. Taigi, mokslininkai padarė prielaidą jog susitraukimą mažinančios įmaišos didelės įtakos betono mišinio oro kiekiui neturi. Tuo tarpu susitraukimą mažinanti įmaiša turi įtakos betono mišinio konsistencijai. Betono mišinio, kuriame buvo SRA, slankumas, lyginant su kontroliniu bandiniu, kuriame nėra SRA, sumažėjo. Rezultatuose matyti tendencija jog kuo didesnis yra v/c santykis, tuo labiau sumažėja slankumas.

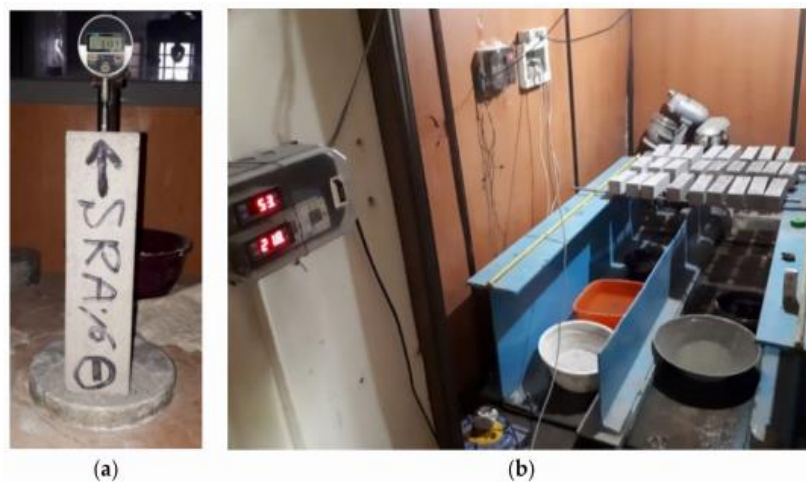
Kiourmarsi *et al.* [35] taip pat atliko sukietėjusio betono bandymus. Vadovaudamiesi europietišku standartu EN 12390-3 jie nustatė betoninių bandinių gniuždymo stiprį po 28 parų. Gniuždymo stiprio vidurkis buvo išvestas sugniuždžius tris tos pačios betono sudėties bandinius (žr. 8 pav.).



8 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai po 28 dienų kietinimo [35]

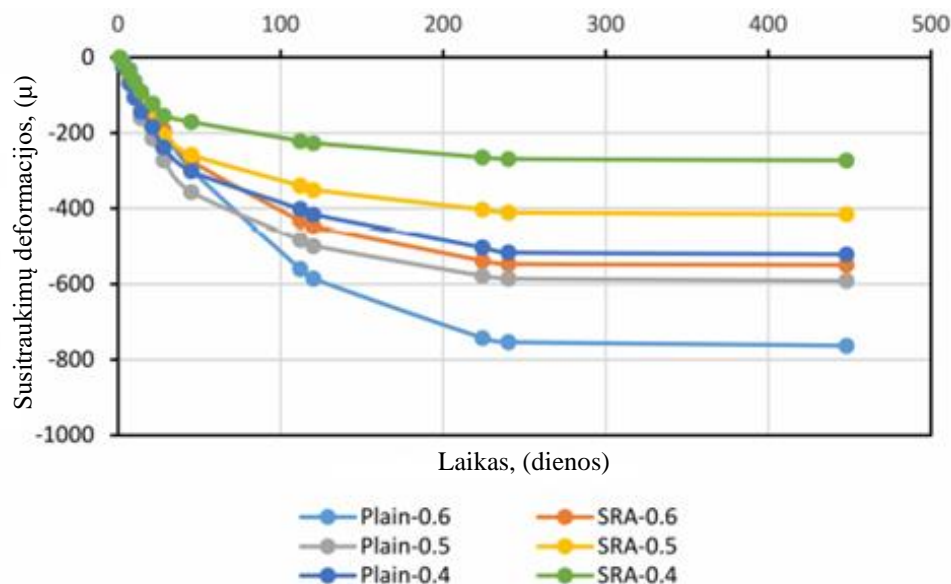
Kiourmars *et al.* [35] teigia jog susitraukimą mažinanti įmaiša SRA sulėtina cemento hidratacijos reakcijas, todėl tai turi įtakos gniuždymo stipriui. Betoniniuose bandiniuose, kuriuose buvo naudojamos susitraukimą mažinančios įmaišos, sumažėjo gniuždymo stipris, tačiau mokslininkai pastebėjo, kad kuo mažesnis vandens ir cemento santykis v/c , tuo stiprumo sumažėjimas dėl SRA poveikio yra mažesnis. SRA panaudojimas didelį v/c santykį turinčiuose betonuose sumažina betono gniuždymo stiprį, mišinyje, kuriame v/c santykis buvo 0,6, gniuždymo stipris sumažėjo 14 %.

Mokslininkai [35] vadovaudamiesi amerikietiškuoju standartu nustatė sukietėjusio betoninio bandinio susitraukimus, pagal ASTM C157 (žr. 9 pav.).



9 pav. (a) Susitraukimų matavimas, (b) bandinių kietinimo sąlygos [35]

Kiourmars *et al.* [35] tyrimų rezultatai parodė jog betonas, kuriame buvo naudojama susitraukimą mažinanti įmaiša SRA po 224 dienų kietėjimo, kompensuoja džiūvimo susitraukimus apie 27 %, 30 % ir 50 %, kuomet vandens ir cemento v/c santykiai yra atitinkamai 0,6, 0,5 ir 0,4 (žr. 10 pav.).



10 pav. Džiūvimo susitraukimų rezultatai [35]

Taigi, pasak Kiourmarsi *et al.* [35] susitraukimą mažinančios įmaišos turi svaresnį indėlį susitraukimų mažinime, kuomet vandens ir cemento santykis yra mažesnis. Susitraukimų deformacijos susidariusios dėl laisvo vandens praradimo, kurį sukelia vidiniai įtempimai betone, tampa įtrūkimų susidarymo priežastimi. SRA sumažina susitraukimų įtempimus. Svarbu yra tai jog kuo didesnis v/c santykis, tuo didesnę efektą turi susitraukimą mažinančios įmaišos ir tuo efektyviau yra kompensuojami džiūvimo susitraukimai. Rezultatai byloja, kad norint sumažinti džiūvimo susitraukimus, nėra būtina sumažinti v/c santykį, kadangi pati susitraukimą mažinanti įmaiša SRA pagerina betono susitraukimo savybes.

Pasak Gao *et al.* [36] betono susitraukimo deformacijų mažinimui puikiai tinka poli-vinilo-alkoholio PVA pluoštas arba vulkaniniai pelenai. Šios įmaišos gali pagerinti sukietėjusio betono gniuždymo stiprį, tuo pačiu metu sumažindamos paviršinius įtempimus susijusius su betono susitraukimu. Mokslininkai pabrėžia, kad susitraukimą mažinančios įmaišos SRA sumažina betono tempimo ir gniuždymo stiprį, o būtent plaušų naudojimas padeda šiuos rodiklius kompensuoti.

Zhan ir He [37] teigia, kad SRA atitolina šviežio betono mišinio hidratacijos reakciją dėl mišinyje atsiradusių organinių molekulių. Susitraukimą mažinančių įmaišų molekulės sumažina betono mišinio poliškumą ir padidina specifinius paviršius, dėl to padidėja vandens kiekis, reikalingas hidratacijos reakcijai. SRA sumažina didžiulias cemento matricos poras, atitolina įtrūkimų susidarymo laikotarpį, ženkliai sumažina susidariusių įtrūkimų plotį ir yra daug efektyvesnė įmaiša nei geopolimerino pagrindo įmaiša.

1.5. Vietinių žaliavų panaudojimas betono susitraukimų mažinimui

Ankstesniuose šio magistrinio baigiamojo darbo skyriuose užsiminama apie betono susitraukimų deformacijas, jų atsiradimo priežastis bei kokią žalą jos potencialiai gali padaryti betoniniams ar gelžbetoniniams gaminiams. Racionalus būdas kompensuoti betono kietėjimo metu susidarančias susitraukimų deformacijas yra naudoti plėtriuosius priedus ir tam tikrą plaušą. Vienas esminių šio magistrinio darbo uždavinių yra ištirti Lietuvoje esančių, vietinių žaliavų, panaudojimo galimybes betono susitraukimų mažinimui, todėl toliau yra pateikiami kitų mokslininkų tyrimų rezultatai panaudojant kalcio oksido (CEA) ir magnio oksido (MEA) plėtriuosius priedus bei pluoštinių kanapių plaušą.

Kalcio oksido (CEA) pagrindu pagamintas plėtrusis priedas yra ganėtinai paprasta ir efektyvi medžiaga, kurią galima naudoti betono kietėjimo metu susidarančių susitraukimų kompensavimui ir ypač ankstyvųjų betono plyšių rizikos mažinimui. Cemento hidratacija yra esminis faktorius, darantis didelę įtaką betono mechaninėms ir ilgaamžiškumo savybėms. Zhao *et al.* [38] atliko tyrimą, kuriame analizavo kalcio oksido plėtriojo priedo poveikį, cemento hidratacijai, esant skirtingoms kietinimo temperatūroms bei į betono mišinį įdėjus superabsorbentinių polimerų. Mokslininkai atliko eilę bandymų, naudodami magnetinio rezonanso tyrimo metodą, tam kad ištirtų cemento hidrataciją ir jos poveikį betonui.

Šiam tyrimui atlikti Zhao *et al.* [38] naudojo 52,5 gniuždymo stiprio klasės cementą ir plėtrųjį kalcio oksido (CEA) priedą su ribotu išsiplėtimo greičiu – 0,18 % (žr. 7 lentelė). Taip pat, šiame tyrime buvo naudojami kovalentinio tinklinio akrilo rūgšties-ko-akrilamido pagrindu pagaminti superabsorbentiniai polimerai (SAP), kurių tankis – 840 kg/m³.

7 lentelė. Cheminė medžiagų sudėtis [38]

Medžiaga	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	LOI
Cementas	19,63	4,35	2,88	64,04	1,29	0,10	0,57	3,23	0,26	3,65
CEA	3,38	4,93	1,20	84,32	1,26	–	–	2,57	–	2,34

Zhao *et al.* [38] eksperimentui įgyvendinti suprojektavo betono mišinio sudėtis su atitinkamai 0,3, 0,35 ir 0,4 v/c santykiais. Plėtrusis kalcio oksido priedas buvo dozuojamas pakeičiant 2 % ir 3 % cemento visos masės, o superabsorbentiniai polimerai buvo dozuojami 0,15 % ir 0,3 % nuo cemento masės. Bandymui atlikti buvo naudojamos trys kietinimo temperatūros – 20°C, 40°C ir 60°C. Mokslininkai atliko devynis skirtingus minėtų medžiagų ir jų kiekių derinius. Tuomet buvo sumaišomas betono mišinys ir užpildomi standartiniai cilindro formos 25 mm diametro ir 200 mm ilgio bandiniai, ir atliekamas magnetinio rezonanso bandymas, naudojant PQ001 LF-NMR analizavimo įrangą.

Zhao *et al.* [38] tyrimų rezultatai parodė jog plėtriojo kalcio oksido panaudojimas betone gali paskatinti cemento hidrataciją ir 2 % kalcio oksido plėtriojo priedo turi geresnį poveikį nei 3 % šio priedo. Išsiaiškinta jog, kuomet yra naudojamas plėtrusis kalcio oksido priedas, didelė kietinimo temperatūra gali efektyviai paskatinti cemento hidratacijos procesą, geriausi rezultatai pasiekti prie 60°C kietinimo temperatūros. Taip pat, mokslininkai pabrėžia, kad superabsorbentinių polimerų panaudojimas gali efektyviai pagreitinti hidrataciją.

Pasak Tian *et al.* [39] betono mišiniui, kuriame naudojamas plėtrusis kalcio oksido priedas, tam, kad įvyktų sklandi cemento hidratacija reikalingas mažesnis vandens kiekis nei betono mišiniams, kuriuose naudojami kitokie plėtrieji priedai ir naudojant šį priedą betono mišinys ankstyvojoje stadijoje gali išsiplėsti apytiksliai 90 % savo tūrio, priklausomai nuo panaudoto priedo kiekio.

Polat *et al.* [40] tyrinėjo cementinių skiedinių savaiminius susitraukimus naudojant plėtrųjį kalcio oksido priedą. Tyrimas parodė jog po 28 parų kietėjimo, cementinių skiedinių savaiminiai susitraukimai sumažėjo 42 %, 47 % ir 80 %, pridėjus atitinkamai 2,5 %, 5,0 % ir 7,5 % CEA.

Zhao *et al.* [41] atliko tyrimą, kuriame analizavo didelio stiprumo betono savaiminius susitraukimus, kuomet betono mišinio sudėtyje naudojami iš anksto vandens prisotintas keramzitas (PWC) bei plėtrusis kalcio oksido priedas (CEA).

Pasak, Wang *et al.* [42] šiais laikais didelio stiprumo betonas vis labiau įsitvirtina betono pramonėje dėl gerų mechaninių ir ilgaamžiškumo savybių, tačiau kadangi vandens ir rišiklio santykis tokiam betone yra mažas, o rišamosios medžiagos kiekis yra didelis, tai lemia didesnius savaiminius susitraukimus.

Šiam tyrimui atlikti Zhao *et al.* [41] naudojo 52,5 gniuždymo stiprio klasės portlandcementį. Plėtrusis kalcio oksido priedas naudotas su ribotu išsiplėtimo greičiu – 0,18 %. Smulkusis užpildas – gamtinis smėlis, kurio smulkumo modulis 2,78, o didžiausias dalelės matmuo – 2,5 mm. Stambusis užpildas – žvirgždas, kurio dalelių dydis nuo 5 iki 25 mm, o tankis 2600 kg/m³. Lengvieji užpildai (LWA) – lakiųjų pelenų keramzitas (žr. 11 pav.), kurio dalelių dydis nuo 5 iki 8 mm, o tankis 1428 kg/m³. Taip pat buvo naudojamas polikarboksilatų pagrindu pagamintas superplastiklis.



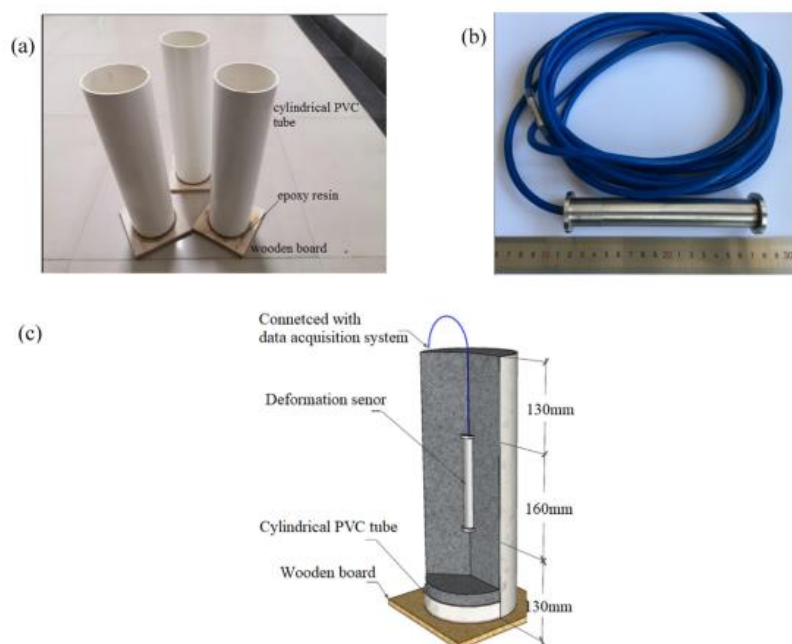
11 pav. Lakiųjų pelenų keramzitas [41]

Mokslininkai suprojektavo septynias betono mišinio sudėtis, kuriose naudojamos minėtos medžiagos su skirtingais jų kiekių deriniais (žr. 8 lentelė). Keramzitas buvo naudojamas vietoj stambaus užpildo atitinkamai pakeičiant pastarąjį 15 % ir 30 %.

8 lentelė. Betono mišinio sudėtys [41]

Medžiagos	WC0.35	PWC15	PWC30	PWC15A3	PWC30A3	PWC15A6	PWC30A6
v/c	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Vanduo	168	168	168	168	168	168	168
Cementas	480	480	480	465,6	465,6	451,2	451,2
CEA	–	–	–	14,4	14,4	28,8	28,8
Smulkus užpildas	613	613	613	613	613	613	613
Stambus užpildas	968,15	968,15	797,3	968,15	797,3	968,15	797,3
Keramzitas	–	92,83	185,66	92,83	185,66	92,83	185,66

Zhao *et al.* [41] savaiminius susitraukimus matavo cilindrinio metodu. Buvo naudojamos cilindrinės polivinilo chlorido formelės, kurių diametras 110 mm, o aukštis 420 mm, sienelės storis 3.2 mm (žr. 12 pav.).



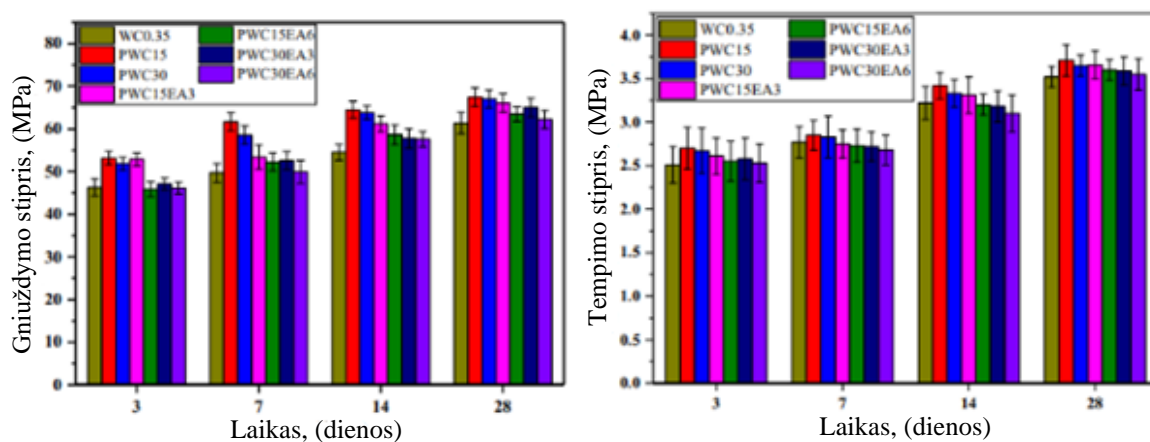
12 pav. Savaiminių susitraukimų matavimas cilindrinio metodu [41]

Bandymo sandarumui užtikrinti, sandūra tarp formelės ir medinės lentos buvo sutepta epoksidine derva. Viduje formelės įmontuotas jutiklis, fiksuojantis deformacijas bei temperatūra. Prieš atliekant bandymą, keramzitas buvo 3 dienas įmerktas į vandenį, tam kad prisotintų vandens ir būtų užtikrintas vidinis kietinimas. Po keramzito mirkymo, vandens perteklius buvo naudojamas kaip maišymo vanduo. Betono maišymo ir liejimo procedūros atliktos pagal amerikietišką standartą ASTM C192/C192M-16. Plėtrusis kalcio oksido priedas, prieš betono mišinio maišymą buvo gerai sumaišytas su portlandcemenčiu. Prieš paklojant, kad būtų sumažinta trintis tarp bandinio ir formelės, vidinės cilindrinės formos sienelės buvo suteptos vazelinu ir ant jo uždėta tefloninė folija. Deformacijų jutiklis buvo pastatytas vertikaliai į formos vidurį, kuomet formelė buvo užpildyta betono mišiniu 130 mm, pastačius jutiklį, forma pilnai užpildyta betono mišiniu. Bandiniai buvo paliekami kietinimui pastovioje $20 \pm 2^\circ\text{C}$ temperatūroje, kur santykinė drėgmė $\geq 95\%$ [41].

Zhao *et al.* [41] atliko gniuždymo ir tempimo stiprio bandymus. Bandinių PWC15 ir PWC30 gniuždymo stipris po 3 kietėjimo dienų buvo atitinkamai 14,82 % ir 12,03 % didesnis nei kontrolinio bandinio, tuo tarpu po 28 dienų gniuždymo stipris buvo atitinkamai 9,91 % ir 9,22 % didesnis už kontrolinio bandinio.

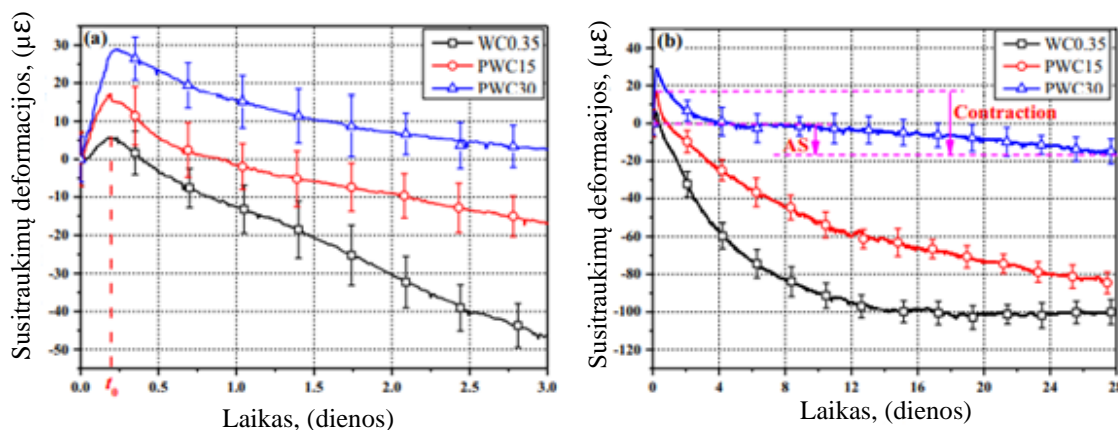
Mokslininkai padarė išvadą jog išankstinis užpildų sudrėkinimas sukelia vidinio kietinimo poveikį, todėl PWC skatina rišiklio hidrataciją, o tai padidina gniuždymo stiprį. Tuo tarpu į betoną, kuriame buvo naudojamas iš anksto sudrėkintas keramzitas (PWC) įdėjus plėtriujų kalcio oksido priedų, gniuždymo stipris – sumažėjo (žr. 13 pav.) [41].

Zhao *et al.* [41] tempimo stiprio bandymo rezultatai panašūs į gniuždymo stiprio, po 28 dienų naudojant PWC tempimo stipris atitinkamai padidėjo 3,69 %–5,40 %, o kombinuojant PWC su CEA tempimo stipris padidėjo 0,85 % – 3,98 % lyginant su kontroliniu bandiniu (žr. 13 pav.).



13 pav. Gniuždymo ir tempimo stiprių bandymų rezultatai [41]

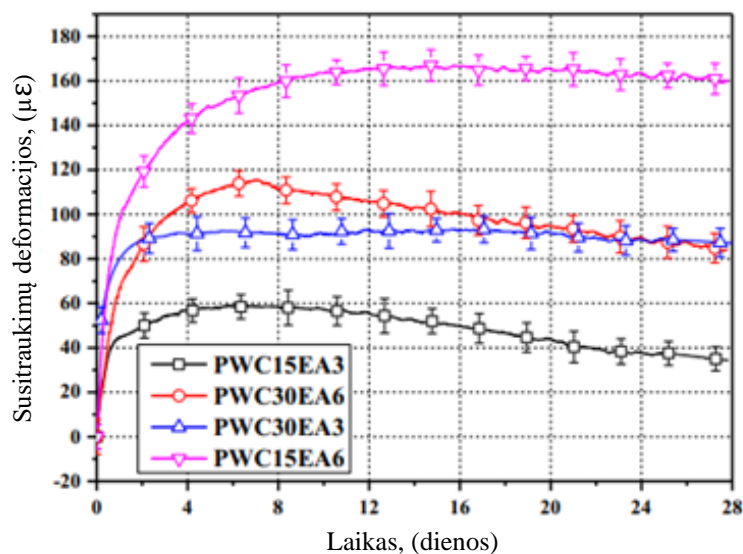
Zhao *et al.* [41] savaiminių susitraukimų bandymo rezultatai, stambųjų užpildą pakeičiant 15 % ir 30 % iš anksto sudrėkinto keramzito pateikti 14 paveikslėlyje.



14 pav. Savaiminių susitraukimų bandymo rezultatai, naudojant tik PWC [41]

Kuomet betono mišinio sudėtyje yra iš anksto sudrėkinto keramzito (PWC). Kontrolinis bandinys per pirmąsias valandas šiek tiek išsipūtė, o vėliau, bėgant laikui, pradėjo trauktis. Kontrolinis bandinys šiek tiek išsipūtė dėl to, nes pirmosiomis valandomis intensyviai formavosi etringito kristalai. Tuo tarpu naudojant PWC, pradinis išsiplėtimas per pirmąsias 3 dienas buvo kiek didesnis, lyginant su kontroliniu bandiniu, tačiau po 28 dienų, naudojant 30 % PWC savaiminių susitraukimų susidarė ganėtinai mažai.

Zhao *et al.* [41] savaiminių susitraukimų bandymo rezultatai, stambųjų užpildą pakeičiant 15 % ir 30 % iš anksto sudrėkinto keramzito ir panaudojant 3 % ir 6 % plėtriojo kalcio oksido priedo pateikti 15 paveikslėlyje.



15 pav. Savaiminių susitraukimų bandymo rezultatai, naudojant PWC ir CEA [41]

Zhao *et al.* [41] teigia jog savaiminiu susitraukimų rezultatai, kuomet betono bandiniai buvo pagaminti su iš anksto sudrėkintu keramzitu bei plėtriuoju kalcio oksido priedu, gauti stebėtinai geresni. Visuose bandiniuose gautas teigiamas rezultatas, tačiau mokslininkai pastebi įdomų reiškinį, kuomet CEA betone buvo 3 % , didesnis PWC kiekis betone, padidino betono plėtrumą. Taigi, po 4,2 dienos PWC30EA3 išsiplėtimas gautas 57,8 % didesnis nei PWC15EA3. Taigi, PWC ir CEA panaudojimas betono mišinyje reikšmingai sumažino betono savaiminius susitraukimus.

Pasak, Zhao *et al.* [43] didelio stiprumo betonui privalu užtikrinti nuolatinę priežiūra kietėjimo metu, kadangi toks betonas ankstyvojoje stadijoje yra ypač jautrus plyšių susidarymui, o tai turi milžinišką įtaką betono ilgaamžiškumui.

Pasak, Zhao *et al.* [44] kalcio ir magnio oksido plėtrieji priedai, dėl savo savybės jungiantis su vandeniu, bei susidarant hidroksidams, plėstis yra puiki prevencinė priemonė prieš betono susitraukimų deformacijas, tačiau šie priedai dažniausiai yra vartojami atskirai.

Mo *et al.* [45], teigia, kad CEA priedas greitai hidratuojasi, todėl jis ankstyvojoje stadijoje plečiasi labai intensyviai. Svarbu suprasti tai, kad šis priedas turi būti dozuojamas preciziškai tiksliai, kadangi per didelis jo kiekis gali privesti prie labai staigaus plėtimosi, kurio dėka susidarys dideli gniuždymo įtempiai ir kietėdamas betonas gali sutrūkinėti, supleišėti. Tuo tarpu MEA priedas pasižymi gana lėta hidratacija ir lėtu plėtimusi, kuris puikiai padeda kompensuoti savaiminius susitraukimus ilgesniame betoninio gaminio kietėjimo etape.

Zhao *et al.* [44] palygino cementinių mišinių, kuriuose panaudotas skirtingo aktyvumo MEA priedas, porų struktūrą. Mokslininkai nustatė, kad mažo aktyvumo plėtrusis magnio oksido priedas gali optimizuoti cementinio mišinio porų struktūrą ir ženkliai sumažinti poringumą ir kapiliarų tūrį.

Çomak *et al.* [46] atliko tyrimą, kuriame tyrė kanapių plaušo įtaką cementinio skiedinio mechaninėms savybėms. Mokslininkai kanapių plaušą dozavo 1 %, 2 % ir 3 %, nuo viso mišinio tūrio, o plaušelių ilgiai atitinkamai naudoti 6, 12 ir 18 mm (žr. 16 pav.).



16 pav. Kanapių plaušas [46]

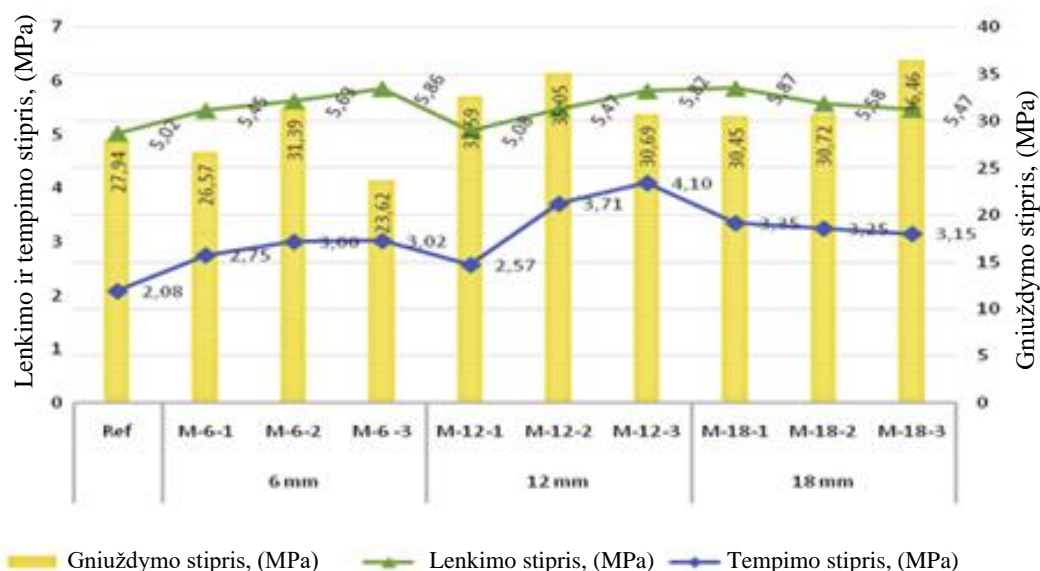
Mokslininkai, tyrime naudojo tokias medžiagas: CEM I 42,5 R tipo portlandcementis, silicio smėlis, vandentiekio vanduo, polikarboksilatų pagrindu pagamintas superplastiklis bei jau minėtas kanapių plaušas. Kanapių plaušo cheminė sudėtis: 78 % celiuliozės, 9 % lignino ir 9 % pektino. Skiedinys buvo maišomas pagal TS EN 196-1 standarto reikalavimus. Viso buvo suprojektuota 10 cementinių skiedinių sudėčių su skirtingais plaušų deriniais (žr. 9 lentelė) [46].

9 lentelė. Cementinių skiedinių sudėtys [46]

Sudėties žymuo	Cementas, g	Vanduo, ml	v/c	Plastiklis, g	Fibrų kiekis, %	Fibrų ilgis, mm	Fibrų kiekis, g	Smėlis, g
Kontrolinė	450	225	0,5	6	0	0	0	1350,0
M-6-1	450	225	0,5	6	1	6	8,1	1341,9
M-6-2	450	225	0,5	6	2	6	16,2	1333,8
M-6-3	450	225	0,5	6	3	6	24,3	1325,7
M-12-1	450	225	0,5	6	1	12	8,1	1341,9
M-12-2	450	225	0,5	6	2	12	16,2	1333,8
M-12-3	450	225	0,5	6	3	12	24,3	1325,7
M-18-1	450	225	0,5	6	1	18	8,1	1341,9
M-18-2	450	225	0,5	6	2	18	16,2	1333,8
M-18-3	450	225	0,5	6	3	18	24,3	1325,7

Atlikus šviežio betono mišinio tankio bandymą, pagal TS EN 12390-7, gautas skiedinio tankis vyrauja 2065–2156 kg/m³, padaryta prielaida, kad kanapių plaušo ilgis ar kiekis didelės įtakos skiedinio tankiui nepadarė.

Çomak *et al.* [46] atlikę gniuždymo ir lenkimo stiprio bandymus pagal TS EN 196-1, o tempimo stiprio, pagal TS EN 12390-6, nustatė jog 2 % kanapių plaušo panaudojimo turėjo geriausia efektą cementinių skiedinių gniuždymo stipriui. Tuo tarpu tempimo ir lenkimo stiprio rezultatai gauti panašūs (žr. 17 pav.).



17 pav. Sukietėjusio cementinio skiedinio bandymų rezultatai [46]

Çomak *et al.* [46] tyrimų rezultatai parodė jog cementiniame skiedinyje racionaliausia panaudoti 2–3%, 12 mm ilgio kanapių plaušo, kadangi taikant šį derinį, tyrimų rezultatai gauti – optimaliausi.

Kanapių plaušo įtaką betono gniuždymo ir lenkimo stiprumui ištyrė Zhijian *et al.* [47]. Mokslininkai padarė išvadą jog naudojant stambiagrūdžius užpildus (16 mm), 20 mm ilgio kanapės plaušelius ir dozuojant 0,36 % plaušo nuo visos mišinio masės, gniuždymo stipris padidėja apie 4 %, lenkimo – 9 %. Tuo tarpu naudojant smulkiagrūdžius užpildus (8 mm), 10 mm ilgio kanapės plaušelius ir dozuojant 0,60 % nuo visos mišinio masės, pastebėtas gniuždymo ir lenkimo stiprio sumažėjimas.

Pasak Zhijian *et al.* [47] plaušo kiekis yra esminis faktorius, įtakojantis gniuždymo ir lenkimo stiprių rezultatus. Mokslininkai padarė prielaidą jog norint pagerinti betono gniuždymo ir lenkimo stiprių rezultatus nederėtų dėti daugiau nei 0,30 % kanapių plaušo nuo viso mišinio masės.

2. Teorinė dalis

2.1. Tyrimuose naudoti standartai

Šis magistro tiriamasis darbas parengtas remiantis toliau nurodytais techniniais dokumentais bei standartais:

- LST EN 206:2013+A2:2021. Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis.
- LST EN 12620:2003+A1:2008. Betono užpildai.
- LST EN 932-1:2001. Užpildų pagrindinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Ėminio ėmimo metodai.
- LST EN 197-1:2011. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai.
- LST 1008:2003. Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant grąžinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti.
- LST EN 933-1:2012. Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas.
- LST EN 1097-5:2008. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 5 dalis. Vandens kiekio nustatymas džiovinant ventiliuojamoje krosnyje
- LST EN 1390-1:2021. Sukietėjusio betono bandymai. 1 dalis. Pavidalas, matmenys ir kiti bandinių bei liejimo formų reikalavimai
- LST EN 12390-2:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 2 dalis. Bandinių pagaminimas ir kietinimas stipriui nustatyti.
- LST EN 12350-2:2019. Betono mišinio bandymai. 2 dalis. Slankumo bandymas.
- LST EN 12350-7:2019. Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai.
- LST EN 12350-6:2019. Betono mišinio bandymai. 6 dalis. Tankis.
- LST EN 12390-16:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 16 dalis. Betono susitraukimo nustatymas.
- LST EN 12390-3:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris.
- LST EN 12390-5:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris.
- LST 1428-17:2016. Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu.
- МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. GOST 12730.4-78. БЕТОНЫ. Методы определения показателей пористости.

2.2. Tyrimuose naudotos medžiagos

Šiame skyriuje aprašomi magistro baigiamojo darbo eksperimentiniuose tyrimuose naudoti betono mišinio komponentai. Pasirenkant betono mišinio gamybai skirtas medžiagas, atsižvelgta į LST EN 206:2013+A2:2021[48] standarte pateiktus reikalavimus ir rekomendacijas.

Užpildai

Užpildų kokybė – vienas esminių faktorių lemiančių kokybiško betono mišinio gamybą. Projektuojant betono mišinio sudėtį svarbu parinkti tinkamą užpildų rūšį ir frakciją, kadangi užpildai sudaro apie 85 % visos betono mišinio masės.

Nusprendus projektuoti stambiagrūdį betono mišinį, pasirinkta tyrimuose naudoti Lietuvos rinkoje populiariausią stambų užpildą – žvirgždą, kurio frakcija 4/16 mm (žr. 18 pav.). Šios frakcijos stambieji betono užpildai yra dažniausiai naudojami prekinio betono gamintojų dėl palankios kainos ir pakankamai gero užpildų stiprumo. Taip pat, žvirgždo 4/16 mm frakcija nėra ypatingai stambi, o tai suteikia betono mišiniui galimybę nevaržomai tekėti klojiniuose, tarp tankiai armuoto armatūros karkaso.



18 pav. Žvirgždas fr. 4/16 mm

Smulkusis užpildas pasirinktas išsijotas, švarus smėlis, kurio frakcija 0/4 mm, o užterštumas neviršija 3 % (žr. 19 pav.). Šios frakcijos smėlis, puikiai dera su pasirinktu stambiuoju užpildu, jo dėka yra pagerinamas cemento dalelių pasiskirstymas bei užpildoma erdvė betono struktūroje, todėl yra pasiekiamas didesnis betono mišinio tankis.



19 pav. Smėlis fr. 0/4 mm

Eksperimentiniai tyrimų patikimumo užtikrinimui, nuspręsta laboratorinius bandymus atlikti, naudojant vietinių betono gamintojų patikrintus, sertifikuotus ir eilę metų naudojamus užpildus. Vilniuje įsikūrusi prekinio betono gamybos įmonė UAB „Palmusta“ mokslo vardan suteikė galimybę pasinaudoti įmonės naudojamais sertifikuotais, LST EN 12620:2003+A1:2008 [49] standarto reikalavimus tenkinančiais užpildais [52], kuriuos gauna iš Trakuose įsikūrusio mineralinių medžiagų karjero.

Rišamoji medžiaga

Cementas – hidraulinė rišamoji medžiaga, kurią sumaišius su vandeniu ji rišasi ir kietėja, o sukietėjusi nepraranda stiprumo bei tūrio pastovumo ore ir vandenyje [7].

Eksperimentiniuose tyrimuose, nuspręsta naudoti gryniausią cemento tipą, t. y. portlandcementį CEM I. Šio tipo cementas yra vienas iš dažniausiai Lietuvos betono mišinių gamintojų naudojamų cementų, kadangi pasižymi dideliu klinkerio kiekiu 95–100% ir vos 0–5% kalcio sulfato priedų, skirtų rišimosi trukmei reguliuoti.



20 pav. Portlandcementis CEM I

Įvertinus jog projektuojamas C25/30 gniuždymo stiprio klasės betono mišinys, nuspręsta naudoti vidurinės gniuždymo stiprio klasės cementą – 42,5.

Tyrimuose pasirinkta naudoti Švedišką „ROCKET CEMENT M-600“ įprastinį cementą – CEM I 42,5 R portlandcementį, atitinkantį LST EN 197-1:2011 [52] standarto keliamus reikalavimus (žr. 20 pav.). Šis cementas pasižymi dideliu atsparumu šalčiui, o jo rišimosi pradžia ≥ 60 min. Svarbu paminėti jog žymėjimas „R“ nurodo, kad šis cementas yra didelio ankstyvojo stiprio ir po dviejų parų kietėjimo pasiekia daugiau nei 20 MPa gniuždymo stiprį.

10 lentelė. „ROCKET CEMENT M-600“ cemento cheminė ir mineraloginė sudėtis [53]

Kompozicija	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	63,2	20,4	4,0	3,6	2,4	0,9	0,2	70,18	5,63	4,51	10,96

Vanduo

Vanduo yra būtinas komponentas betono mišinio gamyboje, kadangi tai yra jungiamoji skystoji fazė, kuri reaguoja su cemento mineralais bei sudaro vientisą komponentą – cementinį akmenį [7].

Betono gamybai naudojamo vandens standarte LST 1008:2003 [54], nurodytas vandens techninių reikalavimų sąrašas: vandenyje ištirpusių druskų ir jonų gali būti ne daugiau kaip 2000 mg/l, chloridų kiekis negali būti didesnis kaip 500 mg/l, vandens pH turi būti ne mažesnis kaip 4 ir ne didesnis kaip 12.5, vandenyje neturi būti dažančių priemaišų ir pan.

Betono mišinio paruošimui nuspėta naudoti, švarų geriamąjį vandentiekio vandenį, esantį universiteto laboratorijoje.

Superplastiklis

Superplastiklis yra skysto pavidalo įmaiša, kurios įdėjus į betono mišinį, nekeičiant konsistencijos, galima gerokai sumažinti vandens kiekį, todėl sumažėja V/C santykis bei padidėja betono gniuždymo stipris. Taip pat, galimas ir atvirkščias sprendimas, nekeičiant vandens kiekio, su superplastikliu galima nesunkiai padidinti betono slankumą. Šiais laikais įvairių gamintojų superplastiklius naudoja praktiškai visi prekinio betono gamintojai, tai cheminė įmaiša, be kurios apsieiti tampa vis sunkiau ir sunkiau, ypač gaminant savaimę susitankinančius mišinius arba didelio stiprumo betono mišinius.

Ekspirimentiniuose tyrimuose pasirinkta naudoti Šveicarų gamintojo „SIKA“ superplastiklį „Viscocrete D-187“ (žr. 21 pav.). Šis superplastiklis pasirinktas, kadangi turi kelis veikimo mechanizmus, tokius kaip polimero grandinės absorbcija prie cemento dalelės ir didelių polimero molekulių sferinių kliūčių susidarymas tarp cemento dalelių. Šio priedo pagalba galima pasiekti efektyvią vandens redukciją, todėl susidaro didelio tankio, stiprio ir sumažinto pralaidumo vandeniui betonas [55].



21 pav. Superplastiklis

11 lentelė. „Sika Viscocrete D-187“ techninė specifikacija [55]

Pagrindinis cheminis komponentas	Modifikuotų polikarboksilatų vandenilinis tirpalas
Išvaizda / Spalva	Rusvas skystis
Tankis	1,06 ± 0,02 kg/l
pH-Vertė	4,4 ± 1
Dozavimas	0,3–1,0 % nuo cemento masės

Susitraukimą mažinanti įmaiša

Susitraukimą mažinanti įmaiša yra skysto pavidalo cheminė įmaiša, sumažinanti betono porose esančio vandens paviršiaus įtempius, todėl mažėja susidarę kapiliariniai įtempiai ir sumažėja betono susitraukimai, t. y. betono kietėjimo metu, laisvam vandeniui sunkiau pasišalinti iš betono.

Lietuvoje, susitraukimą mažinančias įmaišas naudojančių betono mišinių gamintojų spektras plečiasi. Betono mišinių gamintojai šią įmaišą dažnai naudoja gaminant savaimė susitankinančius betono mišinius, plonasluoksnes konstrukcijas bei besiūlių grindų betoną.



22 pav. Susitraukimą mažinanti įmaiša

Ekperimentiniuose tyrimuose pasirinkta naudoti Šveicarų gamintojo „SIKA“ susitraukimą mažinančią įmaišą „SikaControl -50“ (žr. 22 pav.). Ši susitraukimą mažinanti įmaiša pasirinkta, kadangi yra viena iš plačiausiai Lietuvoje naudojamų susitraukimus mažinančių įmaišų [56].

12 lentelė. „SikaControl -50“ techninė specifikacija [56]

Išvaizda / Spalva	Bespalvis skystis
Tankis	0,935 ± 0,02 kg/l
Suminis chlorido jonų kiekis	≤ 0,1 %
Ekvivalentinio natrio oksido kiekis	≤ 0,5 %
Dozavimas	0,2–2,0 % nuo cemento masės

Negesintos kalkės

Negesintos kalkės – smulkūs kalcio oksido milteliai, išgauti aukštoje temperatūroje (1000–1200°C) išdegant karbonatines uolienas (kreida, klintis, dolomitas), kuriose gausu kalcio karbonato (CaCO₃), vėliau išdegtas kalcio oksidas yra trupinamas, malamas ir sijojamas.

Betono mišinį praturtinus negesintomis kalkėmis, šios, turėdamos didelį kiekį kalcio oksido, reaguodamos su vandeniu, veikia kaip plėtrusis priedas, galintis kompensuoti betono susitraukimų deformacijas.

Ekperimentiniuose tyrimuose pasirinkta naudoti vietinėje rinkoje lengvai prieinamas Lenkų gamintojo „Tradical Q 90“ negesintas kalkes (žr. 23 pav.). Šių kalkių tipas – „CL 90“, tai kalcitinės kalkės, kurių cheminėje sudėtyje yra didelis kiekis kalcio oksido (≥90 %). Žymėjimas „Q“ reiškia jog kalkės yra negesintos. Šios kalkės pagal reaktyvumą priskirtos – „R5“ klasei, t. y. greitai besigesinančios kalkės, jų gesinimosi trukmė – iki 10 min.

13 lentelė. „Tradical Q 90“ kalkių cheminė sudėtis [57]

Kompozicija	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CO ₂
%	95,91	0,52	0,06	0,05	0,29	1,04



23 pav. Negesintos kalkės

Polipropileno plaušas

Polipropileno pluoštas – betono įmaiša, sudaryta iš daugybės nedidelių polimerinių plaušelių. Ši įmaiša ilgajame laikotarpyje turi teigiamą poveikį visai betono struktūrai. Tinkamai paskirsčius plaušelius po visą betono struktūrą yra ženkliai pagerinamos betono mechaninės savybės, taip pat sumažinamos susitraukimų deformacijos.

Eksperimentiniuose tyrimuose pasirinkta naudoti Lietuvos rinkai pažįstamą, įmonės UAB „Statybiniai polimerai“ prekiaujamą, betono armavimui skirtą, aukštos kokybės polipropileno makroplaušą – „CONNECTO FIBER 38“ (žr. 24 pav.). Naudojant šį plaušą galima pagerinti betono atsparumą smūgiams, nuovargiui ir trinčiai, betonas tampa ne toks laidus skysčiams, sumažinama mišinio išsisluoksniavimo tikimybė, betono plastinio pleišėjimo ir paviršinio betono sluoksnio suskaldėjimo/trupėjimo rizika.



24 pav. Polipropileno plaušas

14 lentelė. Plaušo „CONNECTO FIBER 38“ techninė specifikacija [58]

Medžiaga	Poliiolefinas
Forma	Sukti viengijai plaušai
Paviršius	Nepertraukiamai reljefiškas
Spalva	Pilka
Tankis	0,91 g/cm ³
Ilgis	38 mm
Ekvivalentinis skersmuo	0,70 mm
Ilgio ir skersmens santykis	54
Tempimo stipris	500 MPa
Dozavimas	2–12 kg/m ³

Pluoštinių kanapių plaušas

Šio magistro baigiamojo darbo eksperimentiniuose tyrimuose nuspręsta naudoti Lietuvos rinkoje gerai pažystamą medžiagą – pluoštinių kanapių pluoštą. Pluoštinių kanapių pluoštas yra pats stipriausias iš visų natūralių pluoštų bei pasižymi atsparumu vandens poveikiui. Dėl šių priežasčių nuspręsta pabandyti kanapių plaušelius įmaišyti į betono mišinį ir išsiaiškinti, kokią įtaką šis plaušas turi šviežio betono mišinio ir sukietėjusio betono savybėms, o tarp jų ir betono susitraukimams.

Kauno mieste įsikūrusi, pluoštinių kanapių pluošto auginimo – perdirbimo srityje veiklą vykdanči įmonė UAB „Kanapės Žiedas“ mokslo vardan suteikė galimybę pasinaudoti jų kanapių pluoštu. Gautas pluoštas sudarytas iš ilgų viengijų plaušų primenančių šieną, todėl jis buvo smulkinamas rankiniu būdu iki 30–60 mm ilgio plaušelių, kad betono mišinio maišymo metu gerai pasiskirstytų po visą mišinį (žr. 25 pav.).



25 pav. Pluoštinių kanapių plaušas

15 lentelė. Pluoštinių kanapių plaušo techninė specifikacija [59]

Medžiaga	Pluoštinė kanapė
Forma	Viengijai plaušai
Paviršius	Nepertraukiamai reljefiškas
Spalva	Gelsva
Tankis	0,86 g/cm ³
Ilgis	30–60 mm
Ekvivalentinis skersmuo	0,60 mm
Ilgio ir skersmens santykis	50–100
Dozavimas	1–5 kg/m ³

2.3. Betono mišinio sudėties skaičiavimas

Šiame skyriuje pateikiama betono mišinio sudėties skaičiavimo eiga. Projektuojant betono mišinio sudėtį atsižvelgta į LST EN 206:2013+A2:2021 [48] standarte pateiktus reikalavimus. Betono mišinio sudėties skaičiavimai atlikti, remiantis LST 1974:2012 [60] standarte pateikta skaičiavimo metodika.

Betono mišinio sudėties reikalavimai:

- Gniuždymo stiprio klasė – C25/30;
- Konsistencijos (slankumo) klasė – S4;
- Aplinkos poveikių klasė – XC4;
- Oro kiekis – 2,0 %;
- Cemento kiekis – ne mažiau 290 kg/m³;
- V/C santykis – ne didesnis nei 0,60;
- Granulometrijos ribos – 16 mm.

Vandens ir cemento santykio parinkimas

Pagal (1.1) formulę apskaičiuojamas reikiamas vandens ir cemento V/C santykis, kai projektinis $V/C \geq 0,4$:

$$V/C = \frac{A \cdot k_0 \cdot f_c}{f_b + 0,5 \cdot A \cdot k_0 \cdot f_c} = 0,5304; \quad (1.1)$$

čia, A – koeficientas, įvertinantis naudojamų medžiagų (užpildų ir cemento) kokybę: žemos kokybės – 0,55, vidutinės kokybės – 0,60, aukštos kokybės – 0,65. Kadangi naudojamos aukštos kokybės medžiagos, koeficientas atitinkamai lygus 0,65;

f_c – cemento CEM I 42,5 R, stipris gniuždant, atitinkamai lygus 42,5;

k_0 – koeficientas priklausantis nuo oro kiekio betono mišinyje, apskaičiuojamas pagal (1.2) formulę:

$$k_0 = 1 - \frac{\varphi_{ok} \cdot 5}{100} = 0,90; \quad (1.2)$$

φ_{ok} – oro kiekis betone, atitinkamai lygus 2 %;

f_b – betono stipris gniuždant, apskaičiuojamas pagal (1.3) formulę:

$$f_b = f_{bk} + \lambda \cdot S_n = 34,44 \text{ MPa}; \quad (1.3)$$

f_{bk} – reikiamas betono kubinis stipris gniuždant. Kadangi projektuojamas C25/30 klasės betonas, priimamas 30 MPa;

λ – koeficientas, priklausantis nuo imčių skaičiaus n , pvz.: kai $n = 6$, tai $\lambda = 1,87$, kai $n = 15$, tai $\lambda = 1,48$. Priimama jog kai $n = 15$, taigi, koeficientas atitinkamai lygus 1,48;

S_n – betono stiprio gniuždant standartinis nuokrypis, atitinkamai lygus 3.

Vandens kiekio parinkimas

Pagal (1.4) formulę apskaičiuojamas reikiamas vandens V_{pl} kiekis, įvertinus smėlio smulkumą bei superplastiklio efektyvumą:

$$V_{pl} = V - \left(\frac{Sm_{Dmax}-2}{0,5} \right) \cdot 4 - \left(\frac{V \cdot PL}{100} \right) = 169,3 \approx 169 \text{ l}; \quad (1.4)$$

čia, V – vandens kiekis betono mišinyje priklauso nuo stambiojo užpildo rūšies (žvirgždas), stambumo (16 mm) ir šviežio betono mišinio slankumo (klasė – S4, ribos 160–200 mm) bei yra parenkamas iš LST 1974 [60] standarte pateiktos nomogramos. Vandens kiekis atitinkamai, priimamas 218 litrų.

Sm_{Dmax} – didžiausia smulkaus užpildo (smėlio) dalelė, lygi 4 mm;

PL – pasirinkto superplastiklio efektyvumas, lygus 15 %.

Cemento kiekio parinkimas

Pagal (1.5) formulę apskaičiuojamas reikiamas cemento C kiekis, įvertinus anksčiau apskaičiuotą vandens ir cemento V/C santykį ir vandens V_{pl} kiekį:

$$C = \frac{V_{pl}}{V/C} = 319,17 \approx 319 \text{ kg/m}^3; \quad (1.5)$$

Stambiojo užpildo kiekio parinkimas

Pagal (1.6) formulę apskaičiuojamas reikiamas stambiojo užpildo S_t kiekis:

$$S_t = \frac{1000}{\frac{T_{st} \cdot \alpha}{\rho_{stp}} + \frac{1}{\rho_{std}}} = 1005,7 \approx 1006 \text{ kg/m}^3; \quad (1.6)$$

čia, T_{st} – stambaus užpildo tuštymėtumas, vieneto dalimis, apskaičiuojamas, pagal (1.7) formulę:

$$T_{st} = \frac{\rho_{std} - \rho_{stp}}{\rho_{std}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\rho_{stp}}{\rho_{std}} \right) \cdot 100 = 0,377358; \quad (1.7)$$

ρ_{std} – stambaus užpildo (žvirgždo) dalelių tankis, atitinkamai lygus 2650 kg/m³;

ρ_{stp} – stambaus užpildo (žvirgždo) piltinis tankis, atitinkamai lygus 1650 kg/m³;

α – stambaus užpildo dalelių praskyrimo koeficientas, parenkamas interpoliavimo būdu iš LST 1974 [60] standarte nurodytos lentelės, atsižvelgus į cemento kiekį bei vandens ir cemento santykį:

- Apskaičiuotas cemento kiekis yra 319,17 kg/m³, todėl pasirenkamas cemento kiekio intervalas: 300 – 350 kg/m³;
- Apskaičiuotas vandens ir cemento santykis yra 0,53, todėl pasirenkamas vandens ir cemento kiekio intervalas: 0,5 – 0,6.

Pagal (1.8) formulę apskaičiuojama reikšmė, kai $C=300 \text{ kg/m}^3$, o $V/C=0,5-0,6$:

$$a_1 = \frac{(1,36-1,3) \cdot (0,5304-0,5)}{0,1} + 1,3 = 1,318265; \quad (1.8)$$

Pagal (1.9) formulę apskaičiuojama reikšmė, kai $C=350 \text{ kg/m}^3$, o $V/C=0,5-0,6$:

$$a_2 = \frac{(1,44-1,38) \cdot (0,5304-0,5)}{0,1} + 1,3 = 1,398265; \quad (1.9)$$

Pagal (1.10) formulę apskaičiuojamas stambaus užpildo dalelių praskyrimo α koeficientas:

$$\alpha = \frac{(a_2-a_1) \cdot (C-300)}{(350-300)+a_1} + 1,3 = 1,348934; \quad (1.10)$$

Smulkiojo užpildo kiekio parinkimas

Pagal (1.11) formulę apskaičiuojamas reikiamas smulkiojo užpildo S_m kiekis:

$$S_m = \left(1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{S_t}{\rho_{std}} + V_{pl} \right) \right) \cdot \rho_{sm} = 869,85 \approx 870 \text{ kg/m}^3; \quad (1.11)$$

čia, ρ_c – cemento dalelių tankis, atitinkamai lygus 3100 kg/m^3 ;

ρ_{sm} – smulkaus užpildo (smėlio) dalelių tankis, atitinkamai lygus 2650 kg/m^3 ;

Nominalus betono mišinio tankis

Nominalus betono mišinio tankis apskaičiuojamas sudėjus stambaus ir smulkaus užpildų, cemento ir vandens kiekius, pagal (1.12) formulę:

$$q_{bet.miš.} = S_t + S_m + C + V_{pl} + SP_{0,5} = 2365,62 \approx 2366 \text{ kg/m}^3; \quad (1.12)$$

16 lentelė. Medžiagų kiekiai 1 m^3 betono mišinio

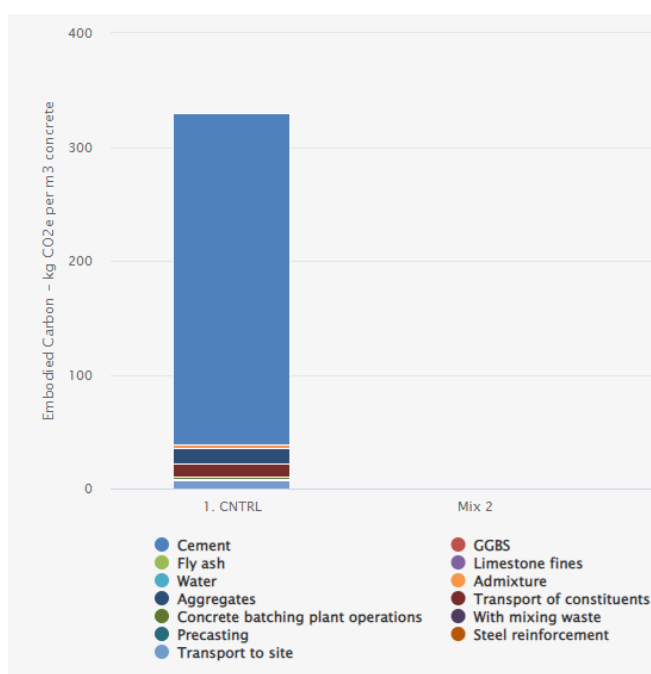
Medžiagos	Žymėjimas ir matavimo vienetai	Kiekis 1 m^3 betono mišinio
Stambiojo užpildo (žvirgždo) kiekis	$S_t, \text{ kg}$	1006
Smulkiojo užpildo (smėlio) kiekis	$S_m, \text{ kg}$	870
Cemento kiekis	$C, \text{ kg}$	319
Vandens kiekis	$V_{pl}, \text{ l}$	169
Superplastiklio kiekis	$SP_{0,5}, \text{ l}$	1,6
Betono mišinio tankis	kg/m^3	2366

2.4. Betono CO₂ pėdsako skaiėiavimas

Šiame skyriuje pateikiama betono mišinio gamybos metu susidaranėios CO₂ emisijos pėdsako skaiėiavimo eiga. CO₂ pėdsako skaiėiavimas atliktas remiantis internetinėje svetainėje [73] pateikta skaiėiuokle. Betono CO₂ emisijos pėdsako skaiėiuoklė įvertina: cemento tipą ir kiekį, cemento pakaitalus, vandens ir cemento santykį, įvairias chemines įmaišas, užpildų rūšį ir kiekį, armavimą fibromis ir medžiagos tipą. Taip pat įvertinama mišinio gamybos vieta: statybvietyje ar gamykloje ir koku atstumu betonas bus transportuojamas.

Betonas, tai medžiaga be kurios iki šiol neapsieina nei vienas statybos projektas, tačiau betono komponentų (cemento, užpildų, cheminių priedų) gamybos metu yra labai intensyviai teršiama mūsų planeta, kadangi išsiskiria didžiulis kiekis CO₂ emisijos. Šio teorinio skaiėiavimo esmė, įvertinti kontrolinės (1) betono mišinio sudėties CO₂ emisijos pėdsaką.

Skaiėiavimai parodė, kad pagaminus 1 m³ suprojektuoto betono mišinio (1) į atmosfera patektų 330 kg CO₂e/m³, o pagaminus 1 kg tokio betono – 0,139 kg CO₂e/kg (žr. 26 pav.).



26 pav. CO₂ emisijos pėdsako pasiskirstymas 1 m³ betono [73]

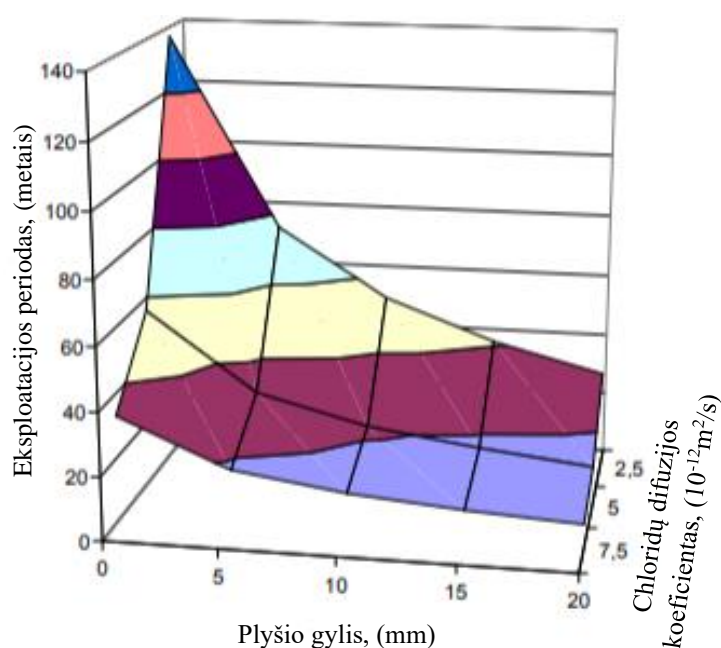
Toliau pateikiami išsamūs betono CO₂ emisijos pėdsako skaiėiavimų rezultatai (žr. 17 lentelė).

17 lentelė. CO₂ emisijos pėdsakas 1 m³ betono [73]

Medžiagos, transportas ir įrenginiai	1. CNTRL			
	Betono mišinio sudėtis		Betono CO ₂ emisijos pėdsakas	
	kg/m ³	%	kg CO ₂ e/m ³	%
Cementas	319	13,5	290,9	88,2
Užpildai	1876	79,3	14,0	4,2
Įmaišos	1,6	0,1	3,0	0,9
Vanduo	169	7,1	0,1	>0,1
Medžiagų transportavimas			11,8	3,6
Gamybos įrenginiai			3,3	1,0
Transportavimas (30 km)			6,8	2,1

Analizuojant CO₂ emisijos pėdsako duomenis, pastebėta jog didžiausią dalį CO₂ emisijos sudaro cementas. Cementas, sudarydamas vos 13,5 % viso betono tūrio į atmosferą išmeta net 88,2 % viso betono CO₂ emisijos kiekio. Tuo tarpu užpildai, sudarydami 79,3 % viso betono tūrio, į atmosferą išmeta vos 4,2 % betono CO₂ emisijos kiekio. Daroma prielaida jog vienas iš būdų sumažinti betono CO₂ emisiją yra cemento kiekio sumažinimas, jį pakeičiant neorganinėmis įmaišomis (lakiaisiais pelenais).

Marsavina *et al.* [74] atliko tyrimą, kuriame analizavo chloridų poveikį betono armatūrai jūrinėje aplinkoje. Mokslininkai nustatė jog betone susidarius plyšiu į betono struktūrą patenka chloridai, kurie sąveikauja su armatūra ir sukelia koroziją, todėl sumažėja betono eksploatacijos periodas. Mokslininkai, baigtinių elementų metodu, nustatė jog didėjant plyšio gyliui, didesnė chloridų koncentracija prasiskverbia į betoną, todėl sparčiau sumažėja betono eksploatacijos periodas (žr. 27 pav.).



27 pav. Ryšys tarp betono eksploatacijos periodo, chloridų difuzijos koeficiento ir plyšio gylio

Susitraukimą mažinančių įmaišų panaudojimas potencialiai galėtų sumažinti betono CO₂ emisiją. Panaudojus SRA, sumažėtų plyšių susidarymo tikimybė, todėl į betono struktūrą nepatektų kenksmingos, neigiamą poveikį sukeliančios medžiagos (chloridai). Taigi, plyšių prevencija padėtų išsaugoti betono eksploatacijos periodą, nes būtų išvengiama betono remonto darbų, kurių metu yra naudojamos naujos žaliavos, o šių žaliavų gamybos metu susidaro nauji kiekiai CO₂ emisijos.

2.5. Tyrimų metodai

Šiame skyriuje pateikiami magistro baigiamajame projekte panaudoti standartizuoti tyrimų metodai ir jų eiga.

2.5.1. Granulimetrinės sudėties nustatymas

Norint įvertinti užpildų kokybę, nuspręsta patikrinti stambiojo ir smulkiojo užpildų granulimetrines sudėtis. Užpildų granulimetrinės sudėties nustatomos sijojimo metodu, pagal LST EN 933-1:2012 [61] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra patikrinti užpildų atskirų frakcijų dalelių kiekius.

Užpildai granulimetrinės sudėties nustatymo bandymams atrinkti iš UAB „Palmusta“ žaliavų sandėliavimo vietose nurodytų krūvų, pagal LST EN 932-1:2001 [50] standarte pateiktą ėminių paėmimo metodiką.

Kadangi užpildų granulimetrinei sudėčiai nustatyti reikalingi sausi ėminiai, pagal LST EN 1097-5:2008 [62] standarte pateiktą metodiką, nustatomas užpildų drėgnis. Turint drėgno ir sauso bandinio mases, pagal (2.1) formulę apskaičiuojami užpildų drėgniai w , %:

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot 100; \quad (2.1)$$

čia M_1 – drėgno mėginio masė, g;

M_2 – sauso (išdžiovinto) mėginio masė, g.

Išsijojus medžiagą sudedamos visos ant sietų gautos liekanos ir pagal (2.2) formulę apskaičiuojami sijojimo nuostoliai M_n , %:

$$M_n = 100 - \left(\frac{100 \cdot M}{M_2} \right); \quad (2.2)$$

čia, M – ant visų sietų likusių liekanų masų suma (mėg. masė po sijojimo), $M = \sum m_i$, g;

M_2 – sauso (išdžiovinto) mėginio masė (mėg. masė prieš sijojimą), g.

Stambiojo ir smulkiojo užpildų užterštumas f , % (dalelės $< 0,125$ mm) apskaičiuojamas pagal (2.3) formulę:

$$f = 100 - \left(\frac{100 \cdot \sum m_i}{M} \right); \quad (2.3)$$

čia, $m_{<0,125}$ – ant apatinio sieto likusios liekanos masė, g;

M – ant visų sietų likusių liekanų masų suma (mėg. masė po sijojimo), g.

Užfiksavus ant kiekvieno sieto likusių dalelių mases, pagal (2.4) formulę yra apskaičiuojama kiek medžiagos prabyra pro atitinkamą sietą s_i , %:

$$s_i = 100 - \left(100 \cdot \frac{\sum R_i}{M} \right); \quad (2.4)$$

čia, $\sum R_i$ – prabyrančių pro atitinkamus sietus liekanų suma, g;

M – ant visų sietų likusių liekanų masų suma (mėg. masė po sijojimo)

Bandymo metu gautos išbiros turi tenkinti minimalias ir maksimalias absoliučių verčių ribas.

Stambiojo ir smulkiojo užpildo dalelių pasiskirstymas po granulimetrinės sudėties nustatymo siojimo metodu, pateiktas 28 paveikslėlyje.



28 pav. Išsijotų užpildų frakcijos (a) – žvirgždas fr. 4/16, (b) – smėlis fr. 0/4

2.5.2. Betono mišinių sudėtys, gamyba ir bandinių formavimas

Šiame tyrime anksčiau suprojektuotą betono mišinio sudėtį laikome kontroline (1), ji yra viso projekto atskaitos taškas, t. y. visi rezultatai lyginami su šios sudėties rezultatais. Visų mišinių sudėtyse pastoviais dydžiais išlieka užpildai, cementas, vanduo ir superplastiklis (žr. 18 lentelė). Tuo tarpu kitos sudėtys yra modifikuojamos atitinkamomis įmaišomis ir jų deriniais. Naudojami įmaišų kiekiai: polipropileno ir pluoštinių kanapių plaušas ($3,0 \text{ kg/m}^3$), SRA (0,5 ir 1,5 % nuo cemento masės) ir negesintos kalkės (1,5 ir 2,5 % nuo cemento masės).

18 lentelė. Betono mišinių sudėtys kg/m^3

Sudėties nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sudėties žymuo	CNTRL	POLI3.0	CNBS3.0	SRA0.5	SRA1.5	CaO1.5	CaO2.5	CaO1.5 SRA1.5	CaO2.5 SRA1.5	POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5
Cementas	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319
Vanduo	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169
Stambus užpildas	1006	1006	1006	1006	1006	1006	1006	1006	1006	1006	1006
Smulkus užpildas	870	870	870	870	870	870	870	870	870	870	870
Superplastiklis	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Polipropileno plaušas	-	3,00	-	-	-	-	-	-	-	3,00	-
Pluoš. kanapių plaušas	-	-	3,00	-	-	-	-	-	-	-	3,00
Susitr. mažinanti įmaiša (SRA)	-	-	-	1,60	4,79	-	-	4,79	4,79	4,79	4,79
Negesintos kalkės	-	-	-	-	-	4,79	7,98	4,79	7,98	7,98	7,98

Betono mišinių maišymas ir bandinių formavimas atliekamas pagal LST EN 12390-1:2021 [63] ir LST EN 12390-2:2019 [64] standartuose pateiktas metodikas.

Betono mišinio maišymas atliekamas specialioje maišyklėje (žr. 29 pav.). Atsižvelgus į šviežio betono mišinio bandymus ir reikalingą betoninių bandinių kiekį, nuspręsta maišyti 10 l ($0,010 \text{ m}^3$) mišinio.



29 pav. Betono maišyklė

Betono mišinio maišymo trukmė (3 min.) visoms sudėtims priimta vienoda, kad būtų išlaikytos pastovios maišymo sąlygos. Toliau pateikiama mišinio paruošimo eiga ir trukmė:

1. Sausų medžiagų (užpildai ir plaušas) maišymas – 30 sek.;
2. Sudrėkintų medžiagų (užpildai, plaušas ir $\frac{1}{2}$ vandens) maišymas – 30 sek.;
3. Pauzė, skirta geresniam medžiagų vandens įsisavinimui – 1 min.;
4. Supilamos rišamosios medžiagos (cementas, negesintos kalkės) ir vos tik pradėjus maišymą supilami likę skystieji komponentai ($\frac{1}{2}$ vandens, superplastiklis ir SRA), maišoma – 1 min.



30 pav. Sudėties nr.2 (POLI3.0) mišinys

Paruošus betono mišinį (žr. 30 pav.) pirmiausia atliekami šviežio betono mišinio bandymai, vėliau pereinama prie bandinių formavimo. Betoninių bandinių skaičius vienai betono mišinio sudėčiai – 6 vnt. kubelių ($100 \times 100 \times 100$ mm) ir 2 vnt. prizmių ($75 \times 75 \times 250$ mm). Kubeliai skirti gniuždymo stiprio po 7 ir 28 dienų nustatymui (4 vnt.) ir atsparumo šalčiui nustatymui (2 vnt.), o prizmės – susitraukimų, lenkimo stiprio ir poringumo parametrų bandymams.

2.5.3. Betono mišinio bandymai

Norint įvertinti ar betono mišinio sudėties projektavimo metu užsiduoti šviežio betono mišinio parametrų reikalavimai yra įgyvendinti, nuspręsta atlikti šviežio betono mišinio bandymus.

Slankumo bandymas atliekamas, pagal LST EN 12350-2:2019 [65] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra remiantis betono mišinio suslūgimo didumu, nustatyti mišinio konsistencijos klasę (žr. 31 pav.).



31 pav. Sudėties nr.6 (CaO1.5) suslūgimas

Betono mišinio tankio bandymas atliekamas pagal LST EN 12350-6:2019 [67] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra nustatyti šviežio betono mišinio tankį. Pagal (2.5) formulę apskaičiuojamas betono mišinio tankis D :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (2.5)$$

čia, m_1 – tuščio indo masė, kg; m_2 – užpildyto indo masė, kg; V – indo tūris, m^3 .

Oro kiekio bandymas slėginiu metodu atliekamas pagal LST EN 12350-7:2019 [66] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra nustatyti betono mišinio procentinį įt. oro kiekį (žr. 32 pav.).



32 pav. Sudėties nr.6 (CaO1.5) įt. oro kiekis

2.5.4. Susitraukimų nustatymo bandymas

Norint įvertinti pasirinktų susitraukimų mažinančių įmaišų efektyvumą, nuspręsta atlikti betono susitraukimų nustatymo bandymą. Susitraukimų nustatymo bandymas atliekamas pagal LST EN 12390-16:2019 [68] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra išmatuoti etaloninės prizmės ilgiausią kraštinę po 1, 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 dienų ir apskaičiuoti prizmės ilgio pokytį.

Bandymas pradedamas išmatuojant ką tik išformuotą prizmės formos bandinį po 24 valandų kietėjimo. Šis matavimas yra pats svarbiausias, kadangi nuo jo priklauso visi kiti matavimai. Matavimai atliekami naudojantis specialia, susitraukimų matavimui skirta, įranga (žr. 33 pav.).



33 pav. Sudėties nr.8 (CaO1.5SRA1.5) susitraukimų matavimas po 90 dienų

Gavus prizmės ilgių reikšmes pagal (2.6) formulę, yra apskaičiuojami ilgio pokyčiai ε_{CS} , ‰ :

$$\varepsilon_{CS} = \frac{l(t_0) - l_{CS}(t)}{L_0} \cdot 1000; \quad (2.6)$$

čia L_0 – bandinio ilgis, mm;

$l(t_0)$ – bandinio ilgis po 24 valandų kietėjimo, mm;

$l_{CS}(t)$ – bandinio ilgis po 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 dienų kietėjimo, mm.

Atliekant šį bandymą, kiekviena prizmė yra pasverama, todėl tyrimo metu užfiksuojami ne tik ilgio bet ir masės pokyčiai. Masės pokyčiai X_{CS} , ‰ apskaičiuojami, pagal (2.7) formulę:

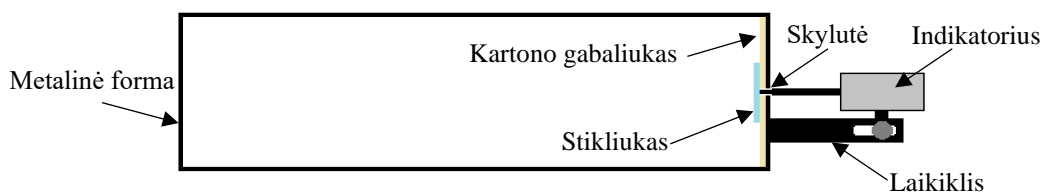
$$X_{CS} = \frac{W_{CS}(t) - W(t_0)}{W(t_0)} \cdot 100; \quad (2.7)$$

$W(t_0)$ – bandinio masė po 24 valandų kietėjimo, g;

$W_{CS}(t)$ – bandinio masė po 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 dienų kietėjimo, g.

Norint įvertinti pasirinktų susitraukimus mažinančių įmaišų įtaką pirminiams susitraukimams, nuspręsta atlikti nestandartizuotą pirminių betono susitraukimų nustatymo bandymą. Bandymo tikslas yra išmatuoti prizmės ilgiausią kraštinę per pirmas 24 kietėjimo valandas ir apskaičiuoti prizmės ilgio pokytį.

Bandymo metu specialiai pagaminta surenkama prizmės (250×75×75 mm) forma su skylute ir laikikliu, prie kurio pritvirtinamas indikatorius (žr. 34 pav.). Formos viduje, prie sienelės, priglaudžiamas vandeniui nelaidžia izoliacija padengtas kartono gabaliukas, kad formoje susidarytų oro tarpas. Prie kartono priklijuojamas stikliukas (20×20×5 mm), kad indikatoriaus strypelis galėtų remtis į stikliuką. Paruošus formą ir pripildžius ją betono mišiniu, betonas spaudžia stikliuką į kartoną, o šis spaudžiasi į formos sienelę. Kuomet betono mišinys pradeda rišti ir po truputį susitraukti, jautrus indikatorius (0,001 mm) užfiksuoja pirminius ilgio pokyčius.



34 pav. Pirminio susitraukimo matavimo schema

Bandymo metu specialioje talpoje buvo maišomas mažas kiekis (2 l) betono mišinio (žr. 35 pav.). Bandymą nuspręsta atlikti kontrolinei sudėčiai (1) ir sudėčiai sudarytai iš 1,5 % SRA ir 2,5 % negesintų kalkių derinio.



35 pav. Mišinio paruošimas pirminio susitraukimo matavimui

Pirminiai ilgio pokyčiai buvo fiksuojami po 2, 4, 8, 12, 16, 20 ir 24 val. (žr. 36 pav.), vėliau, gavus prizmės ilgių reikšmes pagal (2.6) formulę, yra apskaičiuojami ilgio pokyčiai.



36 pav. Sudėties nr.1 (CNTRL) pirminio susitraukimo matavimas

2.5.5. Gniuždymo stiprio bandymas

Norint įsitikinti jog betono mišinio sudėties projektavimo metu užsiduota gniuždymo stiprio klasė yra pasiekta, nuspręsta atlikti sukietėjusio betono gniuždymo stiprio bandymą. Gniuždymo stiprio bandymas atliekamas pagal LST EN 12390-3:2019 [69] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra apkrauti standartinių matmenų betoninį bandinį atitinkama gniuždymo jėga iki jo suirimo bei užfiksuoti didžiausią bandinio ardomąją apkrovą (žr. 37 pav.).



37 pav. Gniuždymo stiprio nustatymas po 28 dienų

Sugniuždžius bandinį, užfiksuojama didžiausia ardomoji apkrova ir pagal (2.8) formulę apskaičiuojamas gniuždymo stipris f_c , MPa:

$$f_c = \frac{F}{A_c}; \quad (2.8)$$

čia F – didžiausia ardomoji apkrova, N;

A_c – bandinio, kurį veikia gniuždymo jėga, skerspjūvio plotas, apskaičiuotas išmatavus bandinį, mm²;

2.5.6. Lenkimo stiprio bandymas

Norint ištirti tyrimuose naudotų susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką betono lenkimo stipriui, nuspręsta atlikti sukietėjusio betono lenkimo stiprio bandymą. Lenkimo stiprio bandymas atliekamas pagal LST EN 12390-5:2019 [70] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra apkrauti standartinių matmenų betoninį bandinį atitinkama lenkimo jėga iki jo suirimo bei užfiksuoti didžiausią bandinio ardomąją apkrovą (žr. 38 pav.).



38 pav. Lenkimo stiprio nustatymas po 90 dienų

Sulenkus bandinį, užfiksuojama didžiausia lenkimo apkrova ir pagal (2.9) formulę apskaičiuojamas lenkimo stipris $f_{ct,fl}$, MPa:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}; \quad (2.9)$$

čia F – didžiausia lenkimo apkrova, N; l – atstumas tarp atramų (tarpatramis), mm; d_1 ir d_2 – bandinio plotis ir aukštis, mm.

Presui pradėjus bandinius veikti lenkimo apkrova, kompiuterinėje programoje pateikiama lenkimo stiprio ir plyšio pločio priklausomybė. Pagal (2.10) formulę apskaičiuojama irimo energija G_F , N/m:

$$G_F = \frac{W_t}{(D - a_0) \cdot b}; \quad (2.10)$$

čia $(D - a_0)$ – suirimo plokštumos ilgis; b – bandinio storis, W_t – suminė energija (darbas), apskaičiuojama pagal (2.11) formulę:

$$W_t = W_r + 2 \cdot P_W \cdot \delta f; \quad (2.11)$$

čia W_r – priklausomybėje nurodytos kreivės plotas, apskaičiuojamas kompiuterine programa „OriginPro“; δf – priklausomybėje nurodytos kreivės poslinkis; P_W – ekvivalentinė, sąvojo svorio jėga, apskaičiuojama pagal (2.12) formulę:

$$P_W = \frac{W_0 \cdot S}{2 \cdot L}; \quad (2.12)$$

čia W_0 – bandinio svoris; S – tarpatramio ilgis; L – bandinio ilgis.

2.5.7. Atsparumo šalčiui bandymas

Norint ištirti tyrimuose naudotų susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką betono atsparumui šalčiui, nuspręsta atlikti atsparumo šalčiui nustatymą tūriniu užšaldymu ir atšildymu. Atsparumo šalčiui nustatymo bandymas atliekamas pagal LST 1428-17:2016 [71] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra įdėti standartinių matmenų bandinį į šaldymo kamerą, kurioje jis būtų veikiamas šalčio ciklu. Atlikus atitinkamą kiekį šalčio ciklų, bandinius sugniuždyti anksčiau minėtu bandymo metodu bei išsiaiškinti, kokį poveikį šalčio ciklai turi betono gniuždymo stipriui, kuomet yra naudojamos skirtingos susitraukimą mažinančios įmaišos.



39 pav. Šaldymo kameroje esanti talpa ir bandiniai joje

Bandymas pradedamas paruošus standartinių matmenų (100×100×100 mm) bandinius, kurie kietėjo 28 paras. Betoniniams bandiniams pasiekus projektinį stiprumą, jie yra išimami iš kietinimo vonelės ir įdedami į šaldymo kameroje esančią talpą (žr. 39 pav.). Sudėjus bandinius į šaldymo kameroje esančią talpą, šie yra paliekami talpoje, kol bandiniai bus paveikti numatytą skaičių šalčio ciklų. Šioje šaldymo kameroje vienas šalčio ciklas trunka maždaug 7–8 valandas, 50 % šio laiko skirta užšaldymui ir 50 % atšildymui. Taigi, per vieną parą šaldymo kamera yra pajėgi atlikti 3 šalčio ciklus. Šaldymo kameroje bandiniai buvo palikti 34 paras, dėl to buvo paveikti apie 100 šalčio ciklų.

Šalčio ciklų paveiktus betoninius bandinius išėmus iš šaldymo kameros, tuoj pat kruopščiai apžiūrinamas bandinių paviršius, stengiamasi užfiksuoti kiekvieną akimi matomą įtrūkimą, nutrupėjimą ar suskilinėjimą. Apžiūrėjus bandinius vizualiai yra atliekamas gniuždymo stiprio bandymas pagal anksčiau minėtą bandymo metodą.

2.5.8. Vandens įgeriamumo kinetikos bandymas

Norint ištirti tyrimuose naudotų susitraukimą mažinančių įmaišų įtaką betono poringumo parametrui, nuspręsta atlikti vandens įgeriamumo kinetikos bandymą. Vandens įgeriamumo kinetikos bandymas atliekamas pagal GOST 12730.4-78 [72] standarte pateiktą metodiką. Bandymo tikslas yra remiantis betoninių bandinių vandens įgeriamumo kinetika, nustatyti betono uždaro ir atviro poringumo parametrus.

Prieš pradedant bandymą, paruošiami bandiniai. Bandiniai gaunami 90 dienų kietėjusias betonines prizmes susmulkinus į mažus 450–750 g sveriančius gabaliukus. Kiekvienai betoninei sudėčiai paruošta po 4 vnt. betoninių gabaliukų. Pasveriamos sausų bandinių masės. Toliau bandiniai įdedami į talpas (žr. 40 pav.), kurios užpildomos vandeniu.



40 pav. Talpos skirtos betoninių bandinių įmirkymui

Betoniniai bandiniai įmirkomi 15 min., 1 val., 24 val. ir 48 val., tuomet ištraukiami, sausa šluoste nusausinamas bandinių paviršius ir atliekamas bandinių svėrimas. Toliau atliekamas bandinių svėrimas vandenyje. Pasvėrus visus bandinius atliekami skaičiavimai. Pagal (2.13) formulę apskaičiuojamas masinis vandens įgėris W_{t1} po 15 min., 1 val., 24 val. ir 48 val., %:

$$W_{t1} = \frac{(m_t - m)}{m} \cdot 100; \quad (2.13)$$

čia, m – sauso band. masė, g; m_t – band. masė po atitinkamo laiko mirkimo vandenyje, g.

Pagal (2.14) formulę apskaičiuojamas sauso bandinio tankis ρ , kg/m³:

$$\rho = \frac{m}{(m_{48} - m_{vand.})} \cdot 1000; \quad (2.14)$$

čia, m_{48} – band. masė po 48 val. mirkimo vandenyje, g; $m_{vand.}$ – band. masė vandenyje, g.

Tūrinis vandens įgėris $W_{p(t)}$ yra lygus atvirajam poringumui P_a ir apskaičiuojamas pagal (2.15) formulę, %:

$$W_{p(t)} = \frac{m}{(m_{48} - m_{vand.})} \cdot 1000; \quad (2.15)$$

čia, m_{48} – band. masė po 48 val. mirkimo vandenyje, g; $m_{vand.}$ – band. masė vandenyje, g.

Pagal (2.16) formulę apskaičiuojamas bendras poringumas P , %:

$$P = \frac{(\rho_\sigma - \rho)}{\rho_\sigma} \cdot 100; \quad (2.16)$$

čia, ρ – sauso bandinio tankis kg/m³; ρ_σ – betono susmulkinto į miltelius, tankis, nustatomas naudojant piknometrą ir yra prilyginamas 2690 kg/m³.

Pagal (2.17) formulę apskaičiuojamas uždaras poringumas P_u , %:

$$P_u = P - P_a; \quad (2.17)$$

Pagal (2.18) formulę apskaičiuojamas atsparumo šalčiui kriterijus K_ξ :

$$K_\xi = \frac{P_u}{(0,09 \cdot P_a)}; \quad (2.18)$$

Pagal (2.19) formulę apskaičiuojamas prognozuojamas atsparumas šalčiui ciklais F :

$$F = 0,2367 \cdot K_\xi^6 - 4,038 \cdot K_\xi^5 + 25,111 \cdot K_\xi^4 - 66,32 \cdot K_\xi^3 + 38,311 \cdot K_\xi^2 + 308,8 \cdot K_\xi - 226,65; \quad (2.19)$$

3. Tyrimų rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami magistro baigiamojo projekto metu atliktų laboratorinių bandymų rezultatai bei jų analizė.

3.1. Granulimetrinė sudėtis

Išsijojus stambiojo ir smulkiojo užpildo mėginius, pagal anksčiau minėtas (2.1 – 2.4) formules atlikti granulimetrinės sudėties parametrų skaičiavimai, o jų rezultatai pateikti 19 lentelėje.

19 lentelė. Granulimetrinės sudėties rezultatai

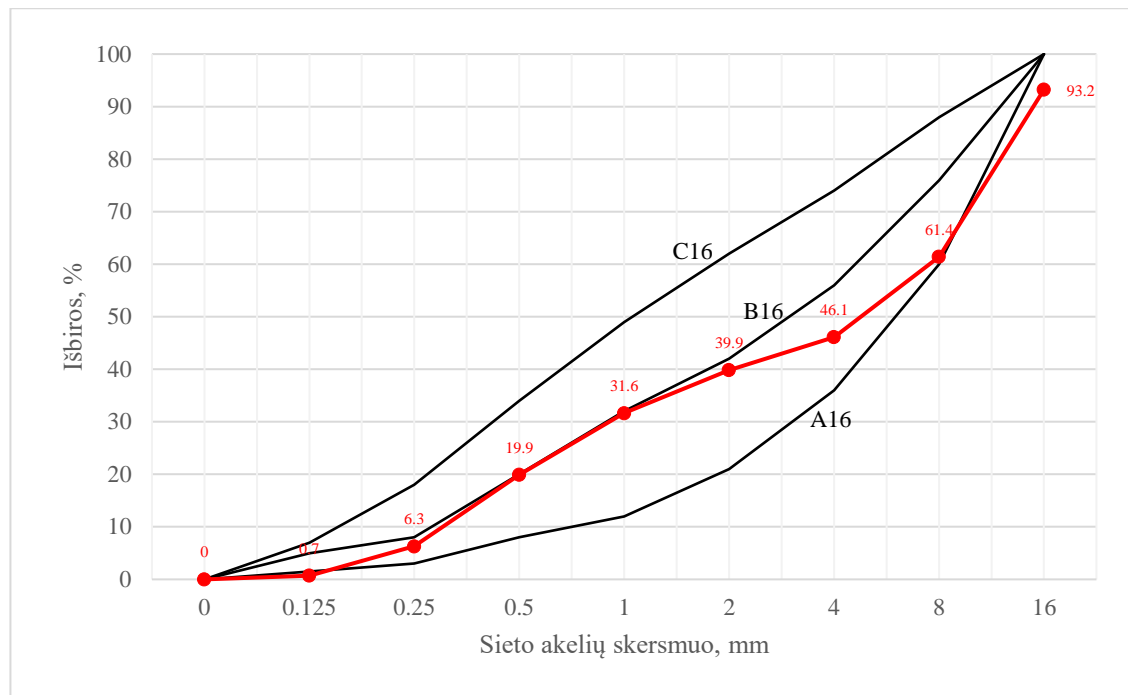
Užpildas	Drėgno mėg. masė, g		Išdžiovinto mėg. masė, g		Išsijoto mėg. masė, g		Sijojimo nuostoliai, %		Drėgnis, %	Užterštumas, %
Smėlis fr. 0/4	501,3		482,4		480,0		0,50		3,92	1,2
Žvirgždas fr. 4/16	3476,1		3388,7		3382,6		0,18		2,58	0,3
Sieto akelių skersmuo, mm										
	<0,125	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Liekana ant sieto, g										
Smėlis fr. 0/4	5,9	56,3	140,4	121,0	84,1	61,4	10,9	0	0	0
Žvirgždas fr. 4/16	10,3	7,6	2,2	2,9	5,1	21,4	898,3	2007,5	427,3	0
Prabyra pro sietus, %										
Smėlis fr. 0/4	0	1,7	13,4	42,5	67,6	85,0	97,7	100	100	100
Žvirgždas fr. 4/16	0	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,6	28,1	87,4	100
Prabyra pro sietus įvertinus stambaus ir smulkaus užpildo kiekį betono mišinio sudėtyje, %										
Smėlis fr. 0/4	0	0,8	6,2	19,7	31,4	39,4	45,4	46,4	46,4	46,4
Žvirgždas fr. 4/16	0	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,9	15,1	46,8	53,6
Suminis užpildų prabyrėjimas (išbiros), %										
Smėlis fr. 0/4 ir žvirgždas fr. 4/16	0	1,1	6,6	20,1	31,8	40,0	46,2	61,5	93,2	100
Granulimetrinės sudėties reikalavimai LST 1974:2012 [60], %										
C16	0	7	18	34	49	62	74	88	100	100
B16	0	5	8	20	32	42	56	76	100	100
A16	0	1.5	3	8	12	21	36	60	100	100

Atlikus žvirgždo fr. 4/16 ir smėlio fr. 0/4 mėginių svėrimus prieš ir po džiovinimo, nustatyta jog užpildų drėgmė ėminio paėmimo metu buvo atitinkamai 2,58 ir 3,92 %.

Atliekant granulimetrinės sudėties nustatymo bandymą, sijojimo metodu buvo prarasta nedidelė dalis (<1 %) medžiagos: stambiojo užpildo – 0,18 %, smulkiojo užpildo – 0,50 %.

Atlikus granulimetrinės sudėties nustatymo bandymą, nustatytas smulkiausiųjų dalelių (<0,125 mm) kiekis, t. y. užterštumas: žvirgždo – 0,3 %, smėlio – 1,2 %. Galima teigti, jog užpildų sudėtyje yra nedidelis molio ir aleurito dalelių kiekis, o tai įrodo, kad užpildai gamybos metu buvo tinkamai plaunami.

Atlikus užpildų granulimetrinės sudėties parametrų skaičiavimus, remiantis gautais rezultatais nubraižyta betono mišinio granulimetrinė kreivė (žr. 53 pav.). Kreivėje parodyta išbirų procentinė priklausomybė tenkanti atitinkamiems sietams. Kreivė nubraižyta remiantis LST 1974:2012 [60] standarte pateiktais betono mišinio, kurio $D = 16 \text{ mm}$, užpildų granulimetrinės sudėties A16, B16 ir C16 išbirų reikalavimais.



41 pav. Betono mišinio granulimetrinė kreivė

Analizuojant betono mišinio granulimetrinę kreivę, pastebėta jog kreivė neperžengia LST 1974:2012 [60] standarte minimų A16 ir C16 išbirų reikalavimų ir yra artima B16 reikalavimams, todėl galima teigti jog atskirų užpildų dalelių frakcijų išsidėstymas yra patenkinamas, o tai reiškia, kad užpildai yra kokybiškai frakcionuoti.

3.2. Šviežio betono mišinio parametrai

Šviežio betono mišinio tyrimų rezultatai pateikti 20 lentelėje.

20 lentelė. Šviežio betono mišinio bandymų rezultatai

Sudėties nr.	Sudėties žymuo	Mišinio suslūgimas, mm	Slankumo klasė	Mišinio tankis kg/m ³	Oro kiekis, %
1	CNTRL	190	S4	2356	3,4
2	POLI3.0	110	S3	2354	3,2
3	CNBS3.0	60	S2	2359	5,4
4	SRA0.5	190	S4	2349	3,8
5	SRA1.5	190	S4	2368	3,3
6	CaO1.5	170	S4	2344	4,1
7	CaO2.5	160	S4	2345	3,7
8	CaO1.5SRA1.5	190	S4	2365	3,1
9	CaO2.5SRA1.5	180	S4	2356	3,2
10	POLI3.0CaO2.5SRA1.5	120	S3	2345	3,1
11	CNBS3.0CaO2.5SRA1.5	70	S2	2361	4,5

Analizuojant betoninių mišinių suslūgimo rezultatus (žr. 20 lentelė), pastebėta jog kontrolinės betono mišinio sudėties (1) suslūgimo rodiklis atitinka betono mišinio projektavimo stadijoje užsiduotas konsistencijos (slankumo) klasės ribas, t. y. pasiekta projektinė S4 slankumo klasė.

Betono mišiniai, kuriuose buvo naudojamas polipropileno plaušas (2) ir (10), lyginant su kontroliniu mišiniu (1), slankumą sumažino iki S3 klasės, tuo tarpu mišiniai, kuriuose panaudotas

pluoštinių kanapių plaušas (3) ir (11), slankumą sumažino iki S2 klasės. Polipropilenas yra termoplastinis polimeras, neįgeriantis vandens, tuo tarpu kanapių plaušas yra pluoštinė medžiaga, kuri dalį vandens įgeria. Daroma prielaida, kad kanapių plaušas, turėdamas savybę įgerti dalį vandens, slankumą sumažino intensyviau nei polipropileno plaušas.

Betono mišiniuose, kuriuose panaudota skystojo pavidalo susitraukimą mažinanti įmaiša (4) ir (5), betono suslūgimo rodiklis, lyginant su kontroliniu mišiniu, išliko tolygus bei atitiko projektinę S4 slankumo klasę.

Betono mišiniuose, kuriuose panaudotos negesintos kalkės (6) ir (7) pastebėtas 20–30 mm suslūgimo rodiklio sumažėjimas lyginant su kontroliniu mišiniu, tačiau gautas rezultatas patenka į projektinės konsistencijos klasės ribas, t. y. pasiekta S4 slankumo klasė. Daroma prielaida jog nedidelis negesintų kalkių kiekis ženkliai slankumo klasės neįtakoja, tačiau sudozavus didesnę kiekį (daugiau nei 2,5 % nuo cemento masės) galima tikėtis slankumo sumažėjimo. Betono mišiniuose su negesintų kalkių ir SRA deriniais (8) ir (9) slankumo klasės sumažėjimas neužfiksuotas.

Maišant betono mišinį, sausi komponentai (užpildai ir plaušai) sąveikauja su vandeniu, t. y. vandens molekulės padengia sausų dalelių paviršių plotus. Kuo didesni sausų dalelių kiekiai, tuo didesni šių dalelių paviršiaus plotą reikia padengti vandeniu. Galima daryti prielaidą jog didelis betono mišinio sausų komponentų kiekis, tampa slankumo sumažėjimo priežastimi.

Atlikus betono mišinio tankio skaičiavimus, pagal anksčiau minėtą (2.5) formulę ir išanalizavus gautus rezultatus, pastebėta jog kontrolinės betono mišinio sudėties (1) tankis gautas panašus betono mišinio projektavimo stadijoje apskaičiuotam tankiui – 2366 kg/m³. Didesnių tankio nuokrypių nematyti ir kitose sudėtyse, todėl galima daryti prielaidą jog betono maišymo metu visos medžiagos buvo dozuojamos tinkamai.

Analizuojant betoninių mišinių oro kiekio rezultatus, pastebėta jog kontrolinės betono mišinio sudėties (1) oro kiekis neatitinka betono mišinio projektavimo stadijoje užsiduotos 2% ribos. Ši tendencija pastebėta ir kitose sudėtyse, kur oro kiekis svyruoja nuo 3,1–5,4%. Atlikus granulimetrinę sudėtį nepastebėta netinkamo atskirų užpildų dalelių frakcijų išsidėstymo, tačiau neatmetamas variantas jog oro kiekio padidėjimas įvyko smulkių dalelių pertekliaus.

Labiausiai orą įtraukė betono mišiniai, kuriuose buvo naudojamas pluoštinių kanapių plaušas (3) ir (11), atitinkamai 5,4 ir 4,5 %. Slankumo bandyme pastebėta jog pluoštinių kanapių plaušas įgėrė dalį vandens taip sumažindamas slankumą. Vertinant įtraukto oro kiekį žinome, kad vandenį (divandenilio oksidą) sudaro deguonies (88,6 %) ir vandenilio (11,4 %) cheminiai elementai, tuo tarpu oro sudėtyje yra 20,9 % deguonies. Įgerdami vandenį kanapių plaušeliai sulaiko dalį oro. Pluoštinių kanapių plaušo savybė įgerti vandenį tampa ne tik slankumo sumažėjimo, bet ir įtraukto oro kiekio padidėjimo priežastimi.

3.3. Susitraukimai

Betono susitraukimų bandymo metu kruopščiai ir preciziškai tiksliai atlikti prizmės formos bandinių ilgio ir masės matavimai, o jų reikšmės pateiktos 21 lentelėje.

21 lentelė. Bandinių ilgių ir masių matavimų reikšmės po 1, 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų

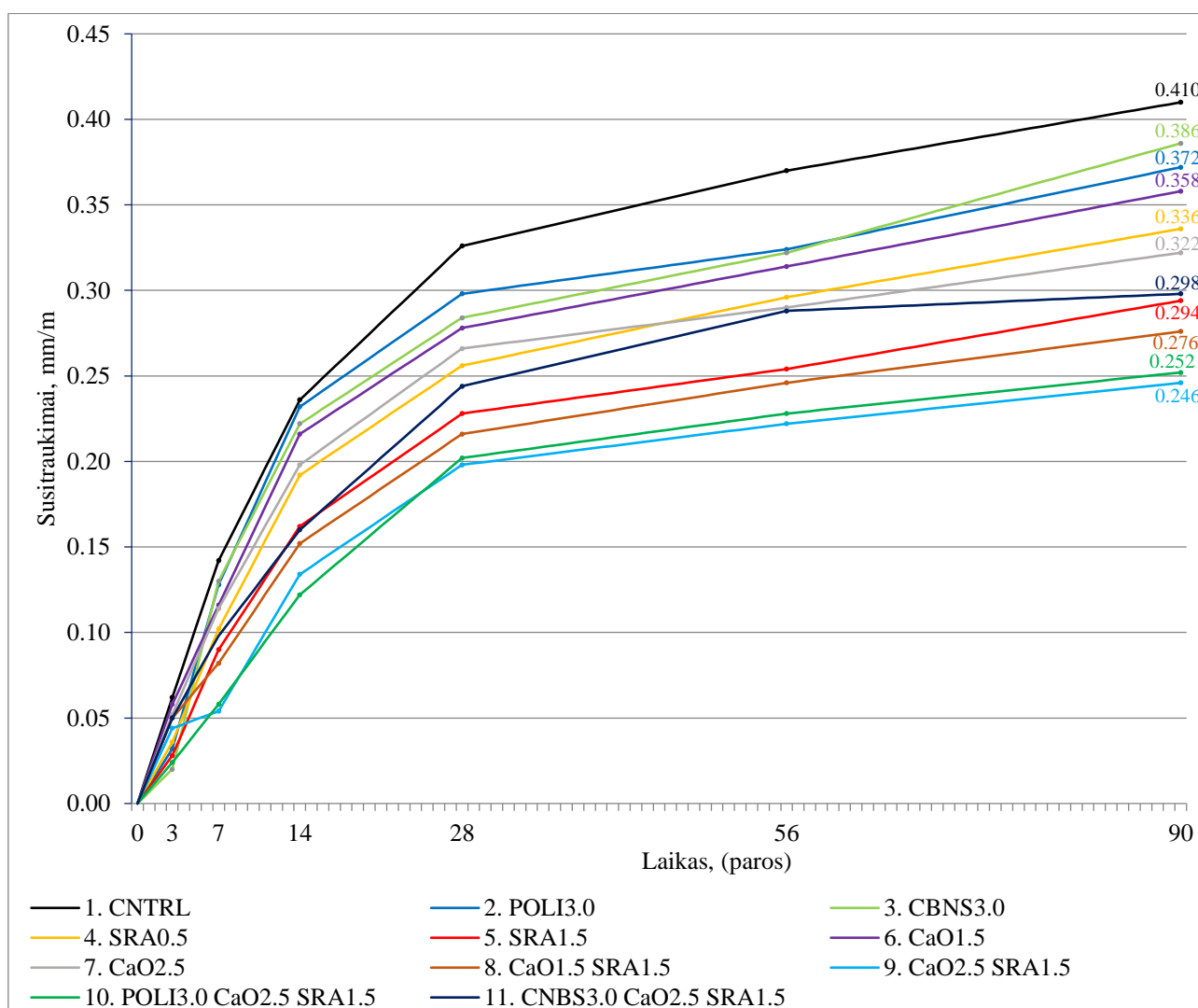
Sudėties žymuo	Band. nr.	Kietinimo trukmė (paros)													
		1		3		7		14		28		56		90	
		tr, mm	m, g	tr, mm	m, g	tr, mm	m, g	tr, mm	m, g	tr, mm	m, g	tr, mm	m, g	tr, mm	m, g
CNTRL	1.1	7,989	3296,2	7,973	3279,5	7,954	3268,3	7,930	3262,6	7,909	3255,5	7,897	3249,0	7,886	3245,0
	1.2	7,545	3308,9	7,530	3209,1	7,509	3276,1	7,486	3270,1	7,462	3263,9	7,452	3259,1	7,443	3255,0
POLI3.0	2.1	6,246	3302,5	6,238	3285,2	6,216	3273,1	6,191	3267,1	6,172	3259,6	6,166	3253,1	6,153	3248,4
	2.2	5,320	3284,1	5,312	3265,3	5,286	3251,3	5,259	3245,8	5,245	3239,4	5,238	3233,7	5,227	3230,4
CNBS3.0	3.1	6,713	3174,4	6,710	3157,6	6,682	3145,5	6,661	3139,9	6,649	3132,4	6,639	3125,9	6,615	3121,4
	3.2	4,769	3254,6	4,762	3233,6	4,735	3219,2	4,710	3213,7	4,961	3206,6	4,682	3201,2	4,674	3197,6
SRA0.5	4.1	7,732	3308,2	7,729	3291,6	7,713	3279,6	7,693	3273,7	7,672	3265,7	7,663	3258,5	7,653	3253,9
	4.2	7,711	3285,1	7,696	3264,2	7,679	3248,9	7,654	3243,0	7,643	3235,9	7,632	3230,9	7,622	3226,6
SRA1.5	5.1	8,387	3317,7	8,381	3301,0	8,368	3289,1	8,348	3282,8	8,330	3274,3	8,323	3267,7	8,313	3261,8
	5.2	8,393	3328,6	8,385	3308,5	8,367	3294,3	8,351	3287,6	8,336	3280,3	8,330	3274,3	8,320	3269,6
CaO1.5	6.1	8,641	3291,4	8,446	3274,2	8,432	3263,4	8,410	3257,3	8,392	3250,6	8,384	3244,8	8,732	3239,6
	6.2	8,269	3337,3	8,255	3317,4	8,240	3304,1	8,212	3298,4	8,199	3292,6	8,189	3288,4	8,179	3285,1
CaO2.5	7.1	8,092	3335,5	8,078	3317,4	8,065	3307,7	8,045	3302,1	8,029	3297,0	8,023	3292,5	8,012	3285,8
	7.2	7,992	3305,4	7,980	3284,5	7,962	3272,6	7,940	3266,5	7,922	3260,4	7,916	3256,1	7,911	3253,9
CaO1.5 SRA1.5	8.1	7,338	3315,9	7,325	3297,8	7,316	3287,3	7,300	3280,5	7,282	3272,6	7,273	3266,6	7,263	3260,3
	8.2	6,207	3372,8	6,195	3352,1	6,188	3340,1	6,169	3333,3	6,155	3326,3	6,149	3321,5	6,144	3317,6
CaO2.5 SRA1.5	9.1	6,480	3246,2	6,469	3229,2	6,467	3218,9	6,448	3211,5	6,430	3203,4	6,425	3197,2	6,419	3191,9
	9.2	4,824	3289,1	4,813	3268,4	4,810	3256,6	4,789	3249,1	4,775	3241,8	4,768	3236,1	4,762	3231,5
POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	10.1	7,476	3335,6	7,469	3319,7	7,463	3309,7	7,445	3302,3	7,430	3294,4	7,422	3287,8	7,415	3281,8
	10.2	7,780	3261,5	7,775	3240,7	7,764	3229,1	7,750	3221,8	7,725	3214,2	7,720	3208,9	7,715	3204,6
CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5	11.1	8,407	3332,6	8,393	3314,0	8,381	3302,9	8,365	3295,1	8,346	3286,4	8,335	3279,6	8,331	3274,1
	11.2	8,438	3268,0	8,427	3243,9	8,415	3232,9	8,400	3225,4	8,377	3217,7	8,366	3212,5	8,365	3208,6

Išmatavus prizmės bandinių ilgį, pagal anksčiau minėtą (2.6) formulę atlikti susitraukimų skaičiavimai, o jų rezultatai pateikti 22 lentelėje.

22 lentelė. Susitraukimų rezultatai po 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų

Paros	Sudėties nr. / žymuo										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	CNTRL	POLI3.0	CNBS3.0	SRA0.5	SRA1.5	CaO1.5	CaO2.5	CaO1.5 SRA1.5	CaO2.5 SRA1.5	POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5
Susitraukimas, ‰ arba mm/m											
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,062	0,032	0,020	0,036	0,028	0,058	0,052	0,050	0,044	0,024	0,050
7	0,142	0,128	0,130	0,102	0,090	0,116	0,114	0,082	0,054	0,058	0,098
14	0,236	0,232	0,222	0,192	0,162	0,216	0,198	0,152	0,134	0,122	0,160
28	0,326	0,298	0,284	0,256	0,228	0,278	0,266	0,216	0,198	0,202	0,244
56	0,370	0,324	0,322	0,296	0,254	0,314	0,290	0,246	0,222	0,228	0,288
90	0,410	0,372	0,386	0,336	0,294	0,358	0,322	0,276	0,246	0,252	0,298

Apskaičiavus susitraukimus po 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų, toliau interpoliavimo metodu apskaičiuotos tarpinės susitraukimų reikšmės ir nubraižyta grafinė susitraukimų priklausomybė nuo laiko (žr. 42 pav.).



42 pav. Susitraukimų išsidėstymas laike per 90 parų

Analizuojant susitraukimų rezultatus, pastebėta jog kontrolinės sudėties (1) bandinių susitraukimo vidurkis – 0,410 mm/m, tai reiškia jog į vieną tiesinį metrą betonas susitraukia 0,410 mm. Pastebėta jog didžioji dalis susitraukimų, susidaro ankstyvojoje kietėjimo stadijoje. Per pirmąsias 28 paras susidarė 79,5 % visų kontrolinės sudėties (1) susitraukimų. Tuo tarpu likusio bandymo metu (29–90 paras) kietėjimo bandinių susitraukimas nežymus. Didžiausios betono susitraukimo deformacijos įvyksta per pirmąsias 28 dienas, kadangi šiomis dienomis intensyviausiai vyksta cemento hidratacija. Sparčiai formuojantis šios reakcijos produktams – kalcio hidrosilikatams (C-S-H), įvyksta staigus betono porų struktūros pakitimas, kuris tampa susitraukimų susidarymo priežastimi.

Analizuojant susitraukimų rezultatus po 90 parų kietinimo, pastebėta jog visose sudėtyse, lyginant su kontroline sudėtimi, atsiranda susitraukimų sumažėjimas (žr. 42 pav.). Toliau, didėjimo tvarka, pateikiamos kiekvienos sudėties susitraukimų sumažėjimo procentinės išraiškos:

- Betone (3), kuriame buvo naudojama 3,0 kg/m³ pluoštinių kanapių plaušo įmaišos, susitraukimai sumažėjo mažiausiai. Lyginant su kontroline sudėtimi, po 7, 28 ir 90 parų susitraukimai sumažėjo atitinkamai 8,5 %, 12,9 % ir 5,9 %.
- Betone (2), kuriame buvo naudojama 3,0 kg/m³ polipropileno plaušo įmaišos, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 9,9 %, 8,6 % ir 9,3 %.
- Betone (6), kuriame buvo naudojama 1,5 % nuo cemento masės negesintų kalkių įmaišos, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 18,3 %, 14,7 % ir 12,7 %.
- Betone (4), kuriame buvo naudojama 0,5 % nuo cemento masės SRA cheminės įmaišos, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 28,2 %, 21,5 % ir 18,0 %.
- Betone (7), kuriame buvo naudojama 2,5 % nuo cemento masės negesintų kalkių įmaišos, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 19,7 %, 18,4 % ir 21,5 %.
- Betone (11), kuriame buvo naudojamas 3,0 kg/m³ pluoštinių kanapių plaušo, 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA įmaišų derinys, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 31,0 %, 25,2 % ir 27,3 %.
- Betone (5), kuriame buvo naudojama 1,5 % nuo cemento masės SRA cheminės įmaišos, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 36,6 %, 30,1 % ir 28,3 %.
- Betone (8), kuriame buvo naudojamas 1,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA įmaišų derinys, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 42,3 %, 33,7 % ir 32,7 %.
- Betone (10), kuriame buvo naudojamas 3,0 kg/m³ polipropileno plaušo, 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA įmaišų derinys, susitraukimai lyginant su kontroline sudėtimi po 7, 28 ir 90 parų sumažėjo atitinkamai 59,2 %, 38,0 % ir 38,5 %.
- Betone (9), kuriame buvo naudojamas 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA įmaišų derinys, susitraukimai sumažėjo daugiausiai. Lyginant su kontroline sudėtimi, po 7, 28 ir 90 parų susitraukimai sumažėjo atitinkamai 62,0 %, 39,3 % ir 40,0 %.

Pluoštinių kanapių ir polipropileno plaušo panaudojimas betono susitraukimų kompensavimui nebuvo toks efektyvus, kaip tikėtasi. Pavieniai naudojant šias įmaišas susitraukimas sumažintas vos 5,9 % ir 9,3 %. Norint gauti išsamesnius rezultatus, reikėtų atlikti tolimesnius tyrimus, dozuojant įvairius kiekius, skirtingų gamintojų plaušus.

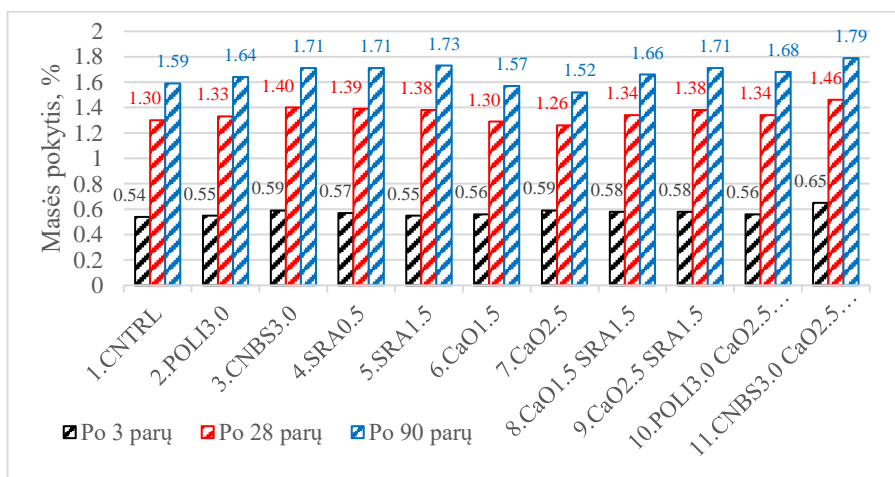
Išanalizavus gautus tyrimų rezultatus galime teigti jog betono susitraukimų sumažinimui veiksmingiausios yra dvi įmaišos: skystojo pavidalo cheminė įmaiša (SRA) ir negesintos kalkės. Daroma prielaida jog betono mišinyje naudojant nedidelį kiekį pavienės SRA cheminės įmaišos (0,5–1,5 %) galima ženkliai sumažinti betono susitraukimus net iki 28,3 %. Tuo tarpu pavieniai naudojant nedidelį kiekį negesintų kalkių (1,5–2,5 %) susitraukimus galima sumažinti iki 21.5 %. Abi šios įmaišos, priklausomai nuo sudozuoto kiekio, sparčiai mažina betono susitraukimą, o veikdamos kartu pademonstruoja dar geresnius rezultatus ir gali sumažinti susitraukimus net iki 40,0 %. Teoriškai, šios dvi įmaišos veikdamos kartu galėtų dar labiau kompensuoti betono susitraukimus, tačiau reikėtų gerai pagalvoti ar dėl per didelio kiekio šių įmaišų, nenukentėtų kitos mechaninės betono savybės. Taigi, šios minties praktiniam įgyvendinimui reikėtų tolimesnių tyrimų, su didesniais kiekiais susitraukimus mažinančių įmaišų.

Pasvėrus bandinių mases, pagal anksčiau minėtą (2.7) formulę atlikti masės pokyčių skaičiavimai, o jų rezultatai pateikti 23 lentelėje.

23 lentelė. Masės pokyčiai po 3, 7, 14, 28, 56 ir 90 parų

Paros	Sudėties nr. / žymuo										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	CNTRL	POL13.0	CNBS3.0	SRA0.5	SRA1.5	CaO1.5	CaO2.5	CaO1.5 SRA1.5	CaO2.5 SRA1.5	POL13.0 CaO2.5 SRA1.5	CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5
Masės pokytis, %											
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,54	0,55	0,59	0,57	0,55	0,56	0,59	0,58	0,58	0,56	0,65
7	0,92	0,94	1,00	0,98	0,95	0,92	0,91	0,92	0,91	0,88	0,98
14	1,10	1,12	1,17	1,16	1,14	1,10	1,09	1,12	1,14	1,11	1,21
28	1,30	1,33	1,40	1,39	1,38	1,29	1,26	1,34	1,38	1,34	1,46
56	1,47	1,52	1,58	1,58	1,57	1,44	1,39	1,50	1,56	1,52	1,64
90	1,59	1,64	1,71	1,71	1,73	1,57	1,52	1,66	1,71	1,68	1,79

Apskaičiavus masės pokyčius, sudaryta stulpelinė masės pokyčių diagrama (žr. 43 pav.).

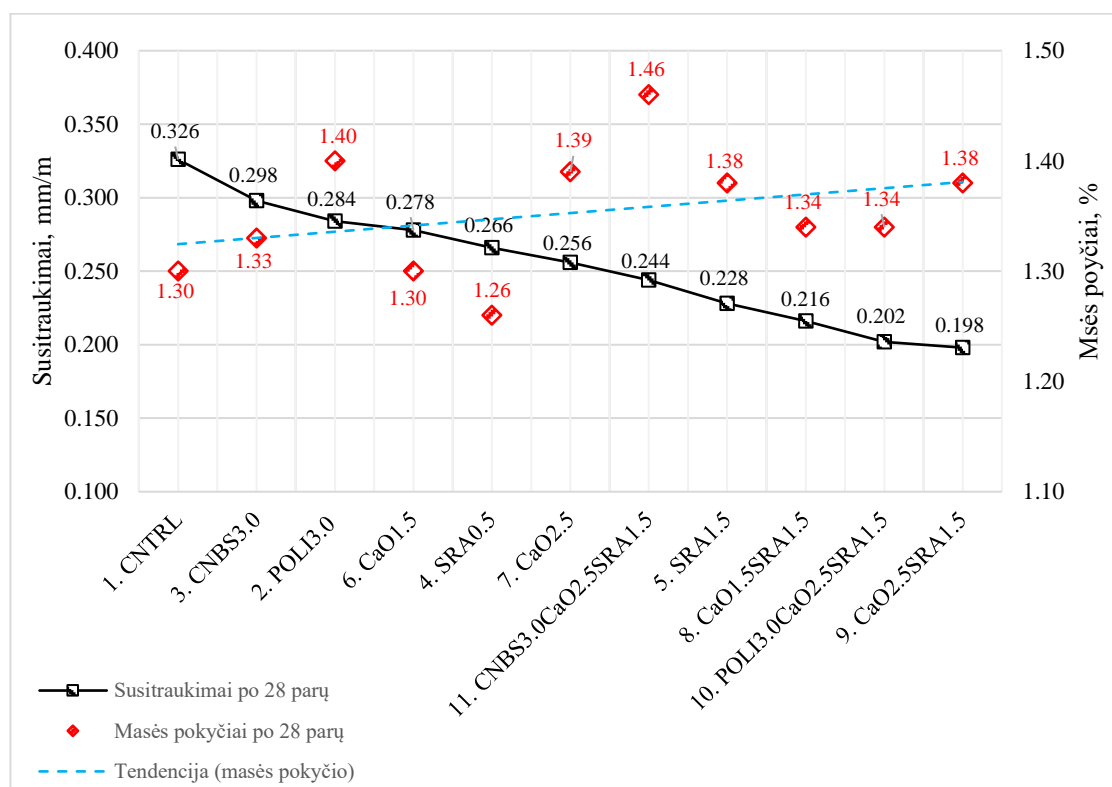


43 pav. Masės pokyčių palyginimas

Analizuojant betoninių prizmių masės pokyčius, pastebėta jog nė vienas betoninis bandinys po 90 parų kietėjimo neprarado daugiau kaip 2 % masės. Kontrolinės sudėties (1) bandinių masės pokyčio vidurkis po 90 dienų – 1,59 %. Intensyviausi betoninių bandinių masės pokyčiai pastebėti pirmosiomis dienomis, kadangi net 34,0 % visų masės nuostolių įvyko per pirmąsias 3 paras, ir net 81,8 % po 28 parų bandinių kietėjimo. Daroma prielaida jog pirmosiomis dienomis iš betono struktūros pasišalina didžiausias kiekis laisvojo vandens, todėl betoniniuose elementuose susidaro didžiausi masės pokyčiai.

Didžiausias masės pokytis po 90 dienų nustatytas (11) sudėtyje, kurioje buvo naudojamas 3,0 kg/m³ kanapių plaušo, 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA derinys – 1,79 %, tuo tarpu (7) sudėtyje, kurioje buvo naudojama 2,5 % negesintų kalkių, užfiksuotas mažiausias masės pokytis – 1,52 %.

Pastebėjus jog didžioji dalis ilgio ir masės pokyčių susidaro per pirmąsias 28 dienas, nuspręsta sudaryti šių rodiklių priklausomybės grafiką (žr. 44 pav.). Grafike, mažėjimo tvarka, pagal susitraukimų susidarymą po 28 parų, išrikiuotos visos betono mišinių sudėtys.



44 pav. Susitraukimų ir masės pokyčių sąveika po 28 parų

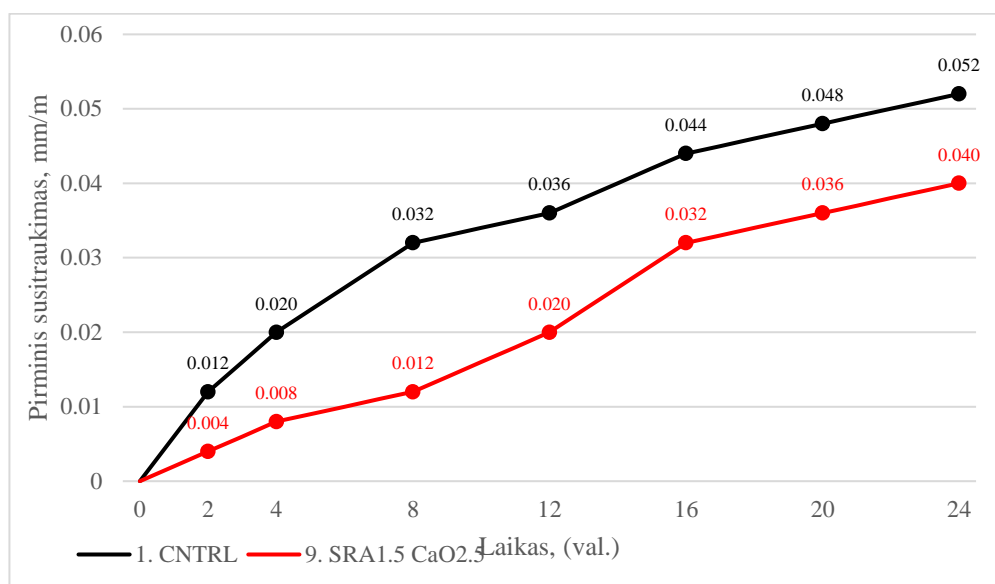
Analizuojant ryšį tarp betone susidariusių susitraukimų ir masės pokyčių, pastebėta jog betonuose mažėjant susitraukimams, tendencingai padidėja masės pokytis. Daroma prielaida, jog kuo labiau yra sumažinami susitraukimai, tuo didesnis masės pokytis gali susidaryti.

Atlikus pirminių susitraukimų matavimus, pagal anksčiau minėtą (2.6) formulę atlikti susitraukimų skaičiavimai, o jų rezultatai pateikti 24 lentelėje.

24 lentelė. Susitraukimų rezultatai po 2, 4, 8, 12, 16, 20 ir 24 val.

Valandos	Sudėties nr. / žymuo			
	1. CNTRL		9. CaO2.5 SRA1.5	
	Band. ilgis, mm	Susitraukimas, ‰	Band. ilgis, mm	Susitraukimas, ‰
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,003	0,012	0,001	0,004
4	0,005	0,020	0,002	0,008
8	0,008	0,032	0,003	0,012
12	0,009	0,036	0,005	0,020
16	0,011	0,044	0,008	0,032
20	0,012	0,048	0,009	0,036
24	0,013	0,052	0,010	0,040

Apskaičiavus susitraukimus po 2, 4, 8, 12, 16, 20 ir 24 val., toliau apskaičiuotos tarpinės susitraukimų reikšmės ir nubraižyta grafinė susitraukimų priklausomybė nuo laiko (žr. 45 pav.).



45 pav. Pirminių susitraukimų išsidėstymas laike per 24 val.

Analizuojant pirminių susitraukimų rezultatus, pastebėta jog bandinio (9), kurio sudėtyje yra 1,5 % SRA ir 2,5 % negesintų kalkių derinys, pirminis susitraukimas (0,040 ‰) yra 23,1 % mažesnis už kontrolinės sudėties (1) pirminį susitraukimą (0,052 ‰).

Pastebėta jog per pirmas 8 val. kontrolinėje sudėtyje (1) įvyko 61,5 % visų per 24 val. susidariusių susitraukimų. Šių staigių susitraukimų priežastis – intensyvi cemento hidratacija. Tuo tarpu bandinio (9), kurio sudėtyje yra 1,5 % SRA ir 2,5 % negesintų kalkių derinys per pirmas 8 val., lyginant su kontroline sudėtimi, susidarė net 62,5 % mažiau susitraukimų. Taip galėjo nutikti, nes ankstyvoje stadijoje įvyksta negesintų kalkių ir vandens reakcija, kurios metu betonai ima plėstis, taip kompensuodamas staiga susidariusias susitraukimų deformacijas.

Pastaba: nereikėtų visiškai pasikliauti nestandartizuotu pirminių susitraukimų bandymu, kadangi jis nėra patikrintas, o jo rezultatai gali neatitikti realių reikšmių. Norint įsitikinti bandymo patikimumu, tos pačios sudėties mišinį reikėtų iširti keletą kartų.

3.4. Gniuždymo stipris

Betono gniuždymo stiprio bandymo metu, standartiniai, kubelio formos betoniniai bandiniai apkrauti didžiausiomis jų suirimui reikalingomis apkrovomis, o gauti rezultatai pateikti 25 lentelėje. Gavus didžiausią ardomąją apkrovą, rezultatų patikrinimui, šie perskaičiuoti pagal anksčiau minėtą (2.8) formulę.

25 lentelė. Gniuždymo stiprio rezultatai po 7 ir 28 parų bandinių kietinimo

Sudėties nr.	Sudėties žymuo	Kietinimo trukmė (paromis)	Bandinio nr.	Bandinio tankis, kg/m ³	Gniuždymo stipris, MPa	Tankio vid., kg/m ³	Gniuždymo stiprio vid., MPa
1	CNTRL	7	I	2374	42,8	2367	42,5
			II	2361	42,1		
		28	III	2375	46,9	2400	45,5
			IV	2424	44,0		
2	POLI3.0	7	I	2372	41,9	2367	41,3
			II	2362	40,7		
		28	III	2360	41,3	2375	45,1
			IV	2390	48,9		
3	CNBS3.0	7	I	2362	38,8	2347	39,9
			II	2331	40,9		
		28	III	2311	39,9	2308	41,9
			IV	2306	43,8		
4	SRA0.5	7	I	2332	37,0	2338	38,2
			II	2345	39,3		
		28	III	2325	44,2	2376	43,1
			IV	2428	41,9		
5	SRA1.5	7	I	2412	36,9	2398	37,3
			II	2384	37,8		
		28	III	2407	42,9	2423	41,9
			IV	2438	41,0		
6	CaO1.5	7	I	2407	40,2	2391	40,6
			II	2374	41,0		
		28	III	2461	38,3	2419	42,7
			IV	2377	47,0		
7	CaO2.5	7	I	2368	40,9	2379	39,6
			II	2390	38,3		
		28	III	2384	40,0	2402	41,8
			IV	2420	43,7		
8	CaO1.5 SRA1.5	7	I	2406	38,5	2412	37,0
			II	2417	35,6		
		28	III	2389	41,3	2399	40,8
			IV	2410	40,4		
9	CaO2.5 SRA1.5	7	I	2331	38,7	2357	36,5
			II	2384	34,3		
		28	III	2377	41,4	2377	39,9
			IV	2377	38,5		
10	POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	7	I	2391	41,2	2417	40,7
			II	2444	40,2		
		28	III	2414	41,3	2407	43,6
			IV	2400	45,9		

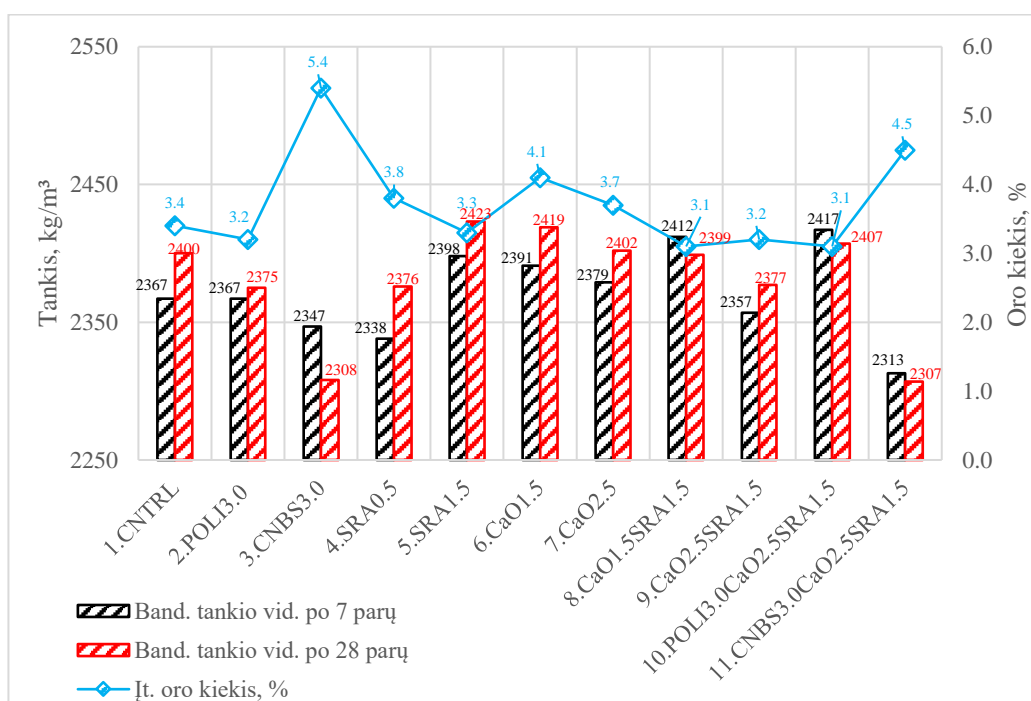
25 lentelės tęsinys. Gniuždymo stiprio rezultatai po 7 ir 28 parų bandinių kietinimo

11	CNBS3.0	7	I	2311	34,4	2313	36,0
			II	2314	37,5		
	CaO2.5	28	III	2316	41,7	2307	37,8
			IV	2297	34,0		

Analizuojant sukietėjusio betono gniuždymo stiprio rezultatus (žr. 25 lentelė), pastebėta jog kontrolinės betono mišinio sudėties (1) gniuždymo stiprio vidurkis viršijo betono mišinio projektavimo stadijoje užsiduotą mažiausią reikalingą gniuždymo stiprį (30 MPa), t. y. pasiekta projektinė C25/30 betono stiprumo klasė. Kontrolinės betono mišinio sudėties gniuždymo stiprio vidurkis, lyginant su projektavimo stadijoje užsiduotu mažiausiu reikiamu gniuždymo stipriu po 7 ir 28 parų viršytas atitinkamai 42,6 % ir 51,7 %.

Analizuojant betoninių bandinių tankius, visose sudėtyse tankių vidurkiai išlieka panašūs. Didžiausias betoninių bandinių tankio vidurkis užfiksuotas betoniniame bandinyje (5), kuriame buvo panaudota SRA įmaiša – 2423 kg/m³, o mažiausias, bandinyje (11), kur panaudotas kanapių plaušo, negesintų kalkių ir SRA derinys – 2307 kg/m³.

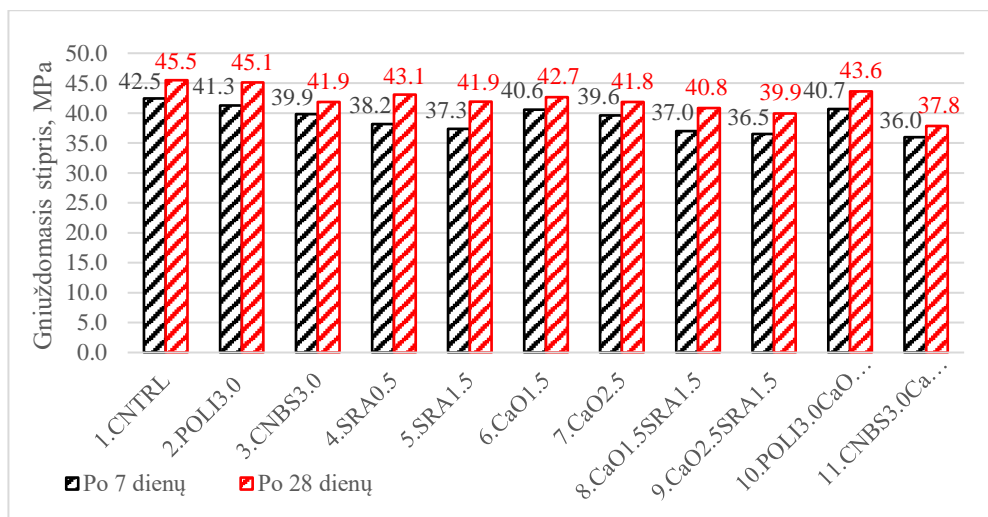
Analizuojant betoninių bandinių tankius pastebėta, kad bandinių, kurių sudėtyje buvo 3,0 kg/m³ pluoštinių kanapių plaušo (3 ir 11 sudėtis), tankiai yra mažesni, todėl sudaryta priklausomybė tarp bandinių tankio ir įtraukto oro kiekio (žr. 46 pav.).



46 pav. Bandinių tankių ir įtraukto oro kiekio sąveika

Daroma prielaida jog kuo betone yra daugiau įtraukto oro, tuo mažesnis susidaro betono bandinio tankis. Taip pat, neatmetama tikimybė jog minimalūs skirtumai tarp bandinių tankių galėjo susidaryti technologiškai, dėl potencialiai ne vienodos tankinimo trukmės.

Analizuojant gniuždymo stiprio rezultatus, pastebėta tendencija jog tiek po 7, tiek po 28 parų bandinių kietinimo, visose sudėtyse (2–11), lyginant su kontroline sudėtimi, atsiranda gniuždymo stiprio sumažėjimas (žr. 47 pav.).



47 pav. Gniuždomo stiprio rezultatai po 7 ir 28 dienų

Betoninis bandinys kuriame buvo naudojamas polipropileno plaušas (2), lyginant su kontroline sudėtimi, gniuždomo stiprį po 7 ir 28 parų sumažino mažiausiai, atitinkamai 2,8 % ir 0,9 %. Tuo tarpu panaudojant pluoštinių kanapių plaušą (3) gniuždomo stipris sumažėjo atitinkamai 6,1 % ir 7,9 %. Daroma prielaida jog norint prarasti mažesnę dalį gniuždomo stiprio, vietoj pluoštinių kanapių plaušo, vertėtų rinktis polipropileno plaušą.

Betoninis bandinys, kuriame buvo naudojamas kanapių plaušo, negesintų kalkių ir SRA derinys (11), lyginant su kontroliniu bandiniu, gniuždomo stiprį po 7 ir 28 parų sumažino labiausiai, atitinkamai 15,3 % ir 16,9 %.

Betoniniuose bandiniuose, kuriuose panaudotas skirtingas kiekis skystojo pavidalo susitraukimą mažinančios įmaišos (4) ir (5), atitinkamai 0,5 % ir 1,5 % nuo cemento masės, pastebėtas neigiamas poveikis gniuždomo stipriui. Panaudojus 0,5 % SRA įmaišos, lyginant su kontroliniu bandiniu, gniuždomo stipris po 7 ir 28 parų sumažėjo atitinkamai 10,1 % ir 5,3 %, tuo tarpu panaudojus 1,5 % SRA įmaišos, pastebėtas 12,2 % ir 7,9 % sumažėjimas. Galima daryti prielaidą jog kuo daugiau SRA įmaišos yra betono mišinio sudėtyje, tuo didesni gniuždomo stiprio nuostoliai susidaro. Ši cheminė įmaiša sulėtina cemento hidratacijos reakcijas, o neintensyvus kalcio hidrosilikatų (C-S-H) formavimasis tampa gniuždomo stiprio sumažėjimo priežastimi.

Panaši gniuždomo stiprio sumažėjimo tendencija, lyginant su kontroliniu bandiniu, matoma ir bandiniuose, kuriuose panaudotas skirtingas kiekis negesintų kalkių (6) ir (7). Panaudojus 1,5 % negesintų kalkių nuo cemento masės, lyginant su kontroliniu bandiniu, gniuždomo stipris po 7 ir 28 parų sumažėjo atitinkamai 4,5 % ir 6,2 %, o panaudojus 2,5 % negesintų kalkių, pastebėtas 6,8 % ir 8,1 % stiprio sumažėjimas. Daroma prielaida jog mažas kiekis negesintų kalkių nesukelia milžiniškų gniuždomo stiprio nuostolių, tačiau sudozavus per didelį kiekį (daugiau nei 2,5 % nuo cemento masės) galima tikėtis ganėtinai ryškaus gniuždomo stiprio sumažėjimo.

Betoniniuose bandiniuose su negesintų kalkių ir SRA deriniais (8) ir (9) matomas dar didesnis gniuždomo stiprio sumažėjimas. Panaudojus 1,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA (8) lyginant su kontroliniu bandiniu, gniuždomo stipris po 7 ir 28 parų sumažėjo atitinkamai 12,9 % ir 10,3 %. Panaudojus 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA, išryškėja 14,1 % ir 12,3 % stiprio sumažėjimas. Daroma prielaida, kad SRA ir negesintos kalkės veikdamos kartu gali sukelti dar didesnę neigiamą poveikį betono gniuždomo stipriui nei veikdamos atskirai.

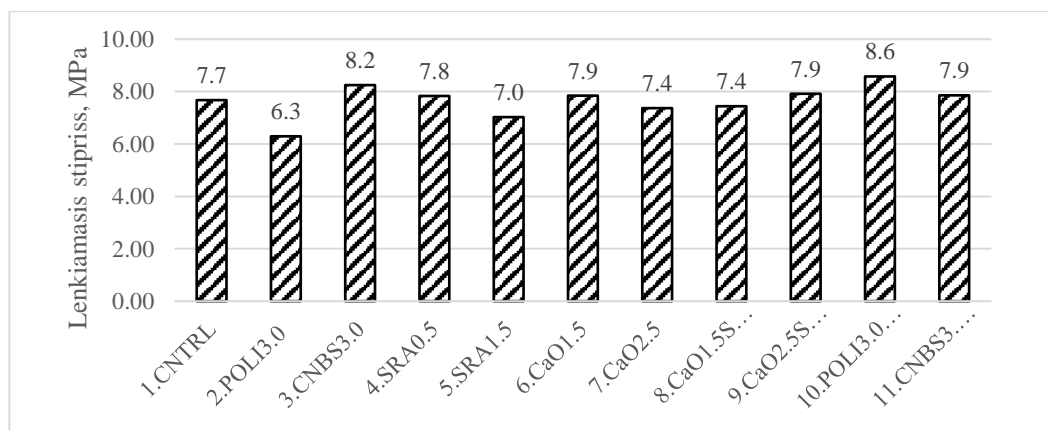
3.5. Lenkimo stipris

Lenkimo stiprio bandymo metu prizmės formos betoniniai bandiniai apkrauti didžiausiomis jų suirimui reikalingomis apkrovomis. Gavus lenkimo bandymo duomenis pagal anksčiau minėtas (2.9–2.12) formules apskaičiuojami lenkimo bandymo parametrai, o jų rezultatai pateikti 26 lentelėje.

26 lentelė. Lenkimo stiprio rezultatai po 90 dienų bandinių kietinimo

Sudėties nr.	Sudėties žymuo	Band. nr.	Lenkimo stipris, MPa	Lenkimo stiprio vid., MPa	Plotas (Darbas), Nm	Suirimo energija, N/m	Liekamasis stipris, kai plyšio plotis 0,5 mm, MPa	Liekamasis stipris, kai plyšio plotis 3,5 mm, MPa
1	CNTRL	1.1	8,1	7,7	1,19	132	0	0
		1.2	7,3		1,49	166	0	0
2	POLI3.0	2.1	6,0	6,3	6,67	741	1,64	1,36
		2.2	6,6		5,81	646	1,55	1,32
3	CNBS3.0	3.1	7,4	8,2	1,99	221	0,36	0
		3.2	9,1		1,83	203	0,07	0
4	SRA0.5	4.1	7,4	7,8	1,15	128	0	0
		4.2	8,3		1,40	156	0	0
5	SRA1.5	5.1	7,5	7,0	1,18	131	0	0
		5.2	6,6		1,12	124	0,05	0
6	CaO1.5	6.1	7,3	7,9	1,20	133	0	0
		6.2	8,4		1,72	191	0,17	0
7	CaO2.5	7.1	6,9	7,4	1,22	136	0,15	0
		7.2	7,9		1,25	139	0,16	0
8	CaO1.5 SRA1.5	8.1	6,8	7,4	1,03	114	0,04	0
		8.2	8,1		1,66	184	0,11	0
9	CaO2.5 SRA1.5	9.1	6,7	7,9	0,76	84	0	0
		9.2	9,1		1,61	179	0,08	0
10	POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	10.1	8,5	8,6	9,45	1050	2,27	2,10
		10.2	8,7		7,84	871	1,73	1,73
11	CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5	11.1	8,7	7,9	1,26	140	0,04	0
		11.2	7,0		1,52	169	0,21	0

Analizuojant lenkimo stiprio rezultatus, pastebėta jog, beveik visose sudėtyse (išskyrus 2, 5, 7 ir 8), lyginant su kontroline sudėtimi, atsiranda lenkimo stiprio padidėjimas (žr. 48 pav.).



48 pav. Lenkimo stiprio rezultatai po 90 dienų

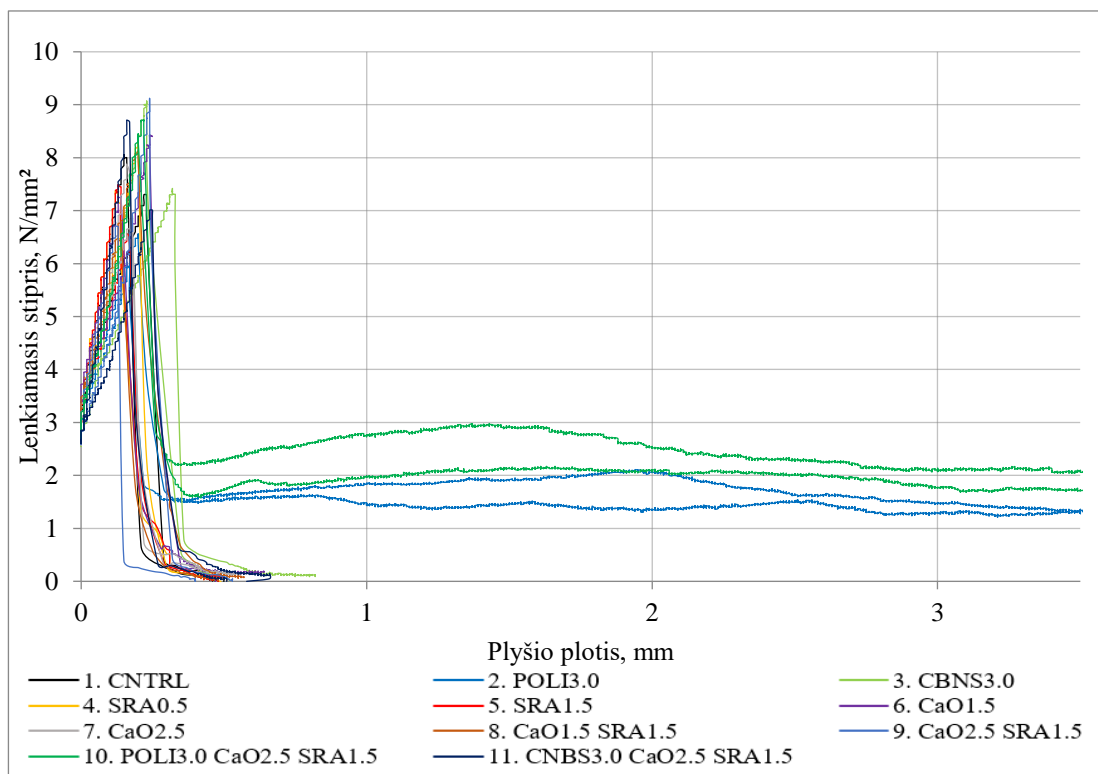
Analizuojant rezultatus, pastebėta jog kontrolinės betono mišinio sudėties (1) lenkimo stiprio vidurkis (7,7 MPa) pasiekė 16,9 % gniuždymo stiprio po 28 parų (45,5 MPa) vertės.

Betoniniuose bandiniuose, kuriuose panaudotas polipropileno plaušas (2) ir (10) gauti prieštaringi rezultatai. Bandiniuose, kuriuose buvo naudojamas $3,0 \text{ kg/m}^3$ polipropileno plaušo, 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA derinys (10) pasieki geriausi rezultatai, lyginant su kontroline sudėtimi, užfiksuotas 11,7 % lenkimo stiprio prieaugis. Tuo tarpu bandiniuose, kuriuose buvo naudojama $3,0 \text{ kg/m}^3$ polipropileno plaušo be kitų įmaišų (2), pasieki blogiausi rezultatai, užfiksuotas 18,1 % lenkimo stiprio nuosmukis. Betono sudėčių projektavimo stadijoje tikėtasi išvysti lenkimo stiprio prieaugį abiejose sudėtyse, tačiau tikėtina jog dėl nepalankiai išsidėsčiusių plaušelių šio prieaugio išgauti nepavyko.

Pluoštinių kanapių plaušo panaudojimas betone, lenkimo stiprio rezultatus paveikė teigiamai. Betoniniuose bandiniuose, kuriuose panaudota $3,0 \text{ kg/m}^3$ pluoštinių kanapių plaušo (3), lyginant su kontroline sudėtimi, užfiksuotas 6,5 % lenkimo stiprio prieaugis.

Betoniniuose bandiniuose, kuriuose panaudota 0,5 % skystojo pavidalo susitraukimą mažinančios įmaišos (4), lyginant su kontroline sudėtimi, pastebėtas 1,1 % lenkimo stiprio prieaugis. Panaudojus 1,5 % šios įmaišos (5), pastebėtas 9,1 % lenkimo stiprio sumažėjimas. Daroma prielaida jog nedidelis SRA kiekis ($\leq 0,5 \%$ nuo cemento masės) gali minimaliai pagerinti, o didesnis kiekis ($\geq 1,5 \%$) potencialiai gali pabloginti lenkimo stiprio rezultatus. Tokia pati tendencija pastebėta naudojant negesintas kalkes. Naudojant 1,5 % kalkių, pastebėtas – 2,6 % lenkimo stiprio prieaugis, o panaudojus 2,5% kalkių – 3,9 % nuosmukis.

Lenkimo stiprio bandymo metu, specialios įrangos pagalba, buvo užfiksuoti išsamūs duomenys, kurių dėka nubraižyta lenkimo stiprio ir plyšio pločio priklausomybė (žr. 49 pav.).



49 pav. Lenkimo stiprio ir plyšio pločio priklausomybė

Analizuojant lenkimo stiprio ir plyšio pločio priklausomybę (žr. 49 pav.) visose sudėtyse, išskyrus (2) ir (10), nepasireiškia betono liekamasis lenkimo stipris (žr. 26 lentelė), o dėl šios priežasties bandiniai, apkrauti didele lenkimo apkrova yra linkę patirti staigų suirimą.

Liekamasis lenkimo stipris pasireiškė betoniniuose bandiniuose, kurių sudėtyje yra $3,0 \text{ kg/m}^3$ polipropileno plaušo. Didžiausias liekamasis lenkimo stipris užfiksuotas bandinyje, kurio sudėtyje buvo $3,0 \text{ kg/m}^3$ polipropileno plaušo, 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA (10). Bandiniui pasiekus didžiausią lenkimo apkrovą (8,5 MPa) susidarė 0,2 mm plyšys ir bandinys suiro, tačiau nepatyrė staigaus suirimo ir toliau atlaikė lenkimo apkrovą. Bandinyje susidarius 0,5 mm plyšiui, jis vis dar atlaikė 26,7 % didžiausios lenkimo apkrovos, o susidarius 3,5 mm plyšiui – 27,2 %.

Šis reiškinys paaiškinamas taip, jog bandiniui nebesugebant atlaikyti didelės lenkimo apkrovos – atsiveria plyšys. Toliau veikiant apkrovai plyšio plotis po truputį didėja, tačiau atsiveriant vis didesniame plyšiui, betono struktūroje išsidėstę polipropileno plaušeliai įsijungia į darbą ir neleidžia bandiniui visiškai susilenkti. Taigi, dėl šios priežasties bandiniai su polipropileno plaušu pasižymi liekamuoju lenkimo stipriu ir didele suirimo energija. Polipropileno plaušas yra puikus pasirinkimas norint apsaugoti betoną nuo staigaus suirimo. Šis plaušas tolygiai pasiskirsto betone, taip sudarydamas savotišką 3D tinklą, todėl pasižymi puikiomis betono armavimo savybėmis, kurios padeda perimti betone susidariusius tempimo įtempius.

Bandiniuose, kurių sudėtyje buvo $3,0 \text{ kg/m}^3$ pluoštinių kanapių plaušo, pastebėtas staigus bandinių suirimas. Bandiniai nepasižymėjo liekamuoju lenkimo stipriu, tinkamai nearmavo betono, o suirimo energija – minimali.

Daroma prielaida jog norint išvengti staigaus betono suirimo, vietoj pluoštinių kanapių plaušo, vertėtų rinktis polipropileno plaušą, kadangi šis plaušas puikiai perima tempimo įtempius ir pasižymi didele suirimo energija.

3.6. Atsparumas šalčiui

Tūrinio užšaldymo ir atšildymo metu, šaldymo kameroje kubeliai buvo laikomi 34 paras per kurias įvyko 100 šalčio ciklą (F100), o tai yra XF1 atsparumo šalčiui klasė. Apžiūrėjus šalčio paveiktus bandinius (žr. 50 – 60 pav.), pastebėta tendencija jog bandiniai, kurių sudėtyje buvo 1,5 % nuo cemento masės SRA, supleišėjo (žr. 59 ir 60 pav.) arba visiškai suiro (žr. 54, 57 ir 58 pav.). Didelis kiekis SRA neleidžia laisvam vandeniui pasišalinti iš betono, todėl įvykus šalčio ciklui, betono kapiliaruose esantis laisvas vanduo užšąla ir po truputį ardo bandinio struktūrą, bei silpnina jo mechanines savybes.



a) prieš bandymą

b) po bandymo

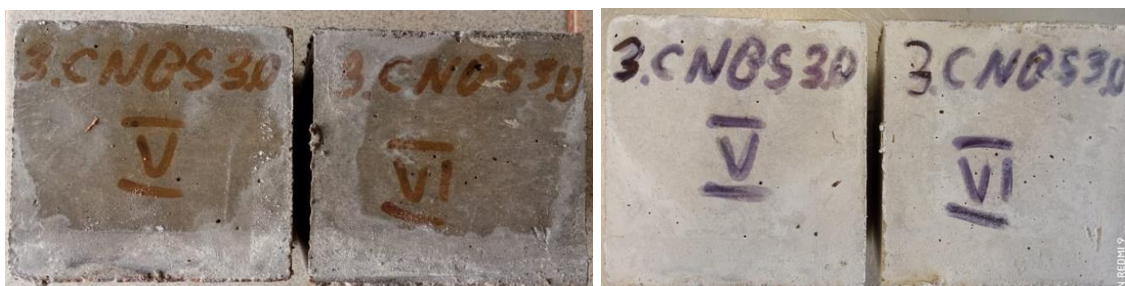
50 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.1 (CNTRL)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

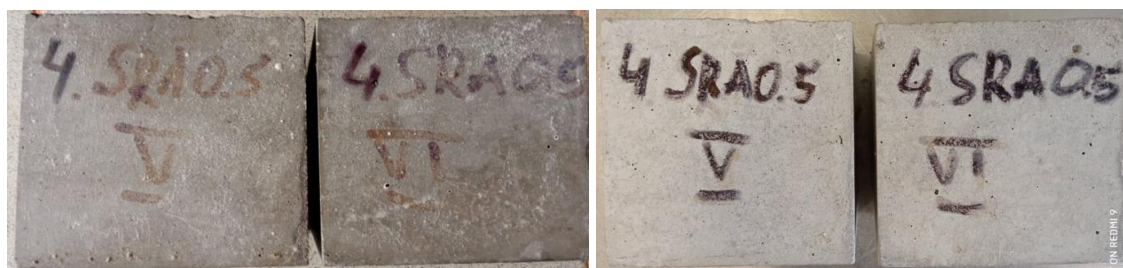
51 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.2 (POLI3.0)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

52 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.3 (CNBS3.0)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

53 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.4 (SRA0.5)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

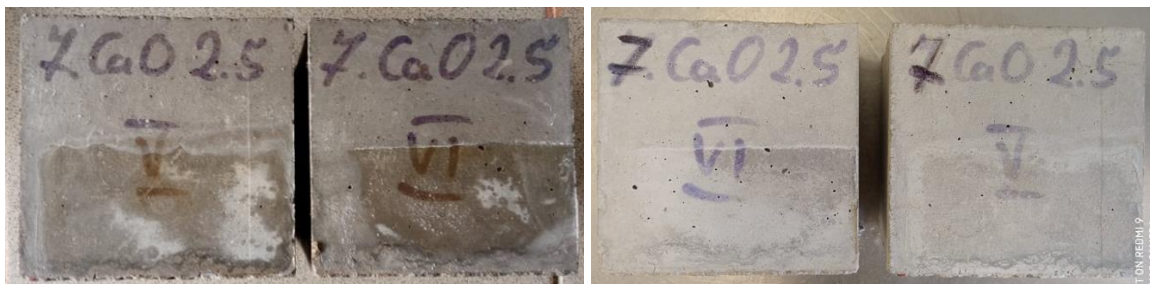
54 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.5 (SRA1.5)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

55 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.6 (CaO1.5)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

56 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.7 (CaO2.5)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

57 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.8 (CaO1.5SRA1.5)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

58 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.9 (CaO2.5SRA1.5)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

59 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.10 (POLI3.0CaO2.5SRA1.5)



a) prieš bandymą

b) po bandymo

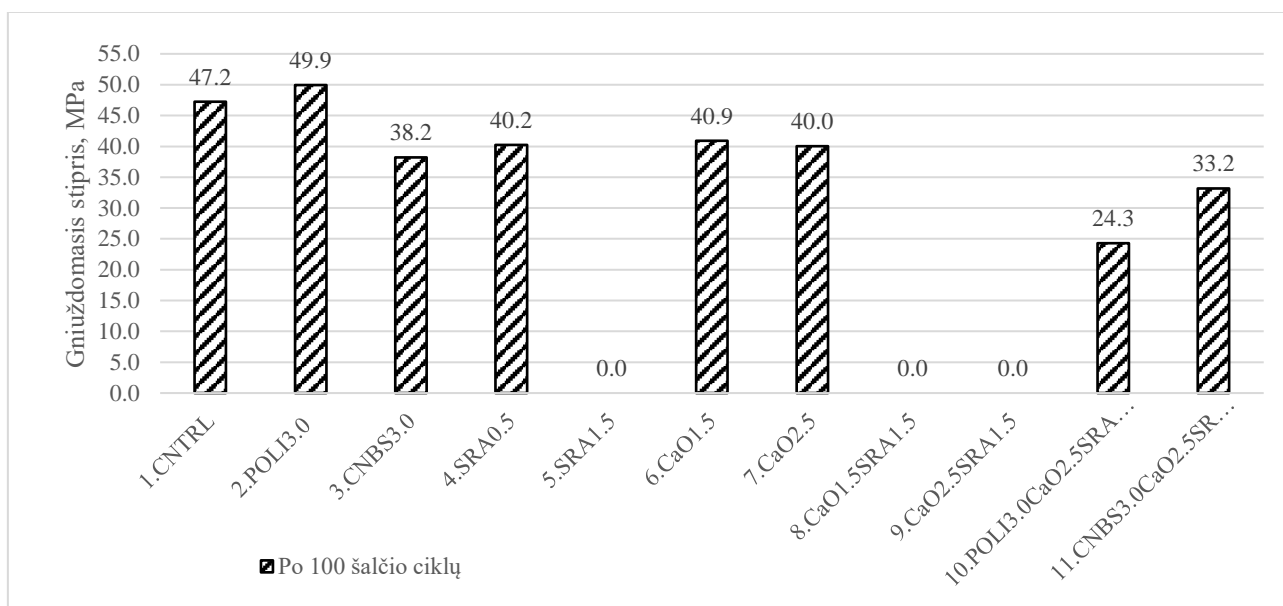
60 pav. Atsparumas šalčiui: sudėtis nr.11 (CNBS3.0CaO2.5SRA1.5)

Betoniniams bandiniams, kurie nesuiro po 100 šalčio ciklų, vėliau buvo atliktas gniuždymo stiprio nustatymo bandymas (žr. 27 lentelė). Gniuždymo stiprio bandymas neatliktas (5), (8) ir (9) sudėtimis ir priimama jog šių sudėčių bandiniai prarado 100 % projektinio stiprio.

27 lentelė. Gniuždymo stiprio rezultatai po 100 šalčio ciklų

Sudėties nr.	Sudėties žymuo	Band. nr.	Bandinio tankis, kg/m ³	Gniuždymo stipris, MPa	Tankio vid., kg/m ³	Gniuždymo stiprio vid., MPa
1	CNTRL	V	2329	51,4	2316	47,2
		VI	2302	43,0		
2	POLI3.0	V	2358	49,4	2335	49,9
		VI	2352	50,4		
3	CNBS3.0	V	2320,4	43,9	2305	38,2
		VI	2289	32,5		
4	SRA0.5	V	2354	39,9	2352	40,2
		VI	2351	40,6		
5	SRA1.5	V	bandiniai neatlaikė F100			0
		VI				
6	CaO1.5	V	2395	42,0	2374	40,9
		VI	2352	39,8		
7	CaO2.5	V	2409	38,0	2386	40,0
		VI	2364	42,0		
8	CaO1.5 SRA1.5	V	bandiniai neatlaikė F100			0
		VI				
9	CaO2.5 SRA1.5	V	bandiniai neatlaikė F100			0
		VI				
10	POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	V	2204	21,7	2242	24,3
		VI	2279	26,9		
11	CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5	V	2336	20,4	2341	33,2
		VI	2347	46,0		

Analizuojant gniuždymo stiprio rezultatus po 100 šalčio ciklų, pastebėta jog devyniose iš vienuolikos sudėčių, lyginant su rezultatais po 28 parų kietinimo, atsiranda gniuždymo stiprio sumažėjimas (žr. 61 pav.).



61 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai po 100 šalčio ciklų

Betoniniai bandiniai kuriuose buvo naudojami skirtingi kiekiai negesintų kalkių: 1,5 % (6) ir 2,5 % (7) nuo cemento masės, lyginant su rezultatais po 28 parų kietinimo, gniuždymo stiprį po 100 šalčio ciklų sumažino mažiausiai, atitinkamai 4,2 % ir 4,3 %. Betoninis bandinys, kuriame buvo naudojamas pluoštinių kanapių plaušas (3), gniuždymo stiprį sumažino 8,8 %, o bandinys su 0,5 % SRA nuo cemento masės (4), gniuždymo stiprį po 100 šalčio ciklų sumažino 6,7 %. Tuo tarpu bandinys, kurio sudėtyje buvo pluoštinių kanapių plaušo, negesintų kalkių ir SRA (11), prarado 12,2 % stiprio.

Ryškiausias po 100 šalčio ciklų nesuirusio bandinio gniuždymo stiprio sumažėjimas pastebėtas (10) sudėtyje. Betoninis bandinys (10) sudarytas iš 3,0 % polipropileno plaušo, 2,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA prarado 44,3 % gniuždymo stiprio lyginant su stipriu po 28 parų.

Kontrolinis bandinys be papildomų įmaišų (1), padidino gniuždymo stiprį 3,7 %, lyginant su stipriu po 28 parų kietinimo. Teigiamą įtaką gniuždymo stipriui po 100 šalčio ciklų, užfiksuota ir betone su polipropileno plaušu (2), pastebėtas 10,6 % stiprio prieaugis.

Išanalizavus visus gniuždymo stiprio rezultatus po 100 šalčio ciklų, daroma prielaida jog betono mišinyje naudojant 1,5 % arba daugiau skystojo pavidalo susitraukimą mažinančios cheminės įmaišos betonas tampa neatsparus šalčiui, o paveiktas šalčio praranda didelę dalį gniuždymo stiprumo.

3.7. Vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas

Betono vandens įgeriamumo kinetikos nustatymui, preciziškai tiksliai atlikti betoninių bandinių masių svėrimai, o jų reikšmės pateiktos 28 lentelėje.

28 lentelė. Betoninių bandinių masių reikšmės, poringumo parametrų nustatyti

Sud. nr.	Sudėties žymuo	Band. nr.	Bandinio masė, g					Vandenyje
			Sauso	Įmirkius 15min	Įmirkius 1h	Įmirkius 24h	Įmirkius 48h	
1	CNTRL	1.1	617,31	630,50	638,85	645,35	645,94	375,87
		1.2	555,33	569,47	577,40	582,94	583,46	337,83
		1.3	546,99	559,80	567,20	571,90	572,44	333,08
		1.4	534,28	547,33	555,01	560,01	560,45	324,61
2	POLI3.0	2.1	713,01	731,86	742,45	750,86	751,58	435,48
		2.2	466,44	480,75	487,96	490,98	491,97	285,45
		2.3	648,80	668,70	678,16	684,22	684,74	395,87
		2.4	567,73	582,75	590,86	596,34	596,70	346,87
3	CNBS3.0	3.1	717,80	736,01	746,46	758,64	759,55	431,30
		3.2	552,86	568,29	576,87	583,97	584,42	333,97
		3.3	721,39	740,50	751,76	764,73	765,23	432,10
		3.4	571,63	588,57	598,00	604,11	604,68	343,70
4	SRA0.5	4.1	698,82	720,04	729,71	737,14	738,39	428,92
		4.2	553,54	569,97	577,49	583,54	583,89	339,99
		4.3	472,02	485,94	493,38	497,39	497,90	289,86
		4.4	643,75	662,45	671,79	678,99	679,51	394,14
5	SRA1.5	5.1	522,70	538,64	546,48	551,70	552,39	323,16
		5.2	603,58	620,19	628,63	635,58	636,31	373,22
		5.3	612,61	629,13	637,63	645,03	645,66	378,04
		5.4	591,61	608,41	617,55	624,81	625,50	364,76
6	CaO1.5	6.1	486,55	500,85	507,94	511,15	511,37	296,50
		6.2	604,01	619,28	627,24	632,05	632,47	368,21
		6.3	438,30	452,29	458,84	460,75	461,16	268,70
		6.4	578,51	593,96	602,30	606,90	607,28	354,45
7	CaO2.5	7.1	577,79	592,52	600,80	605,45	605,97	354,42
		7.2	725,96	741,68	751,52	759,44	759,74	443,76
		7.3	610,86	624,83	632,85	638,14	638,58	373,48
		7.4	696,64	710,37	717,97	723,86	724,30	424,92
8	CaO1.5 SRA1.5	8.1	739,14	753,55	762,61	773,19	773,95	454,51
		8.2	485,97	497,69	504,64	509,84	510,19	299,98
		8.3	686,14	701,69	710,11	718,67	719,30	422,45
		8.4	546,92	558,58	565,22	571,00	571,41	337,56
9	CaO2.5 SRA1.5	9.1	591,01	606,59	615,31	623,21	623,68	364,90
		9.2	545,65	560,65	568,04	573,90	574,26	337,38
		9.3	634,49	650,24	660,14	668,58	669,41	390,32
		9.4	585,00	599,04	606,97	614,36	614,95	360,27
10	POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	10.1	594,38	611,85	620,26	626,90	627,95	364,67
		10.2	663,97	679,52	688,53	698,98	699,99	406,53
		10.3	548,76	563,31	570,32	577,36	577,94	336,72
		10.4	646,02	661,63	669,21	678,07	678,90	395,92
11	CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5	11.1	512,65	524,61	532,24	539,15	539,71	310,62
		11.2	691,98	705,64	714,78	728,51	729,30	419,68
		11.3	478,60	490,83	498,45	505,35	506,02	291,13
		11.4	727,31	742,28	752,25	765,67	766,33	442,10

Pasvėrus betoninius bandinius, pagal anksčiau minėtas (2.10–2.16) formules atlikti betono poringumo parametrų skaičiavimai, o jų rezultatai pateikti 29 lentelėje.

29 lentelė. Betono poringumo parametrų rezultatai pagal vandens įgeriamumo kinetiką

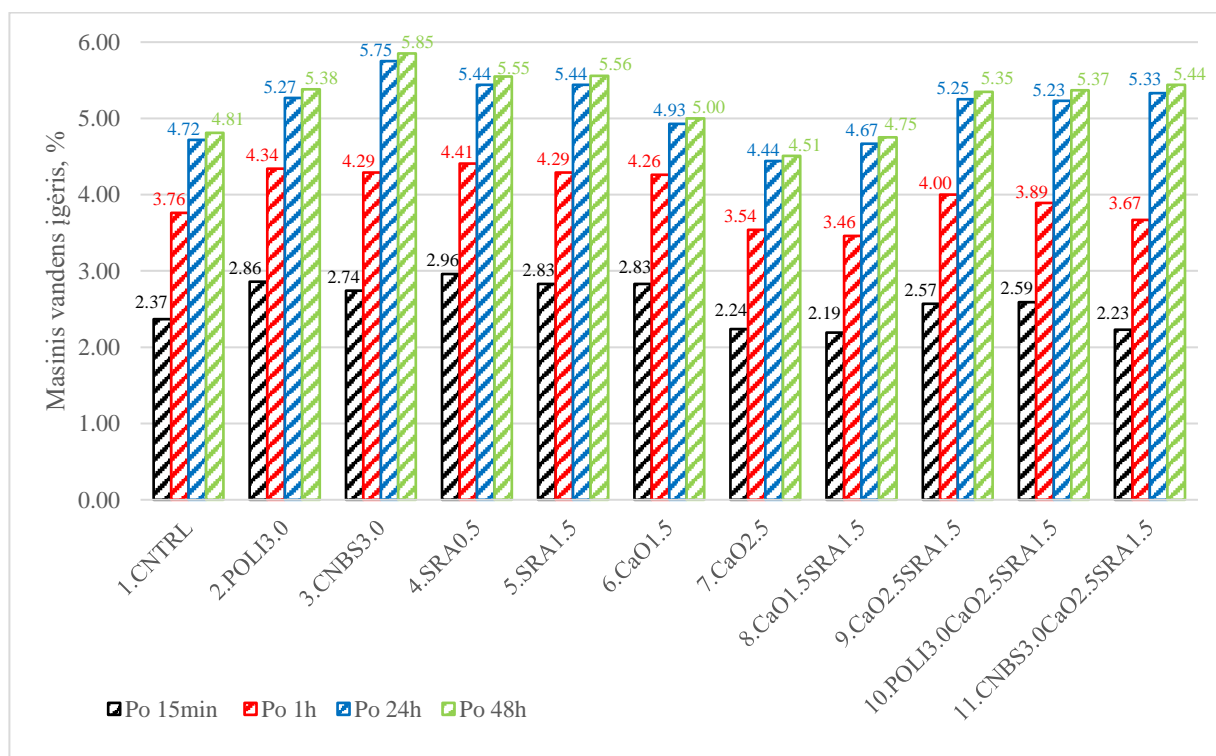
Sud. nr.	Sudėties žymuo	Band. nr.	Masinis vandens įgėris, %				Sauso bandinio tankis kg/m ³	Bendras poringumas, %	Atviras poringumas, %	Uždaras poringumas, %	Atsparumo šalčiui kriterijus	Prognuojami atsparumo šalčiui ciklai
			Po 15min	Po 1h	Po 24h	Po 48h						
1	CNTRL	1.1	2,14	3,49	4,54	4,54	2286	15,03	10,60	4,43	1,14	112,15
		1.2	2,55	3,97	4,97	4,97	2261	15,95	11,45	4,50	1,17	119,09
		1.3	2,34	3,69	4,55	4,55	2285	15,05	10,63	4,42	1,20	128,16
		1.4	2,44	3,88	4,82	4,82	2265	15,78	11,10	4,69	1,19	125,40
Vidurkiai			2,37	3,76	4,72	4,81	2274	15,45	10,95	4,51	1,18	121,20
2	POLI3.0	2.1	2,64	4,13	5,31	5,41	2256	16,15	12,20	3,95	1,29	149,89
		2.2	3,07	4,61	5,26	5,47	2259	16,04	12,36	3,68	1,20	128,27
		2.3	3,07	4,53	5,46	5,54	2246	16,51	12,44	4,06	1,33	158,79
		2.4	2,65	4,07	5,04	5,10	2272	15,52	11,60	3,93	1,26	142,43
Vidurkiai			2,86	4,34	5,27	5,38	2258	16,05	12,15	3,90	1,27	144,84
3	CNBS3.0	3.1	2,54	3,99	5,69	5,82	2187	18,71	12,72	5,99	1,13	110,07
		3.2	2,79	4,34	5,63	5,71	2207	17,94	12,60	5,34	1,11	103,25
		3.3	2,65	4,21	6,01	6,08	2165	19,50	13,16	6,34	1,11	104,79
		3.4	2,96	4,61	5,68	5,78	2190	18,58	12,66	5,91	1,14	111,26
Vidurkiai			2,74	4,29	5,75	5,85	2188	18,68	12,79	5,89	1,12	107,34
4	SRA0.5	4.1	3,04	4,42	5,48	5,66	2258	16,06	12,79	3,27	1,14	112,18
		4.2	2,97	4,33	5,42	5,48	2270	15,63	12,44	3,19	1,15	113,53
		4.3	2,95	4,53	5,37	5,48	2269	15,65	12,44	3,21	1,17	120,01
		4.4	2,90	4,36	5,47	5,55	2256	16,14	12,53	3,61	1,10	101,70
Vidurkiai			2,96	4,41	5,44	5,55	2260	15,87	12,55	3,32	1,14	111,83
5	SRA1.5	5.1	3,05	4,55	5,55	5,68	2280	15,23	12,95	2,28	0,96	63,67
		5.2	2,75	4,15	5,30	5,42	2294	14,71	12,44	2,27	1,03	83,55
		5.3	2,70	4,08	5,29	5,39	2289	14,90	12,35	2,55	1,04	85,44
		5.4	2,84	4,38	5,61	5,73	2269	15,65	13,00	2,65	0,97	67,09
Vidurkiai			2,83	4,29	5,44	5,56	2283	15,13	12,68	2,44	1,00	74,94
6	CaO1.5	6.1	2,94	4,40	5,06	5,10	2264	15,82	11,55	4,27	1,11	103,86
		6.2	2,53	3,85	4,64	4,71	2286	15,03	10,77	4,26	1,20	126,31
		6.3	3,19	4,69	5,12	5,22	2277	15,34	11,88	3,46	1,09	98,85
		6.4	2,67	4,11	4,91	4,97	2288	14,94	11,38	3,56	1,18	121,20
Vidurkiai			2,83	4,26	4,93	5,00	2279	15,28	11,39	3,89	1,14	112,56
7	CaO2.5	7.1	2,55	3,98	4,79	4,88	2297	14,61	11,20	3,41	1,08	97,20
		7.2	2,17	3,52	4,61	4,65	2297	14,59	10,69	3,90	1,15	115,75
		7.3	2,29	3,60	4,47	4,54	2304	14,34	10,46	3,88	1,13	108,59
		7.4	1,97	3,06	3,91	3,97	2327	13,50	9,24	4,26	1,17	119,71
Vidurkiai			2,24	3,54	4,44	4,51	2306	14,26	10,40	3,86	1,13	110,31
8	CaO1.5 SRA1.5	8.1	1,95	3,18	4,61	4,71	2314	13,98	10,90	3,09	1,05	87,74
		8.2	2,41	3,84	4,91	4,98	2312	14,06	11,52	2,54	0,95	60,86
		8.3	2,27	3,49	4,74	4,83	2311	14,07	11,17	2,90	1,09	98,72
		8.4	2,13	3,35	4,40	4,48	2339	13,06	10,47	2,58	0,97	67,95
Vidurkiai			2,19	3,46	4,67	4,75	2319	13,79	11,02	2,78	1,01	78,82
9	CaO2.5 SRA1.5	9.1	2,64	4,11	5,45	5,53	2284	15,10	12,62	2,47	1,03	82,90
		9.2	2,75	4,10	5,18	5,24	2303	14,37	12,08	2,29	0,96	63,92

29 lentelės tęsinys. Betono poringumo parametrų rezultatai pagal vandens įgeriamumo kinetiką

		9.3	2,48	4,04	5,37	5,50	2273	15,49	12,51	2,97	0,94	59,47
		9.4	2,40	3,76	5,02	5,12	2297	14,61	11,76	2,85	1,09	99,88
Vidurkiaiai			2,57	4,00	5,25	5,35	2289	14,89	12,24	2,65	1,00	76,54
10	POLI3.0 CaO2.5 SRA1.5	10.1	2,94	4,35	5,47	5,65	2258	16,07	12,75	3,32	1,00	74,48
		10.2	2,34	3,70	5,27	5,42	2263	15,89	12,27	3,62	1,12	107,77
		10.3	2,65	3,93	5,21	5,32	2275	15,43	12,10	3,33	0,98	70,46
		10.4	2,42	3,59	4,96	5,09	2283	15,13	11,62	3,51	1,16	117,23
Vidurkiaiai			2,59	3,89	5,23	5,37	2270	15,63	12,19	3,45	1,06	92,49
11	CNBS3.0 CaO2.5 SRA1.5	11.1	2,33	3,82	5,17	5,28	2238	16,81	11,81	5,00	1,07	94,79
		11.2	1,97	3,29	5,28	5,39	2235	16,92	12,05	4,86	1,08	97,45
		11.3	2,56	4,15	5,59	5,73	2227	17,20	12,76	4,44	1,07	94,14
		11.4	2,06	3,43	5,27	5,36	2243	16,61	12,03	4,58	1,02	81,91
Vidurkiaiai			2,23	3,67	5,33	5,44	2236	16,89	12,17	4,72	1,06	92,07

Analizuojant sausų bandinių tankių rezultatus neįžvelgta rezultatų išsibarstymų, kadangi visų bandinių tankiai gauti labai panašūs. Didžiausias sauso bandinio tankio vidurkis užfiksuotas betone (8), kurio sudėtyje buvo naudojamas 1,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA derinys – 2319 kg/m³. Mažiausias tankio vidurkis pastebėtas betone (3), kurio sudėtyje buvo naudojamas pluoštinių kanapių plaušas – 2188 kg/m³.

Analizuojant masinio vandens įrėgio rezultatus, pastebėta jog visose sudėtyse (išskyrus 7 ir 8), lyginant su kontroline sudėtimi, atsiranda masinio įrėgio prieaugis (žr. 62 pav.). Masinis vandens įrėgis po 48 val. nė vienoje sudėtyje neviršijo 6 %.



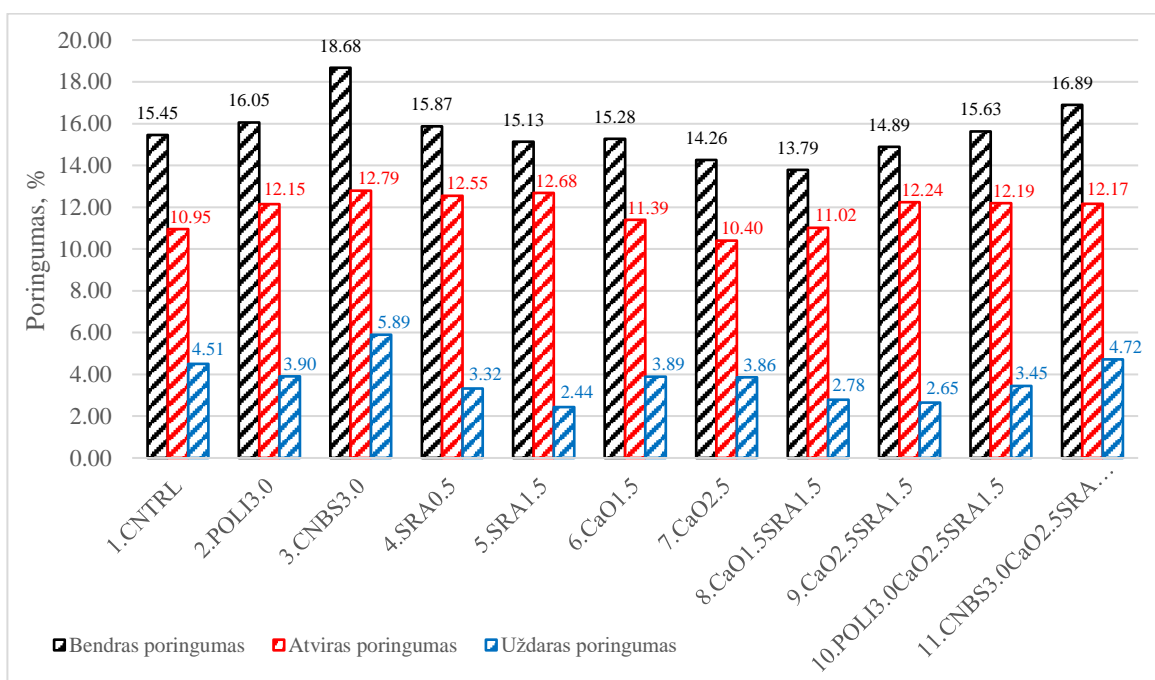
62 pav. Masinio vandens įrėgio rezultatai

Kontrolinės sudėties (1) betoniniai bandiniai per 48 val. vidutiniškai įgėrė 4,81 % vandens, iš kurių 49,3% per pirmąsias 15 min. ir net 78,2 % per pirmąją 1 val. Labiausiai vandenį per 48 val. įgėrė betoniniai bandiniai (3), kurių sudėtyje buvo 3,0 kg/m³ pluoštinių kanapių plaušo, vidutiniškai

5,85 %, o tai yra 21,6 % daugiau, lyginant su kontrolinės sudėties bandiniais. Mažiausiai vandenį po 48 val. įgėrė betoniniai bandiniai (7), kurių sudėtyje buvo 2,5 % negesintų kalkių, vidutiniškai 4,51 %, o tai yra 6,2 % mažiau, lyginant su kontrolinės sudėties bandiniais.

Analizuojant ryšį tarp bandinių tankių ir masinio vandens įgėrio, pastebėta jog tose betono sudėtyse, kuriose vyrauja didžiausi tankiai (7) ir (8), atitinkamai vyrauja mažiausias masinis įgėris po 48 val. Daroma prielaida, kad kuo betoninių bandinių tankis yra mažesnis, tuo betonui yra lengviau įgerti vandenį, taigi norint sumažinti vandens įgeriamumą privalu padidinti betono tankį arba uždara poringumą.

Analizuojant betoninių bandinių poringumą, pastebėta jog bendras betono poringumas nė vienoje sudėtyje neviršijo 19 % (žr. 63 pav.).



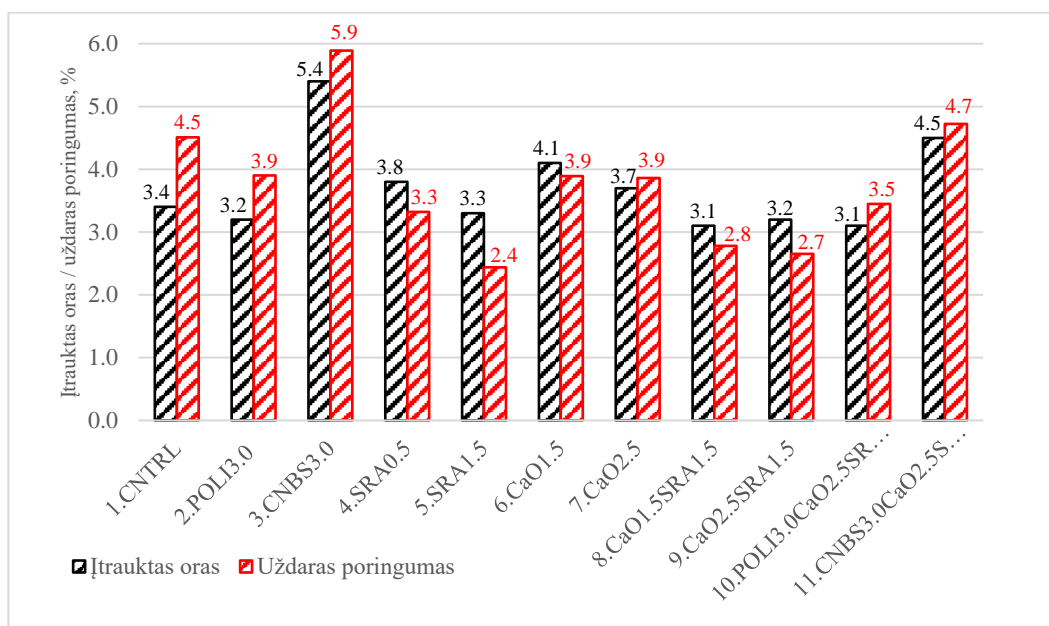
63 pav. Betoninių bandinių poringumas

Kontrolinės sudėties (1) betoninių bandinių bendras poringumas – 15,45 % iš kurių 70,9 % sudaro atviras (kapiliarinis) poringumas, o 29,1 % sudaro uždaras poringumas.

Betone (3), kurio sudėtyje buvo naudojama 3,0 kg/m³ pluoštinių kanapių plaušo įmaiša, užfiksuotas įdomus reiškinys. Šios sudėties betone visi poringumai susidarė didžiausi: bendras – 18,68 %, atviras – 12,79 %, uždaras – 5,89 %. Lyginant su kontroline sudėtimi, matomi poringumų prieaugiai: bendras – 20,9 %, atviras – 16,8 %, uždaras – 30,6 %. Galime daryti prielaidą jog pluoštinių kanapių plaušas yra linkęs įgerti vandenį, todėl susidaro dideli poringumai.

Mažiausias bendras poringumas – 13,79 % aptiktas betone (8), kurio sudėtyje buvo naudojamas 1,5 % negesintų kalkių ir 1,5 % SRA įmaišų derinys. Lyginant su kontroline sudėtimi, bendras poringumas sumažėjo 10,7 %. Mažiausias atviras (kapiliarinis) poringumas – 10,40 % aptiktas betone (7), kurio sudėtyje buvo naudojama 2,5 % negesintų kalkių įmaišos. Lyginant su kontroline sudėtimi, kapiliarinis poringumas sumažėjo 5,0 %. Mažiausias uždaras poringumas – 2,44 % aptiktas betone (5), kurio sudėtyje buvo naudojama 1,5 % SRA cheminės įmaišos. Lyginant su kontroline sudėtimi, uždaras poringumas sumažėjo 45,9 %.

Analizuojant poringumo parametrų duomenis, pastebėtas ryšys tarp sukietėjusio betono uždaro poringumo ir šviežio betono mišinio įtraukto oro kiekio (žr. 64 pav.).



64 pav. Ryšys tarp įtraukto oro ir uždaro poringumo

Analizuojant ryšį tarp įtraukto oro kiekio ir uždaro poringumo, pastebėta jog visose sudėtyse, išskyrus (1) ir (5), šie parametrai yra ganėtinai panašūs. Betono struktūroje, dėl įtraukto oro kiekio, susiformuoja uždaros poros. Daroma prielaida jog nustatius šviežio mišinio įtraukto oro kiekį, galima prognozuoti preliminarų uždara poringumą.

Analizuojant prognozuojamą šalčių skaičių, pastebėta jog skaičiavimai atitinka realius šalčio ciklų kiekius. Galime prisiminti jog atlikus tūrinio užšaldymo ir atšildymo bandymą, po 100 šalčio ciklų visiškai suiro (5), (8) ir (9) sudėties betoniniai bandiniai. Tuo tarpu apskaičiuotas prognozuojamų šalčio ciklų skaičius šioms trims sudėtims buvo 75, 79 ir 77 ciklai.

Daroma prielaida jog geriausiai vandenį į save įgeria betoniniai bandiniai su dideliu kapiliariniu poringumu, o bandiniai turintys didesnę uždara poringumą yra pajėgūs atlaikyti didesnę kiekį šalčio ciklų.

Išvados

1. Suprojektuota kontrolinė betono mišinio sudėtis, kurios tankis – 2366 kg/m^3 . Šios sudėties 1 m^3 sudaro: žvirgždas fr. 4/16 – 1006 kg/m^3 , smėlis fr. 0/4 – 870 kg/m^3 , cementas CEM I 42,5 – 319 kg/m^3 , vanduo – 169 l/m^3 , superplastiklis $1,6 \text{ l/m}^3$. Šios sudėties pagrindu, išlaikant minėtus komponentus pastoviais, sukurta dar dešimt betono mišinio sudėčių su skirtingomis įmaišomis ir jų deriniais.
2. Atlikus susitraukimų nustatymo bandymą, nustatyta, kad betone panaudojus 1,5 % SRA ir 2,5 % negesintų kalkių įmaišų derinį, susitraukimų deformacijos yra sumažinamos intensyviausiai. Palyginus su kontroline sudėtimi, po 90 parų užfiksuotas 40,0 % susitraukimų sumažėjimas.
3. Nustatyta, kad pluoštinių kanapių plaušo savybė įgerti vandenį turi reikšmingą poveikį betono mišiniui. Palyginus su kontroline sudėtimi, panaudojus $3,0 \text{ kg/m}^3$ pluoštinių kanapių plaušo, slankumas sumažėjo iki S2 klasės, tačiau įtraukto oro kiekis padidėjo 1,3 %, o tai tampa sukietėjusio betono uždaro poringumo padidėjimo priežastimi.
4. Atlikus gniuždymo stiprio bandymą po 28 parų, palyginus su kontroline sudėtimi, visose sudėtyse užfiksuotas gniuždymo stiprio sumažėjimas. Didžiausias gniuždymo stiprio sumažėjimas gautas sudėtyje nr.11 – 16,9 %, mažiausias – sudėtyje nr.2 – 0,9 %.
5. Atlikus lenkimo stiprio bandymą geriausi rezultatai užfiksuoti sudėtyje su polipropileno plaušo, negesintų kalkiu ir SRA deriniu (nr.10). Palyginus su kontroline sudėtimi užfiksuotas didžiausias lenkimo stiprio prieaugis – 11,7 %. Susidarius 3,5 mm plyšiui, šios sudėties betonas pasižymėjo didžiausiu liekamuoju stipriu – 1,9 MPa.
6. Nustatyta, jog sudėtys su 1,5 % SRA įmaišos (nr.5, 8, 9 ir 10) po 100 šalčio ciklų pasižymi dideliu gniuždymo stiprio sumažėjimu, o kai kurios jų visiškai praranda.
7. Ištyrus vandens įgeriamumo kinetikos parametrus nustatyta jog mažiausiai vandenį įgeria betonai turintys didesnius tankius (nr.7 ir nr.8), o betonai turintys didelį uždara poringumą (nr.1, 3 ir 11) atlaiko didesnę kiekį šalčio ciklų.
8. Nustatyta, jog tinkamiausia vietinė žaliava betono susitraukimo deformacijų sumažinimui yra negesintos kalkės. Nedidelis šios įmaišos kiekis (>2,5 %) gali sumažinti susitraukimus iki 21,5 %, o sąveikaudamos su kitomis susitraukimus mažinančiomis įmaišomis, gali pasiekti dar geresnius rezultatus.

Literatūros sąrašas

1. Maruyama, I.; Sugie, A. 2014. Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12, 279–288.
2. Rezvani, M.; Proske, T.; Graubner, C. A. 2019. Modelling the drying shrinkage of concrete made with limestone-rich cements. *Cement and Concrete Research*, 115, 160–175.
3. Wu, L.; Farzadnia, N.; Shi, C.; Zhang, Z.; Wang, H. 2017. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 149, 62–75.
4. Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Kliukas, R.; Jakubovskis, R. 2013. Shrinkage effect on short-term deformation behavior of reinforced concrete – When it should not be neglected. *Materials and Design* 51, 1060 – 1070.
5. Wyrzykowski, M.; Ghourchian, S.; Münch, B.; Griffa, M.; Kaestner, A.; Lura, P. 2021. Plastic shrinkage of mortars cured with a paraffin-based compound – Bimodal neutron/X-ray tomography study. *Cement and Concrete Research*, 140, 106289.
6. Mazzoli, A.; Monosi, S.; Plescia, E.S. 2015. Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods. *Construction and Building Materials*, 101, 596–601.
7. Žurauskienė, R.; Naujokaitis, A. P.; Mačiulaitis, R.; Žurauskas, R. 2012. *Statybinės medžiagos: vadovėlis*. Vilnius: Technika, 540 p.
8. Ma, Y.; Ye, G. 2015. The shrinkage of alkali activated fly ash. *Cement and Concrete Research*. 68. 75-82.
9. Kristiawan, S.A.; Aditya, M.T.M. 2015. Effect of high volume fly ash on shrinkage of self-compacting concrete. *Procedia Engineering*. 125. 705-712.
10. Lv, X.; Shen, W.; Wang, L.; Dong, Y.; Zhang, J.; Xie, Z; 2019. A comparative study on the practical utilization of iron tailings as a complete replacement of normal aggregates in dam concrete with different gradation. *Journal of Cleaner Production*. 211. 704-715.
11. Marčiukaitis, G. 2013. *Technologinių veiksnių įtaka betono ir gelžbetonio elgsenai: vadovėlis*. Vilnius: Technika, 248 p.
12. Maruyama, I.; Sugie, A. 2014. Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(8), 279–288.
13. Hajibabae, A.; Ley, M. T. 2016. The impact of wet curing on curling in concrete caused by drying shrinkage. *Materials and Structures*, 49(5), 1629–1639.
14. Kurda, R.; de Brito, J.; Silvestre, J. D. 2019. Concrete with High Volume of Recycled Concrete Aggregates and Fly Ash: Shrinkage Behavior Modeling. *ACI Materials Journal*, 116(1), 83–94.
15. Zhang, W.; Zakaria, M.; Hama, Y. 2013. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 500–510.
16. Wang, L.; Jin, M.; Wu, Y.; Zhou, Y.; Tang, S. 2021. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 272.
17. Deboodt, T.; Fu, T.; Ideker, J.H. 2016. Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 119. 53-60.

18. Yalçınkaya, Ç.; Yazıcı, H. 2017. Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials*. 144. 252–259.
19. Hajibabae, A.; Ley, M. T. 2015. Impact of Wet and Sealed Curing on Curling in Cement Paste Beams from Drying Shrinkage. *ACI Materials Journal*, 112(1), 1–6 pp.
20. Dönmez, A.; Bažant, Z. P. 2016. Shape factors for concrete shrinkage and drying creep in model B4 refined by nonlinear diffusion analysis. *Materials and Structures*, 49(11), 4779–4784.
21. Usanova, K.; Barabanshchikov, Y.G.; Krasova, A.V.; Akimov, S.V.; Belyaeva S.V. 2021. Plastic shrinkage of concrete modified by metakaolin. *Magazine of Civil Engineering*. 103(3).
22. Zhu, Y.; Zhang, H.; Zhang, Z.; Yao, Y. 2017. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of hydration process and drying shrinkage for cement paste with W/C of 0.25 affected by high range water reducer. *Construction and Building Materials*, 131, 536– 541.
23. Ullah, F.; Al-Neshawy, F.; Punkki, J. 2018. Early Age Autogenous Shrinkage of Fibre Reinforced Concrete. *Nordic Concrete Research*. 59. 5, pp. 59-72.
24. Rahman, M.; Chen, Y.; Lindquist, W.; Ibrahim, A.; Hindi, R. 2018. Mitigation of shrinkage cracking in bridge decks using Type-K cement. In: Presented at the structures congress 2018.
25. Richardson, D.; Tung, Y.; Tobias, D.; Hindi, R. 2014. An experimental study of bridge deck cracking using Type K-cement. *Constr Build Mater* 52(1):366–374.
26. Chaunsali, P.; Mondal, P. 2015. Influence of calcium sulfoaluminate (Csa) cement content on expansion and hydration behavior of various ordinary Portland cement-Csa blends. *J Am Ceram Soc* 98(8):2617–2624.
27. Ardeshirilajimi, A.; Wu, D.; Chaunsali, P.; Mondal, P. 2017. Effects of presoaked lightweight aggregate on deformation properties of ordinary Portland cement-calcium sulfoaluminate cement blends. *ACI Mater J* 114(4):643–652.
28. Arezoumandi, M. 2015. Feasibility of crack free reinforced concrete bridge deck from materials composition perspective: a state of the art review. *Front Struct Civ Eng* 9(1):91–103.
29. Saliba, J.; Rozière, E.; Grondin, F.; Loukili. A 2011. Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage. *Cem Concr Compos* 33(2):209–217.
30. Chaunsali, P.; Lim, S.; Mondal, P.; Foutch, D.A.; Richardson, D.; Tung, Y.; Hindi, R. 2013. Bridge decks: mitigation of cracking and increased durability. *Illinois Center for Transportation Series No. 13-023 UILU-ENG-2013-2024, ISSN: 0197-9191*.
31. Mehdipour, I.; Khayat, K.H. 2018. Effect of shrinkage reducing admixture on early expansion and strength evolution of calcium sulfoaluminate blended cement. *Cem Concr Compos* 92:82–91
32. Rahman, M.; Chen, Y.; Ibrahim, A.; Lindquist, W.; Tobias, D.; Krstulovich, J.; Gonzalez, D.; Hingi, R. 2020. Study of Drying Shrinkage Mitigating Concrete Using Scaled Bridge Bays. *International Journal of Civil Engineering*. 18:65 – 73.
33. Park, J.J.; Kim, S.; Shin, W.; Choi, H.J.; Park, G.J.; Yoo, D.Y. 2020. High performance photocatalytic cementitious materials containing synthetic fibers and shrinkage-reducing admixture. *Materials*, 13, 1828.
34. Zhang, R.; Cheng, X.; Hou, P.; Ye, Z. 2015. Influences of nano-TiO₂ on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage. *Constr. Build. Mater.*, 81, 35–41.
35. Kioumars, M.; Azarhomayun, F.; Haji, M.; Shekarchi, M. 2020. Effect of shrinkage Reducing Admixture on Drying Shrinkage of Concrete with Different w/c Ratios. *Materials*, 13, 5721.

36. Gao, S.; Wang, Z.; Wang, W.; Qiu, H. 2018. Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC). *Constr. Build. Mater.* 179, 172–185.
37. Zhan, P.; He, Z. 2019. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* 201, 676–690.
38. Zhao, H.; Jiang, K.; Di, Y.; Xu, W.; Li, W.; Tian, Q.; Liu, J.; 2019. Effects of curing temperature and superabsorbent polymers on hydration of early-age cement paste containing a CaO-based expansive additive. *Materials and Structures.* 52:108.
39. Tian, Z.; Li, C.; Liu, L. 2015. Effects of hydration environment and expansive agent type on expansion properties of shrinkage-compensating concrete, *Expans. Agen. Expans. Concr.* 1 1–5.
40. Polat, R.; Demirboga, R.; Khushefati, W.H. 2015. Effects of nano and micro size of CaO and MgO, nano-clay and expanded perlite aggregate on the autogenous shrinkage of mortar, *Constr. Build. Mater.* 81, 268–275.
41. Zhao, H.; Liu, H.; Wan, Y.; Ghantous, R.M.; Li, J.; Liu, Y.; Ni, Y.; Guan, J. Mechanical properties and autogenous deformation behavior of early-age concrete containing pre-wetted ceramsite and CaO-based expansive agent. 2021. *Construction and Building Materials.* 267.
42. Wang, Q.; Wang, D.; Chen, H. 2017. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete, *Cem. Concr. Compos.* 83, 125–137.
43. Zhao, H.; Jiang, K.; Yang, R. 2020. Experimental and theoretical analysis on coupled effect of hydration, temperature and humidity in early-age cementbased materials, *Int. J. Heat. Mass. Transfer.* 146 118784.
44. Zhao, H.; Hiang, Y.; Xie, D.; Xu, W.; Wang, Y.; Li, H.; Tian, Q.; Liu, J. 2020. Effects of CaO-based and MgO-based expansion agent, curing temperature and restraint degree on pore structure of early-age mortar. *Construction and Building Materials.* 257, 119572.
45. Mo, L.W.; Fang, J.W.; Hou, W.H.; Ji, X.K.; Yang, J.B.; Fan, T.T.; Wang, H.L. 2019. Synergetic effects of curing temperature and hydration reactivity of MgO expansive agents on their hydration and expansion behaviours in cement pastes, *Constr. Build. Mater.* 207, 206–217.
46. Çomak, B.; Bideci, A.; Bideci, Ö.S. 2018. Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar. *Construction and Building Materials.* 169, 794-799.
47. Zhijian, L.; Wang, L.; Wang, X. 2004. Compressive and Flexural Properties of Hemp Fiber Reinforced Concrete. *Fibers and Polymers.* Vol.5, No.3, 187-197.
48. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 206:2013+A2:2021. Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis.
49. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12620:2003+A1:2008. Betono užpildai.
50. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 932-1:2001. Užpildų pagrindinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Ėminio ėmimo metodai.
51. PALMUSTA: Eksploatacinių savybių deklaracijos. © 2021 Palmusta. [žiūrėta 2021-09-23] Prieiga per: <https://www.palmusta.lt/lt/>
52. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 197-1:2011. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai.

53. MIMETA: Cementas Rocket M-600 CEM I 42.5R. © 2021 UAB Mimeta. [žiūrėta 2021-09-23] Prieiga per: <https://mimeta.lt/cementas-betonas-muras/1174-cementas-rocket-m-600-cem-i-425r-35kg-40-pad-021091.html>
54. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST 1008:2003. Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant grąžinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti.
55. SIKA: Superplastiklis Sika ViscoCrete D-187. © 2021 SIKA. [žiūrėta 2021-09-23] Prieiga per: <https://ltu.sika.com/lt/statyba/betono-technologijamais/prekinio-betono-miiniotechnologija/sika-viscocrete-d-187.html>
56. SIKA: Susitraukimą mažinanti įmaiša Sika Control -50. © 2021 SIKA. [žiūrėta 2021-09-23] Prieiga per: <https://ltu.sika.com/lt/statyba/betono-technologijamais/papildomos-mai-osirproduktai/sikacontrol-50.html>
57. MIMETA: Negesintos kalkės Tradical Q 90. © 2021 UAB Mimeta. [žiūrėta 2021-09-23] Prieiga per: <https://mimeta.lt/kalkes/378-kalkes-negesintos-20kg-50vnt-pad-272194.html>
58. STATYBINIAI POLIMERAI: Polipropileno makroplaušas CONECTO Fiber 38. © 2021 Statybiniai polimerai. [žiūrėta 2021-09-23] Prieiga per: <https://www.statybiniaipolimerai.lt/product/poliolefino-makroplausas-conecto-fiber-38/>
59. KANAPĖS ŽIEDAS: Kanapių pluoštas. © 2021 UAB Kanapės žiedas. [žiūrėta 2021-09-23] Prieiga per: <http://www.kanapesziedas.lt/puslapis1/kanapiu-pluostas/>
60. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST 1974:2012. LST EN 206-1 taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai.
61. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 933-1:2012. Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas.
62. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 1097-5:2008. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 5 dalis. Vandens kiekio nustatymas džiovinant ventiliuojamoje krosnyje.
63. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-1:2021. Sukietėjusio betono bandymai. 1 dalis. Pavidalas, matmenys ir kiti bandinių bei liejimo formų reikalavimai.
64. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-2:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 2 dalis. Bandinių pagaminimas ir kietinimas stipriui nustatyti.
65. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12350-2:2019. Betono mišinio bandymai. 2 dalis. Slankumo bandymas.
66. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12350-7:2019. Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai.
67. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12350-6:2019. Betono mišinio bandymai. 6 dalis. Tankis.
68. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-16:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 16 dalis. Betono susitraukimo nustatymas.
69. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-3:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris.
70. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 12390-5:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris.

71. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST 1428-17:2016. Betonas. Bandyimo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu.
72. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. GOST 12730.4-78. БЕТОНЫ. Методы определения показателей пористости.
73. CIRCULAR ECOLOGY: Concrete Embodied Carbon Footprint Calculator. © 2021 Circular Ecology. [žiūrėta 2021-11-25] Prieiga per: <https://circularecology.com/concrete-embodied-carbon-footprint-calculator.html>
74. Marsivina, L.; De Schutter, G.; Audenaert, K. 2009. Influence of Cracks on the Service Life of Concrete Structures in a Marine Environment. Key Engineering materials Vol. 399, 153-160.