

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Tomas Mockevičius

**BETONO PORINGUMO IR ILGALAIKIŠKUMO TYRIMAI
NAUDOJANT ORO PORAS FORMUOJANČIUS PRIEDUS**

Magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Audrius Grinys

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

BETONO PORINGUMO IR ILGALAIKIŠKUMO TYRIMAI
NAUDOJANT ORO PORAS FORMUOJANČIUS PRIEDUS

Magistro projektas
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (621H20001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Audrius Grinys
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr.
(data)

Projektą atliko

(parašas) Tomas Mockevičius
(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Statybos ir architektūros

(Fakultetas)

Tomas Mockevičius

(Studento vardas, pavardė)

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija 621H20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Magistro projektas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gruodžio 21 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Tomo Mockevičiaus**, baigiamasis projektas tema „Betono poringumo ir ilgalaikiškumo tyrimai naudojant oro poras formuojančius priedus“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO KALBOS TAISYKLINGUMO VERTINIMAS

Fakultetas

Darbo autorius ir pavadinimas

Klaidų tipai	Klaidų skaičius, psl.	Pavyzdžiai
Rašybos klaidos		
Skyrybos klaidos*		
Kalbos kultūros klaidos		
Formalieji dalykai** (korektūros, kompiuteriu renkamo teksto klaidos)		
Bendras klaidų skaičius		
Raštingumo lygis:		

*Viena skyrybos klaida skaičiuojama kaip 0,5 klaidos.

**Neįeina į bendrą klaidų skaičių, tačiau jei tokių pažeidimų daug, darbas nevertinamas kaip aukšto raštingumo.

Vertintojo vardas, pavardė

Kauno Technologijos Universitetas
Statybos medžiagų katedros magistranto

Tomo Mockevičiaus magistro baigiamojo darbo
„BETONO PORINGUMO IR ILGALAIKIŠKUMO TYRIMAI NAUDOJANT
ORO PORAS FORMUOJANČIUS PRIEDUS“

ATSILIEPIMAS

2018 01 02

Magistranto Tomo Mockevičiaus baigiamąjį darbą sudaro: įvadas, 7 skyriai, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis 52 A4 formato puslapių.

Literatūros apžvalgoje magistrantas aprašo galimus porų tipus ir jų įtaką betono ilgalaikumui. Nurodo priedų (įmaišų) tipus skirtingai suformuojančius poras betone. Didelį įspūdį paliko surasti bandymų metodai nustatantys arba leidžiantys prognozuoti betono atsparumą šalčiui, ypač amerikiečių ASTM C 457 metodika.

Antrame, trečiame, ketvirtame ir penktame skyriuose išsikelti aiškūs tikslai bei uždaviniai ir pasirinkti tinkami metodai tiems tikslams pasiekti.

Šeštame baigiamojo darbo skyriuje magistrantas pateikė tyrime naudojamas medžiagas, jų technines charakteristikas, peržvelgė atitinkamus medžiagas reglamentuojančius standartus. Nenuvylė, kad didelį dėmesį skyrė kertinėms šio baigiamojo darbo medžiagoms t.y. įmaišoms formuojančioms oro poras.

Septintame magistrinio darbo skyriuje magistrantas pateikė atliktų tyrimų rezultatus. Tyrimuose buvo naudotas C30/37 XF4 klasės betonas su skirtingomis įmaišomis formuojančiomis oro poras. Buvo atlikta ir apibendrinta: mišinio pasklidimas, betono mišinio oro kiekio nustatymas, betono bandinių gniuždymo stiprio nustatymas, betono bandinių tempimo stiprio skėlimu nustatymas, betono bandinių vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas, betono bandinių kapiliarinis šaldymas/šildymas, betoninių bandinių tūrinis

šaldymas/šildymas, betono bandinių gniuždymas praėjus ciklams, mikroporų kiekio L300 ir atstumo tarp porų faktoriaus nustatymas pagal ASTM C 457 metodiką.

Vertinant bendrai, darbas palieka gerą įspūdį, yra tinkamai apiformintas, naudingas prekinio betono gamintojams. Dauguma Lietuvos prekinio betono gamintojų naudoja orą įtraukiančius priedus gamindami šalčiui atsparius betonus. Naudojant šio tipo įmaišą dėl daugelio faktorių yra sunku pagaminti ir pristatyti betono mišinį į statybos aikštelę su vienodu oro kiekiu mišinyje. Taip pat užtrunka gamyba (mišinys yra ilgiau maišomas t.y. naudojama energija), oro kiekio mišinyje kontrolė atliekama ypač dažnai tiek gamybos ceche, tiek statybos aikštelėje t.y. ilgesnis statybos laikas, reikalingas didesnis cemento kiekis projektinei stiprumo klasei pasiekti t.y. brangesnė statyba. Tad šiame darbe naudota įmaiša „Sferiniai mikroplastikiniai burbulai Sika® Aer Solid“ ir gauti tyrimų rezultatai verti dėmesio, nes kaip ir išsprendžia anksčiau minėtus betono gamybos sunkumus.

UAB „Autokausta“

laboratorijos vadovas

Evaldas Ruškys

Turinys

Anotacija	1
Annotation	2
Įvadas.....	3
1. Literatūros analizė	4
2. Darbo tikslas.....	11
3. Uždaviniai	11
4. Tyrimų metodologija /taikomi tyrimo metodai.....	11
5. Laukiami rezultatai.....	11
6. Eksperimente naudotos medžiagos	12
6.1. Pordlancementis.....	12
6.2. Betono užpildai.....	12
6.2.1. Stambusis užpildas.....	12
6.2.2. Smulkus užpildas.....	13
6.2.3. Betono mišinių užpildų granulimetrinė sudėtis.....	14
6.3. Vanduo.....	14
6.4. Superplastiklis.....	15
6.5. Orą formuojantis cheminis priedas	16
6.6. Sferiniai mikro-plastikiniai burbulai.....	16
6.7. Orą įtraukiantis priedas.....	16
7. Eksperimento tyrimų rezultatai ir jų apibendrinimas.....	18
7.1. Bandinių sudarymas.....	18
7.2. Betono mišinio pasklidimo tyrimas.....	19
7.3. Betono mišinio oro kiekio nustatymas.....	22
7.4. Betono bandinių gniuždymo stiprio nustatymas.....	24
7.5. Betono bandinių tempimo stiprio skėlimu nustatymas.....	27

7.6. Betono bandinių vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas.....	29
7.6.1. Vandens įgėrio nustatymas.....	29
7.6.2. Vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas.....	30
7.7. Betono bandinių kapiliarinis šaldymas/šildymas.....	37
7.8. Betoninių bandinių tūrinis šaldymas/šildymas.....	39
7.8.1. Betono bandinių gniuždymas praėjus F200 ciklams.....	41
7.8.2. Betono bandinių gniuždymas praėjus F300 ciklams.....	43
7.9. Mikroporų kiekio L300 ir atstumo tarp porų faktoriaus nustatymas pagal ASTM C 457 metodiką.....	46
Išvados.....	49
Literatūra.....	51

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Magistro baigiamasis darbas

BETONO PORINGUMO IR ILGALAIKIŠKUMO TYRIMAI NAUDOJANT ORO
PORAS FORMUOJANČIUS PRIEDUS.

Tomas Mockevičius

Anotacija

Magistro baigiamojo darbo tikslas – ištirti panaudojamų įmaišų įtaką šviežio betono reologinėms bei technologinėms savybėms. Taip pat nustatyti sukietėjusio betono ilgalaikiškumo parametrus, juos palyginti. Galų gale pasižiūrėti ir patikrinti kas keičiasi betone naudojant tam tikras įmaišas.

Šiame tyrime tiriamas betonas su skirtingomis sudėtimis: su kontroline sudėtimi, su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais, su orą formuojančiu cheminiu priedu ir su orą įtraukiančiu priedu.

Tyrimo eigoje atliekama literatūros analizė kurios metu išanalizuojama reikalingiausia literatūra. Taip pat pateikiama naudojamų medžiagų aprašymai ir eksploatacinių savybių deklaracijos. Svarbiausia šio darbo eiga yra bandymai: su šviežiu betonu (mišinio pasklidimas, oro kiekio nustatymas) bei su sukietėjusiu betonu (gniuždymo stiprio nustatymas, tempimo stiprio skėlimu nustatymas, vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas, kapiliarinis šaldymas/šildymas, tūrinis šaldymas/šildymas bei mikroporų kiekio L300 ir atstumo tarp porų faktoriaus nustatymas). Kiekvienas bandymas išanalizuojamas bei aprašomas, duomenys pateikiami grafiškai, suformuluojamos išvados.

Tyrimams naudota įmonės AB „Akmenės cementas“ cementas, granitas iš UAB „Granitas“, panaudotas smėlis universiteto, priedai iš įmonės SIA „Sika“ Baltic. Tyrimai atliekami Kauno technologijos universitete ir įmonėje UAB „Autokausta“.

Reikšmingi žodžiai: Oro poros, betono įmaiša, gniuždymo stipris, tempimo stipris skėlimu, atsparumas šalčiui, mikroporos, porometrija.

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
DEPARTMENT OF BUILDING MATERIALS

Masters final work

CONCRETE DURABILITY AND POROSITY INVESTIGATION WHEN DIFFERENT
TYPES OF AIR ENTRAINERS ARE USED.

Tomas Mockevičius

Annotation

The main aim/purpose of this masters final work is to investigate influence of used admixtures to fresh concretes rheological and technological features. As well as to detect hardened concretes longevity parameters and compare them. Subsequently, to look and check whether any changes appear when adding a mixtures to concrete.

During the research, concrete with different kinds of composition is being investigated: with control composition, with spherical micro-plastic bubbles, with air formatting chemical supplement and with air absorbing supplement.

In the process of the research, literature analysis is done, during which the most essential literature is being analyzed. Also descriptions of used materials and operational properties are presented. Biggest impact to the course of this experiment is done by tests: with fresh concrete (diffusion of the mix, measurement of the amount of air) and with hardened concrete (strength of compression measurement, tensile cleaving strength measurement, kinetic water absorption measurement, capillary heating/freezing, micro pores quantity L300 and the distance between the pores factor measurement). Each of the tests is being analyzed and described, data is shown graphically, conclusions are formulated.

During the researches, concrete from company AB „Akmenės cementas“, granite from UAB „Granitas“, sand from university, and mixtures from a company SIA „Sika“ Baltic, were used. The tests were done in the Kaunas Technological University and in a company UAB „Autokausta“.

Keywords: Air pores, concrete admixture, strenght of compression measurement, tensile cleaving strenght measurement, frost resistance, micropores, porthometry.

Įvadas

Magistro baigiamojo darbo tema yra „betono poringumo ir ilgalaikiškumo tyrimai naudojant oro poras formuojančius priedus“. Temos pagrindinis tikslas, iširti cheminių priedų tinkamumą, bei porų įtaką gaminiui, peržvelgti savybes.

Anksčiau betonas buvo kaip apkrovas laikanti medžiaga, todėl moksliniai tyrimai ilgai buvo orientuoti į betono mechanines savybes. Gniuždymo stipris visada buvo ir bus rodiklis skirstant į klases skirtingus betono tipus. Buvo pastebėta, kad poringumo ir stiprumo ryšys yra stiprus, bet susidomėjimas poringumo parametrais liko ribotas. T. C. Powerso porų dydis ir oro porų pasiskirstymas tapo labai svarbiu rodikliu tiriant gaminius laboratorijose ir naudojant juos praktikoje, kur daugiausiai dėmesio skiriama vertinant atsparumą šalčiui. Po T. C. Powerso atlikto mokslinio tyrimo daugumai inžinierių dirbančių su betonu, porų dydžio pasiskirstymas sukietėjusiame cementiniame akmenyje tapo dar labiau neaiškus.

Susidomėjimas betono ilgalaikiškumu ėmė taip pat sparčiai augti, kaip ir didėti statinių priežiūros bei remonto darbų kaštai. Tyrimas parodė, jog daugumoje šalių finansiškai negalėtų atlaikyti pastatų priežiūrai reikiamų finansinių išlaidų, o didinti pastatams naudojamo betono stiprumą būtų neracionalu. Poringos struktūros medžiagos ilgalaikiškumas gali būti suprastas ir pagerintas tik analizuojant kompleksą sąveikų tarp poringos struktūros ir aplinkos.

Poringumas ir porų dydžio pasiskirstymas sukietėjusiame cementiniame akmenyje buvo tiriami daugelio mokslininkų, buvo taikoma daugybė visiškai skirtingų bandymo metodų. Analizuojant literatūrą randama skirtingų, kartais net priešingų rezultatų. Skirtingų bandymo metodų rezultatai retai būna palyginami, kritikuojami. Dėl šios priežasties trūksta išsamios literatūros apie cementinio akmens poringą struktūrą.

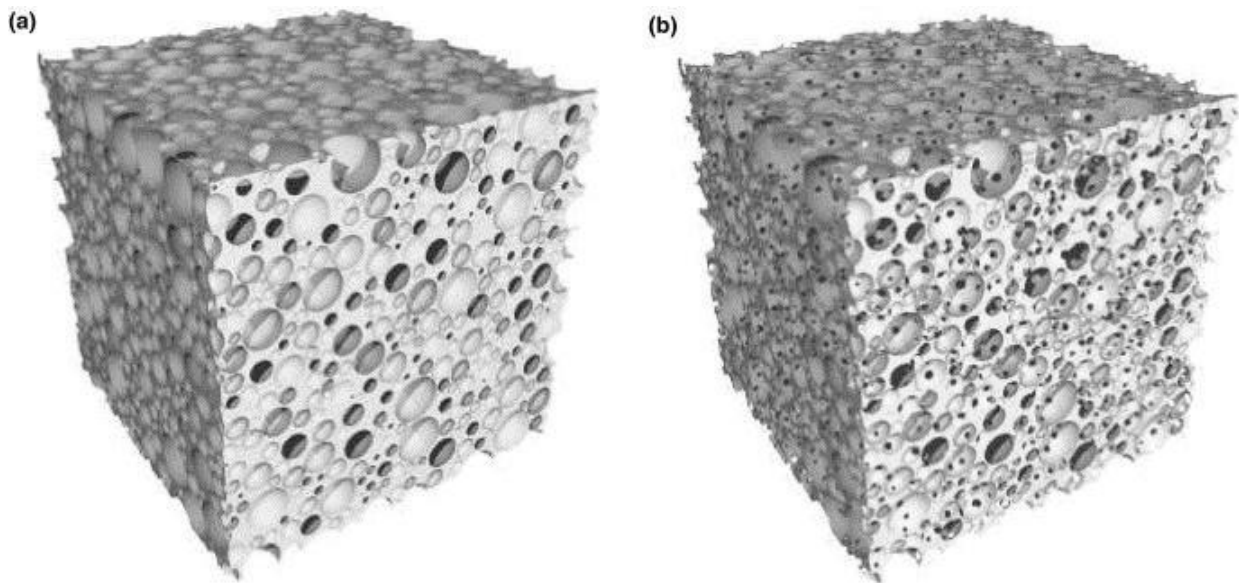
Iš pradžių turėsiu susirinkti informaciją, tuomet susidaryti sudėtis, pasiruošti medžiagas, užsipilti bandinius bei pagal standartizuotą metodiką patikrinti savybes ir pateikti palyginimą. Taip pat pagrindinis tyrimas bus porų poveikį betoniniam gaminiui (atsparumas šalčiui), tirsiu poru kiekį, dydį bei atstumą tarp porų naudojant ASTM C 457 metodiką. Turėsiu peržvelgti skirtumus tarp paprasto, lengvojo ir be abejo betono su oro poromis. Galų gale privalėsiu atlikti analizę, pateikti išvadas, kurios turės atspindėti svarbiausius temos aktualumus bei uždavinius.

1. Literatūros analizė

Betonas dirbtinis akmuo, gaunamas kietėjant rišamųjų medžiagų (cemento), užpildo (smėlio, žvyro) ir vandens mišiniui. Betonas turi būti pakankamai stiprus, gerai sukibti su armatūra, pakankamai tankus. Atsižvelgiant į projektuojamų konstrukcijų paskirtį ir naudojimo sąlygas, naudojami tokie pagrindiniai betono rodikliai [2]:

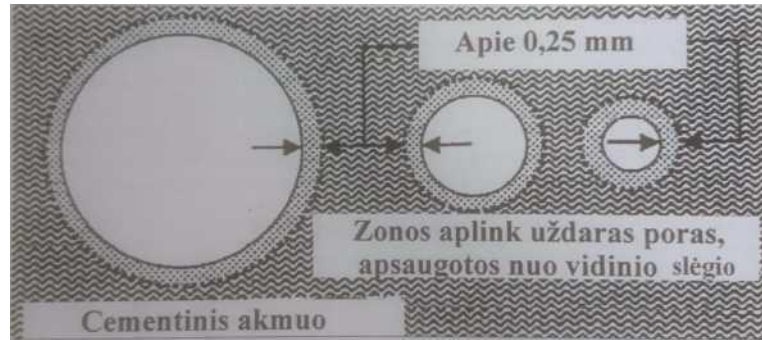
- 1) betono gniuždymo stiprio klasė C, lengvam betonui – LC;
- 2) betono atsparumo šalčiui markė F;
- 3) betono ne laidumo vandeniui markė W;
- 4) lengvojo betono tankumo klasė D.

Betonas yra akytoji medžiaga. Kapiliarinės poros betone suformuojamos tam, kad padėtų pašalinti vandens perteklių betone. Atviros poros lengvai absorbuoja (sugeria) vandenį. Įtraukto oro tuštumos formuojasi tuo metu kai betonas yra maišomas, o likęs oras betone pasilieka sudarydamas poras. Atviros oro poros gali pakenkti, jei jų pernelyg didelis kiekis, tačiau viduje esančios oro poros pagerina betono atsparumą šalčiui.



1.1 pav. Uždaras ir atviras poringumas: (a) uždaros poros, (b) atviros poros.

Pagal klasikinę T. C. Powerso hipotezę [30], įtraukto oro porų, būsimų uždarytų porų skersmuo svarbus ir tuo požiūriu, kad kuo jis mažesnis, tuo didesnis betono tūris apsaugomas nuo jį ardančio vidinio slėgio (1.2 pav.). Pagal T. C. Powersą, šią priklausomybę lemia tai, kad užšalčiame betone vandens migracijos į rezervines poras kelias neturi būti ilgesnis, kaip 1/100 colio (apie 0,25 mm) - kitaip susidarys dideli vidiniai įtempimai, dėl kurių toks betonai suskeldės. Dėl to betone ypač svarbus ir šių uždarytų smulkių porų pasiskirstymas.



1.2 pav. Įtraukto oro sudarytų porų skersmens įtaka jų poveikio efektyvumui (nuo vidinių įtempimų apsaugojamam betono tūriui). Didėjant porų skersmeniui, apsaugotos zonos storis nepakinta, tačiau apsaugotas santykinis cementinio akmens tūris sumažėja.

Betono atsparumas šalčiui priklauso ir nuo atviro poringumo (sumuojant ir kapiliarines poras) ir uždaro poringumo (oro kiekis mišinyje). Taip pat kiekybiškai galima nustatyti pagal atsparumo šalčiui faktorių K_s , kuris yra randamas iš lygties [8]:

$$K_s = \frac{P_u}{0,09 \cdot P_a} \quad (1.1)$$

čia:

P_u – uždarų porų skaičius;

P_a – atvirų porų skaičius.

Betone būna keturių tipų poros:

- 1) gelio poros;
- 2) kapiliarinės poros;
- 3) mikroporos;
- 4) makroporos.

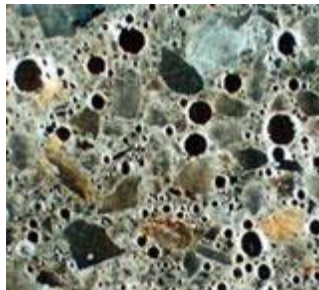
Gelio poros neturi įtakos betono stiprumui, tačiau jos tiesiogiai veiks betono mišinio slankumą ir kiekio sumažėjimą. Tačiau kitos išvardintos poro sumažina betono stiprumą.

kontroliuojami konkrečiame gamybos procese, jei tas betonas bus paveiktas šalčio ir atšilimo ciklu. Šis būdas daugiausiai taikomas radimo ir tyrinėjimo galimybėms numatyti.

Oras į betoną gali būti įtraukiamas pasitelkiant orą įtraukiančius priedus, orą įtraukiantį cementą bei derinant šiuos abu būdus. Orą įtraukiantis cementas - portlandcementis su papildomu priedu, kuris į sudėtį dedamas gamybos metu. Orą įtraukiantys priedai yra įdedami į betoną prieš pat maišant arba maišymo metu.

Maišymo metu oras įtraukiamas į cementinę tešlą ir suskaidomas į mažus burbuliukus apsuptus stabilizuojančio agento (superplastiklio arba plastiklio). Būtina pakankamai ilgai atlikti betono maišymo procesą, jog oro burbuliukai būtų visiškai suformuoti ir stabilizuoti. Taipogi, reikėtų nepamiršti prieš gaminant gaminius atlikti reikiamus bandymus, siekiant nustatyti medžiagų kiekius bei optimalų maišymo laiką [9].

Orą įtraukiantis priedas įpiltas į cementinio akmens mišinį maišymo metu suformuoja betone mikro-burbulus, šis faktorius padeda suformuoti sukietėjusiame cementiniame akmenyje mikroporų struktūrą, kuri labai pagerina betono ilgalaikiškumą, veikiamą drėgmės, užšalimo ir atšilimo ciklu metu. Dėl į betoną įtraukto oro padidėja šviežio cementinio akmens mišinio kohezija ir lipnumas [9].



1.4 pav. Įtraukto oro mikroskopinės poros.

Pagrindinės sukietėjusio cementinio akmens savybės, kurias veikia oro įtraukimas - gniuždomasis ir tempiamasis stipris bei tamprumo modulis. Stiprumo sumažėjimas yra aptinkamas atliekant bandymus, kai po 28 dienų kietėjimo, gniuždymo stipris išmatuojamas mažesnis negu numatytas projektinis. Oro tūrio padidėjimas 1% paskatina vidutiniškai 3 – 5 % gniuždymo stiprio sumažėjimą [12].

Tempimo stiprio skėlimu sumažėjimas yra mažesnis nei gniuždymo stiprio ir siekia vidutiniškai 2 – 4 % nuo kiekvieno įtraukto oro tūrio procento. Įtraukto oro tūrio poveikis tamprumo moduliui yra labai panašus į gniuždymo stiprio. Tamprumo modulis paprastai sumažėja nuo 2.5 – 6 % kiekvienam įtraukto oro tūrio procentui [9].

Sumažėjusio cementinio akmens stiprumo galima visiškai arba iš dalies išvengti mažinant vandens ir cemento santykį [13].

Tačiau, be atsparumo šalčiui ir paviršiaus pleišėjimui, įtrauktas oras pagerina cementinio akmens tinkamumą, sumažina vandens poreikį, segregaciją ir pralaidumą [12].

Bandymų metodai naudojami eksperimentiškai išmatuoti porų tūrį ir nustatyti porų dydžio pasiskirstymą cementinio akmens poringoje struktūroje, gali būti suskirstyti į: tiesioginius ir netiesioginius metodus.

Netiesioginiai bandymo metodai - kai bandinys yra veikiamas išorinių medžiagų, o bandinio reakcija į jas yra išmatuojama matavimo įrenginiu. Netiesioginiais metodais yra nustatomi tokie poringos struktūros parametrai, kaip absorbcijos talpa, tankis bei kiti. Dažniausiai naudojami netiesioginiais bandymo metodais [15]:

- 1) gyvsidabrio porometrija;
- 2) dujų adsorbicija;
- 3) terminė porometrija;
- 4) atominis magnetinis rezonansas.

Tiesioginiai bandymo metodai – tokie metodai, kai tiesiogiai tiriamas bandinio paviršius, jo mikro-struktūra, kur pamatuojamas porų dydis ir forma bei matematinės analizės metodais išanalizuojamas ryšys tarp poringos erdvės ir kietos fazės. Dažniausiai naudojami tiesioginio bandymo metodai [15]:

- 1) optinė mikroskopija;
- 2) skenuojanti elektronų mikroskopija;
- 3) nuotraukų analizės metodas, kuris priklauso optinei ir elektronų mikroskopijai.

Betono atsparumą šalčiui ir ledą tirpdančių druskų poveikiui sprendžiama pagal šiuos kriterijus:

- santykinis šaldomų bandinių masės nuostolius (tankio pokyčius);
- santykinis betono gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio pokyčius;
- bandinių išvaizdos pokyčius ir šaldymo metu išsivysčiusių pažeidimų pobūdį;
- santykinis betono dinaminio tamprumo modulio (rezonansinio virpesių dažnio) pokyčius;
- ultragarso bangų sklaidimo greičio pokyčius;
- bandinių tampriųjų ar liekamųjų deformacijų pobūdį ir dydį;

- paviršinio betono irimo charakteristikas (pažeisto ploto dydį ir gylį, atskilusių dalelių masę, atsivėrusių plyšių plotį ir pan.);
- betono prisotinimo vandeniu ar druskos tirpalais laipsnį ir kita.

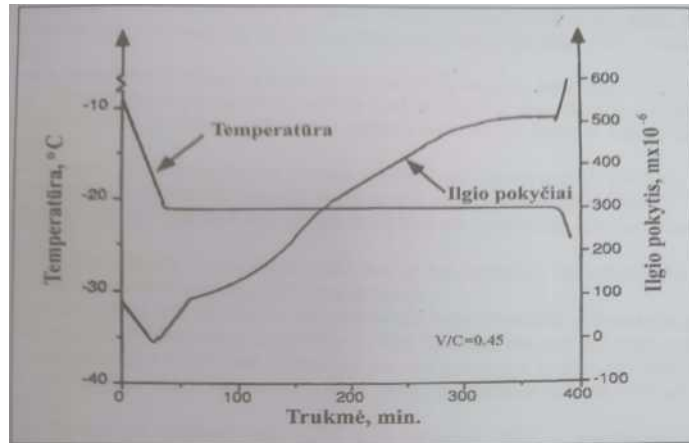
Kaip matyti, ne visi šie kriterijai yra paprasti ir vienareikšmiškai interpretuojami; keleto kriterijų nustatymas reikalauja kruopščiai suderintos įrangos, standartizuotų metodikų. Todėl pirmiausia verta domėtis paprasčiausiais kriterijais.

Atliekant tyrimus buvo naudojama vizualaus įvertintino kriterijai. Cikliškai šaldyto betono bandinių atsparumo šalčiui vizualaus įvertinimo metodikas siūlė S. Šestapiorovas, V. Moskvinas (1.1 lentelė) [29].

1.1 lentelė. Betono bandinių šalčio atsparumo klasė pagal S. Šestapiorovą.

Atsparumą šalčiui įvertinamas balas	Cikliškai šaldytų bandinių suirimo pobūdis
10	Pažeidimų nematyti
9	Nedideli pažeidimai: briaunų apvalėjimo požymiai
8	Briaunų apvalėjimo požymiai ir nedideli lokaliniai ištrupėjimai šalia neatsparių šalčiui užpildų
7	Lokaliniai ištrupėjimai šalia neatsparių šalčiui užpildų ir aiškus bandinio briaunų apvalėjimas
6	30 – 40 % briaunų suirusios, bandinys netenka kubo formos, kampų atskilimo pradžia
5	Suirę visi kampai ir 60 – 70 % briaunų
4	Suirę 80 – 90 % briaunų
3	Buvusios bandinių briaunos beveik neįžiūrimos
2	Bandinių briaunos neįžiūrimos
1	Bandiniai visiškai suapvalėję

Deja, vizualus šaldomų betono bandinių įvertinimas yra subjektyvus, betono suirimų aprašymu sunku išreikšti skaitmenine forma, beveik negalimi tarp laboratorinių duomenų palyginimai.



1.5 pav. Pastovios neigiamos temperatūros įtaka cementinio akmens deformacijoms (pagal [31]).

V. Gurskis [1] betono atsparumą cikliškam šalčio ir druskų poveikiui siūlo vadinti rusišku terminu "морозосолеустойкость". Šiam atsparumui nustatyti tinka standartiniai metodai:

- kai cikliškai šaldomi ir atšildomi druskų tirpalo visiškai apsemti betono bandiniai;
- kai su druskų tirpalu kontaktuoja tik dalis betoninio bandinio paviršiaus.

Šiame tyrime panaudojami abu bandymai. Jų skiriamasis bruožas, kad bandiniai dažniausiai šaldomi iš vienos pusės, šaldymo terpė - druskos tirpalas, o apie betono atsparumą greta kitų, pagalbinių kriterijų, sprendžiama pagal bandinių paviršiaus būklę.

Baigiamajame magistro darbe yra nagrinėjami įvairiausi straipsniai bei knygos, apžvelgiamos teorijos bei metodai, susipažįstama su daugybe technologijų. Šiame darbe dar yra pasigilinta į ASTM C457 teoriją.

Šis baigiamasis magistro darbas yra išskirtinis tuo, kad Lietuvoje dar nėra plačiai žinoma apie orą įtraukiančius priedus. Nors daugelyje gamyklų ir yra naudojama šie priedai, bet tikrai ne visi žino kaip veikia šie priedai, nežino kas vyksta per reakcijos šviežiame betone, kaip susidaro poros. Ateityje, turėtų būti daug informacijos apie šiuos priedus ir jų veikimą ir šie priedai bus tikslingai naudojami.

2. Darbo tikslas

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas yra ištirti panaudojamų įmaišų įtaką šviežio betono reologinėms bei technologinėms savybėms. Taip pat nustatyti sukietėjusio betono ilgalaikiškumo parametrus, juos palyginti. Vėliau pasižiūrėti ir patikrinti kas keičiasi betone naudojant tam tikras įmaišas.

3. Uždaviniai

1. Betono atsparumo šalčiui, cheminių įmaišų įtaka šviežio betono reologinėms ir technologinėms savybėms;
2. Sukietėjusio betono stipruminių savybių ir ilgalaikiškumo tyrimai naudojant uždaras oro poras formuojančius priedus.
3. Betono atsparumą šalčiui teigiamai veikiančių priedų (įmaišų) privalumai ir trūkumai.

4. Tyrimų metodologija /taikomi tyrimo metodai

1. Šviežio betono tankio, slankumo (konsistencijos), oro kiekio nustatymams naudojamos standartinės metodikos;
2. Šviežio betono reologinių savybių tyrimai;
3. Sukietėjusio betono tankio stipruminių savybių (gniuždymo stipris, tempimo stipris skėlimu ir kitos) nustatymas naudojant standartizuotas metodikas;
4. Sukietėjusio betono poringumo parametrų nustatymas naudojant vandens įgeriamumo kinetiką. Mikroporų kiekio L300 ir atstumo tarp porų faktoriaus nustatymas pagal ASTM C 457 metodiką.

5. Laukiami rezultatai

Pagal gautus betono turimų rezultatus, bus galima spėsti kuri įmaiša yra efektyvesnė ir geresnė, labiau teigiamai veikianti betono atsparumą šalčiui.

6. Eksperimente naudotos medžiagos

6.1. Portlandcementis.

Portlandcementis - hidraulinė rišamoji medžiaga, kurios sudėtyje vyrauja kalcio silikatai (70-80 %). Ši medžiaga gaunama sumalus klinkerį ir reikiamą kiekį gipso.

Klinkeris yra medžiaga, gauta 1450°C temperatūroje sukepinant žaliavos mišinį, sudarytą iš kalcio karbonato (įvairių rūšių klinčių) ir aliumosilikatų (molio ir kt.). Nedidelis gipso priedas reguliuoja portlandcemenčio rišimosi laiką.



6.1 pav. Portlandcementis CEM I.

Portlandcementis (CEM I) gaminamas beveik iš gryno klinkerio, pridodant iki 5% papildomų priedų, jis greit kietėja. Maždaug po 6h kietėjimo jo stiprumas gali siekti iki 10 MPa, o po paros kietėjimo jau net 20-25MPa stiprumą. Paprastai klinkeris su priedais būna sumaltas (280/400 m²/kg), todėl geriau sukietėja pradiniu laiku. Cemento smulkumą galima nustatyti Bleido prietaisu (LST EN 196-6:2010). Šio portlandcemenčio savitasis tankis yra 3000-3200 kg/m³. Jis yra tinkamas naudoti betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms.

6.2. Betono užpildai.

6.2.1. Stambusis užpildas.

Granito skalda yra gaunama trupinant granitinius riedulius specialiais trupintuvais (plačiausiai naudojami žiauniniai trupintuvai), bei leidžiami per sietus taip išsijojant reikalingas frakcijas. Granito skalda tenkina (LST EN 12620:2003+A1:2008) standarto reikalavimus.

Granito skalda naudojama sumažinti rišamųjų medžiagų masę, bei pagerinti betono sudėties stiprumą, tamprumą, deformatyvumą, valkšnumą.

6.2.1.1 lentelė. Granito skaldos eksploatacinių savybių deklaracija.

LST EN 12620:2003+A1:2008 Betono užpildai (granito skalda)		
Rodiklio pavadinimas	Rodiklio vertė	Kategorija
Dalelių forma:		
- plokštumo rodiklis,	≤ 15 masės %	FI ₁₅
- formos rodiklis,	≤ 15 masės %	SI ₁₅
Dalelių dydis (frakcija)	8/11	
Granulimetrinė sudėtis		Gc 85/20
Piltinis tankis	1.3 Mg /m ³	
Dalelių tankis	2.60 Mg /m ³	
Svarumas:		
Smulkiųjų kiekis	≤ 1,5 masės %	f _{1,5}
Sukibimas su bituminiais rišikliais po 6h-24h	100- 90%	
Atsparumas trupinimui /skaldymui : LA	≤ 20	LA ₂₀
SZ	≤ 18	SZ ₁₈
Atsparumas dėvėjimuisi	≤ 10	M ₁₀ 10
Atsparumas glūdinimui	≥ 50	PSV50
Atsparumas paviršiaus dilinimui	Nenustatyta	
Atsparumas dygliuotų padangų poveikiui	Nenustatyta	
Cheminė sudėtis/kiekis:		
Chloridai vandenyje tirpūs	≤ 0,01masės %	
rūgštyje tirpus sulfatai	≤ 0,2 masės %	AS _{0,2}
bendras sieros kiekis	≤ 1 masės %	
organinių priemaišų (humuso)	Nėra	
šarmų kiekis	Nėra	
Tūrio pastovumas:		
susitraukimas džiustant	Nenustatyta	
Vandens įmirkis	≤ 1 masės %;	
Kenksmingos medžiagos:		
radioaktyvumas;	1	klase
laisvi sunkieji metalai;	nėra	
laisvieji poliaromatiniai anglies junginiai;	nėra	
kitos laisvosios kenksmingos medžiagos	nėra	
Atsparumas šalčiui magnio sulfato poveikiui	≤ 18 masės %;	MS ₁₈
Atsparumas šarminei korozijai	Nevyksta	

6.2.2. Smulkus užpildas.

Smulkus užpildas – smėlis yra naudojamas kaip ir stambus užpildas sumažinti brangių rišamųjų medžiagų masę, pagerėja betono techninės savybės: padidėja stiprumas, tamprumas, sumažėja deformatyvumas, valkšnumas, suteikia specifinių savybių.

Apie smulkaus užpildo tinkamumą betonams sprendžiama pagal užpildų savybes:

- geometrinės charakteristikos;
- fizinės ir mechaninės savybės bei struktūra;
- aplinkos poveikio savybės.

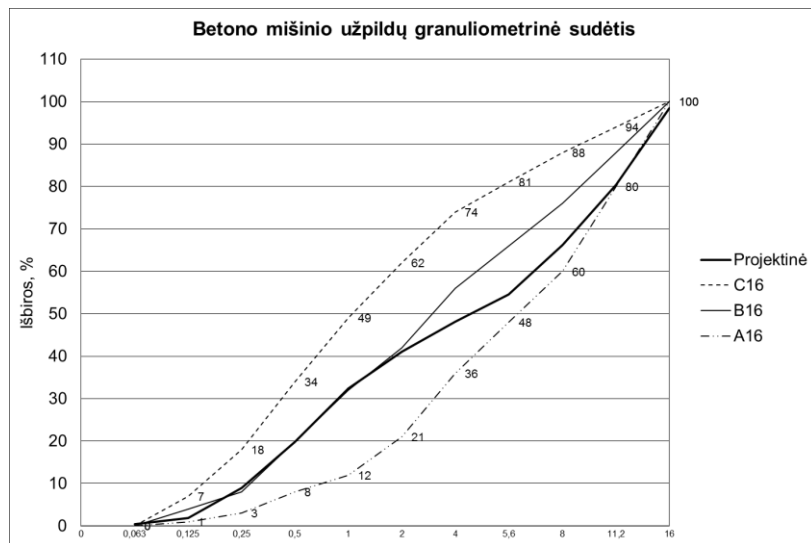
Betono užpildai reglamentuojami pagal LST EN 12620:2003+A1:2008 standartą.

6.2.2.1 lentelė. Smėlio eksploatacinių savybių deklaracija.

EN 12620:2002+A1:2008 Betono užpildai smėlis fr.0/4		
Rodiklio pavadinimas	Rodiklio vertė	Kategorija
Dalelių dydis (frakcija d/D)	0/4mm	-
Dalelių forma:		
plokštumo rodiklis	Netaikoma	NPD
formos rodiklis	Netaikoma	NPD
Granulimetrinė sudėtis	Atitinka	G _F 85, CP
Piltinis tankis	< 1,63 Mg/m ³	-
Dalelių tankis	< 2,66 Mg/m ³	-
Švarumas, smulkelių kiekis	< 3,0 masės %	f _{3,0}
Organinės priemaišos	Nerasta	-
Cheminė sudėtis / kiekis		
Vandenyje tirpūs chloridai	<0,0006 masės %	-
Rūgštyje tirpūs sulfatai	<0,2 masės %	AS _{0,2}
Bendras sieros kiekis	<1,0 masės %	S ₁
Vandens įmirksis WA ₂₄	< 1,0 masės%	-
Kenksmingos medžiagos:		
Radioaktyvumas	-	1 klasė
Laisvieji sunkieji metalai	Randama tik junginiuose	-
Poliaromatiniai anglies junginiai	Nerasta	-
Kitos laisvosios kenksmingos medžiagos	Nerasta	-
Atsparumas šaldymui ir atšildymui	Netaikoma	NPD
Šarminis reaktingumas R _{frak.}	< 6,0 masės %	-

6.2.3. Betono mišinių užpildų granulimetrinė sudėtis.

Betono užpildai patikrinami ir parenkami, kad projektuojant sudėtį jie tenkintų LST EN 12620 standarto nuostatus. Projektinė kreivė turi tilpti tarp A16 ir C16 kreivių tuomet užpildai yra gerai parinkti, galime matyti, kad sudėtis tenkina šiuos reikalavimus.



6.2 pav. Betono užpildų granulimetrinės sudėties kreivė.

6.3. Vanduo.

Vanduo – betono mišinyje – jungiamoji skystoji fazė, kuri, reaguodama su cemento klinkerio mineralais bei kitomis rišimosi savybių turinčiomis medžiagomis, sudaro pakankamo stiprumo bei kitų savybių cementinį akmenį. Vanduo betonui reglamentuojamas (LST EN 1008:2005) standarte.

Techniniai reikalavimai keliami vandeniui:

- vandenyje susidarančių ištirpusių druskų ir jonų – SO_4^{2-} gali būti ne daugiau kaip 2000 mg/l; Cl^{-1} – ne daugiau kaip 500 mg/l; Na_2O – ne daugiau kaip 1500 mg/l;
- vandens oksidacija neturi būti didesnė nei 15 mg/l;
- vandens pH turi būti ne mažesnis kaip 4 ir ne didesnis kaip 12,5;
- organinių paviršiaus medžiagų bei fenolio vandenyje neturi būti daugiau kaip 10 mg/l;
- kitų žaliavų įmaišų – cukrus, P_2O_5 , Pb^{2+} , Zn^{2+} leidžiamoji norma – iki 100 mg/l;
- vandenyje neturi būti naftos produktų plėvelės, riebalų, aliejaus ir kitų panašių medžiagų;
- vandenyje neturi būti dažančių priemaišų;
- vandenyje neturi būti priemaišų, kurios trukdo rištis ir kietėti rišamajai medžiagai, taip pat priemaišų, kurios trukdo rištis ir kietėti rišamajai medžiagai, taip pat priemaišų, kurios mažina betono stiprumą ir atsparumą šalčiui.

6.4. Superplastiklis.

Plastiklis ir superplastiklis – tai priedai kurie didina mišinio plastiškumą arba mažina mišinio užmaišymui reikalingą vandens kiekį esant tam pačiam mišinio plastiškumui (klojumui).

Plastifikavimo efektas, panaudojus plastiklius arba superplastiklius, pasiekiamas disperguojant cemento daleles cemento tešloje. Be plastifikuojančio priedo cemento dalelės vandeninėse suspensijose linkusios agreguoti – sulipti į agregatus. Pridėjus plastifikuojančio priedo, cemento suspensijoje padidėja smulkių dalelių kiekis, cemento tešla tampa tanki, t.y. žymiai sumažėja tešlos klampis ir padidėja slankumas.

Sika® ViskoCrete-187 – tai efektyvi bespalvio spalvos skysčio pavidalo $1,08\text{g/cm}^3$ tankio polikarboksilatinė įmaiša, atitinkanti LST EN 934-2:2009+A1:2012 standartą, bechlorė, leidžianti iki 40 % sumažinti apskaičiuotąjį vandens kiekį betono mišinyje.

6.5. Orą formuojantis cheminis priedas

Orą formuojantis cheminis priedas skirtas betono maišymo metu chemiškai į betono mišinį įtraukti orą. Šiame bandyme naudojama Sika® Control Aer 200-P cheminis priedas. Šis priedas vienodais tarpais paskirsto oro burbuliukus, taip pat turi šių privalumų:

- didina atsparumą šalčiui ir betono ilgalaikiškumą;
- pagerina oro burbuliukų stabilumą betone;
- tinka naudoti su visų tipų cementais;
- sumažina betono maišymo laiką;
- sudėtyje nėra chloridų ir kitų plieno koroziją skatinančių priemaišų, betono ir gelžbetonio konstrukcijoms.

6.6. Sferiniai mikro-plastikiniai burbulai.

Sferiniai mikro-plastikiniai burbulai Sika® Aer Solid – baltos pastos pavidalo cheminė priemaiša, kuri betono maišymo metu suformuoja dirbtinius burbuliukus, kurie papildomo oro beveik neįtraukia. Šio priedo tankis $0,2\text{g/cm}^3$; reikalingas medžiagos kiekis kubiniam metrui betono - $3,5\text{kg/m}^3$. Šio priedo charakteristikos:

- padidina užšalimo/atšilimo ciklą metu vandens plėtimosi erdvę;
- sumažina vandens įgėrį;
- beveik neturi įtakos stipriui gniuždant;
- galima naudoti šį priedą net ir labai tankiuose betonuose.

6.7. Orą įtraukiantis priedas.

Šių įmaišų įdėjus betoną maišant mišinyje susidaro tam tikras kiekis smulkių vienodai pasiskirsčiusių uždarytų porų, kurios lieka betonui sukietėjus. Jos, betonui šalant, veikia kaip daug atskirų "išsiplėtimo indų", taip padidindamos jo atsparumą šalčiui kietame būvyje. Papildas daro betoną lengvai apdirbamą ir plastišką. Papildas Sika® Aer - S sertifikuotas Švedijos patikrų institute dėl atitikimo šių normų reikalavimams: • EN 480-1 • EN 934-2.

Techniniai duomenys:

- pavidalas - skaidrus skystis;
- tankis 1,10 kg/l;
- pH vertė - apie 9;
- chloridų kiekis medžiagoje < 0,1% medžiagos svorio;
- šarmų sudėtis, Na₂O ekviv. < 0,1% medžiagos svorio;
- korozinės savybės - netaikoma, jeigu laikomasi naudojimosi instrukcijos;
- sausasis likutis - apie 4,5%;
- klampumas - lengvai takus, skystis.

7. Eksperimento tyrimų rezultatai ir jų apibendrinimas

Eksperimento esmė nustatyti betono bandinių gniuždymo ir tempimo skėlimu stirpius, tankių palyginimai grafiškai, masę hidrosstatinėmis svarstyklėmis po 2 parų mirkymo, vandens įgeriamumo kinetikos nustatymą ir betono atsparumo šalčiui prognozavimą, kapiliarinį šaldymo metodą bei masių nuostolius, vandens įgėrį ir tūrinį šaldymo metodą.

7.1. Bandinių sudarymas.

Eksperimentui sudaromos 4 skirtingos betono (C30/37 S3 XF4) sudėtys – kontrolinė (be priemaišų), su orą įtraukiančiu priedu, su orą formuojančiu cheminiu priedu ir su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais. Visi mišiniai (7.1.1 lentelėje.) projektuoti pagal kontrolinę sudėtį, tačiau kituose trijuose buvo dedamos papildomos priemaišos, kurios pagerino betono poringumą.

7.1.1 lentelė. Bandiniams naudojamos sudėtys.

Eilės numeris	Sudėties pavadinimas	Kontrolinė betono sudėtis (K)	Su orą įtraukiančiu priedu (I)	Su chemiškai orą formuojančiu priedu (Ch)	Su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais (DO)
1	Projektuojama sudėtis	10 litrų kiekis (medžiagos skaičiuojamos kilogramais kg.)			
2	Cementas (CEM I 42,5R)	3,400	3,400	3,400	3,400
3	Vanduo	1,600	1,600	1,600	1,600
4	Smėlis (fr. 0/4)	9,040	9,040	9,040	9,040
5	Granitinė skalda (fr 4/16)	9,790	9,790	9,790	9,790
6	Plastiklis	0,0238	0,0238	0,0238	0,0238
7	Papildoma įmaiša	-	0,002	0,005	0,018
8	Projektuojama sudėtis	1 m ³ kiekis (medžiagos skaičiuojamos kilogramais kg.)			
9	Cementas (CEM I 42,5R)	340	340	340	340
10	Vanduo	160	160	160	160
11	Smėlis (fr. 0/4)	904	904	904	904
12	Granitinė skalda (fr 4/16)	979	979	979	979
13	Plastiklis	2,38	2,38	2,38	2,38
14	Papildoma įmaiša	-	0,20	0,50	1,80
15	Betono mišinio tankis	2385	2386	2386	2387

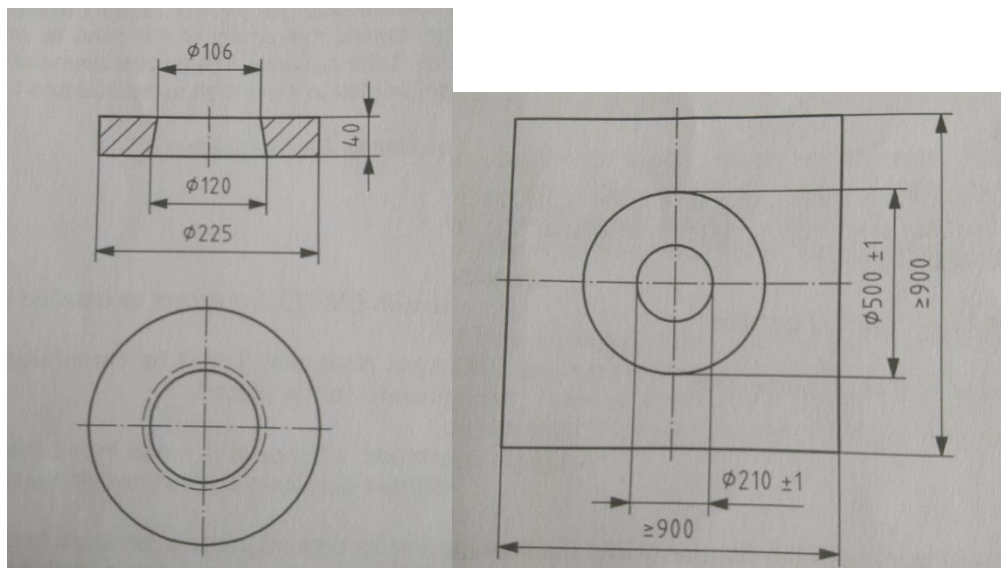
Visų betono mišinių sudėtims buvo naudojamas $V/C = 0,47$ (vandens ir cemento santykis). Šis santykis buvo paskaičiuotas sudarius betono mišinio sudėtį.

Betono mišinys buvo maišomas laboratorijoje naudojant specialią betono maišyklę. Sumaišius mišinius, buvo išmatuojama: pasklidimas bei oro kiekis mišinyje, tuomet betono mišinys supiltas į specialias kubelių formas (100 mm x 100 mm x 100 mm kubams sudaryti). Taip sudaryti 24 kubai (kiekvieno mišinio po 6 kubus).

7.2. Betono mišinio pasklidimo tyrimas.

Slankumas (pratekėjimas) ir t_{500} laikas yra reikalingas, tam, kad įvertinti betono pratekėjimą ir konsistencijos susitankinimą betono konstrukcijose. Šis tyrimas grindžiamas slankumo tyrimu, naudojantis LST EN 12350-2:2009 standartu. Šie tyrimai pagrinde naudojami savaime susitankinančio betonui tirti. t_{500} laikas yra išmatuoti pasklidimo greitį ir surasti realią klampą savaime susitankinančiame betone.

Šviežias betonas yra supilamas į kūgį remiantis LST EN 12350-2:2009 standarto slankumo nustatymo testu. Kai kūgis užpildomas betonu, tuomet pasiruošiama matuoti laiką (nuo tada kai staigaus pasukimo-pakėlimo metu yra pakeliamas iki tada kai betonas pasiekia 500 mm ribą), kuris vadinamas t_{500} laikas. Vėliau išmatuojamas didžiausias pasklidusio betono „blyno“ diametras ir kartu išmatuojamas pasklidimas stačiu kampu nuo didžiausio pasklidimo. Matavimo lenta ir jos matmenys pateikiami (7.1 pav.).



7.1 pav. Betono pasklidimo bandymams naudojamos lentos parametrai.

Pasklidimas SF paskaičiuojamas remiantis d_1 ir d_2 reikšmėmis (reikšmių skirtumas negali būti didesnis negu 10 mm).

$$SF = \frac{(d_1 - d_2)}{2} \quad (7.2.1)$$

Čia:

d_1 – didžiausias pasklidimo matmuo;

d_2 – matmuo 90° nuo d_1 .

7.2.1 lentelė. Išmatuoti betono parametrai pasklidimo bandymo metu.

Betono sudėtis	Su sferiniais mikroplastikiniais burbulais (DO)	Kontrolinė betono sudėtis (K)	Su chemiškai orą formuojančiu priedu (Ch)	Su orą įtraukiančiu priedu (I)
Pasklidimas SF, mm	540	515	510	540
t_{500} laikas, s	8	13	11	5

Pagal 7.2.2 ir 7.2.3 lenteles galima pastebėti, kad projektuoti betonai neatitiko savaimės susitankinančio betono rezultatų, nors ir betonai su orą įtraukiančiu priedu ir neatitiko t_{500} pasklidimo laiką. Palyginimas atliktas remiantis LST EN 12350-8:2010 standartu.

7.2.2 lentelė. Pakartojamumo ir atkuriamumo tipinės reikšmės matuojant pasklidimą.

Pasklidimas SF, mm	<600	600 - 750	>750
Pakartojamumas r , mm	n/a	42	22
Atkuriamumas R , mm	n/a	43	28

7.2.3 lentelė. Pakartojamumo ir atkuriamumo tipinės reikšmės t_{500} laikui.

t_{500} laikas, s	<3,5	3,5-6,0	>6
Pakartojamumas r , mm	0,66	1,18	n/a
Atkuriamumas R , mm	0,88	1,18	n/a



a



b



c



d

7.1.1 pav. Betono mišinių pasklidimas; (a) – sferiniais mikro-plastikiniais burbulais, (b) – cheminiu priedas, (c) – kontrolinė sudėtis, (d) – su orą įtraukiančiu priedu.

Vertinant betonų pasklidos klases pagal LST EN 206:2014 standarto, 4.2.1 punkto, 6 lentelės (Pasklidos klasės) visi tirti betonai atitinka SF1 pasklidos klasę (pasklida nuo 500-650). Betono mišinyje, kuriame buvo naudojamas orą įtraukiantis priedas, parodė mažiausią t_{500} pasklidimo laiką. Tai galėjo įtakoti pagerėjusios betono mišinio technologinės bei reologinės savybės, naudojant orą įtraukiantį priedą. Betono mišinys tapo slankesnis ir skystesnis, dėl geresnio tarpusavio dalelių dispersinio poveikio bei tarp dalelių sumažėjusios tarpusavio trinties. Tačiau pažymėtina, kad dėl didesnio oro kiekio betono mišinyje, betono bandiniai bus legvesni, mažesnio tankio, todėl tikėtina sumažės jų stipruminės savybės, kontrolinių bandinių atžvilgiu.

7.3. Betono mišinio oro kiekio nustatymas.

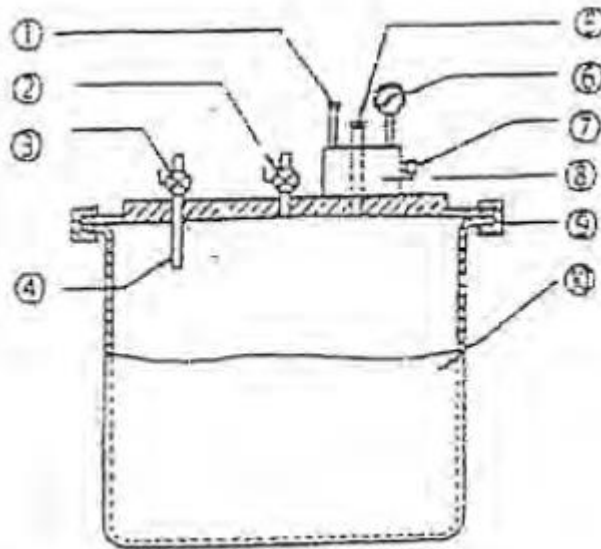
Betono mišinių oro kiekis buvo nustatinėjamas naudojant monometro metodą. Pagal šį metodą buvo iširti visų betono mišinių oro kiekiai, bei palyginti grafiškai. Bandymas atliktas remiantis LST EN 12350-7:2009.

Monometro metodas. Betono mišinys sudedamas į prietaiso indą (7.2 pav.). Indas ir nuimama jo viršūnė turi būti sandarūs, kad uždarius nepraleistų vandens esant 0,2 MPa darbiniam slėgiui. Betono mišinys sutankinamas naudojant betono vibravimo stalą. Ant sutankinto betono mišinio užpilama vandens, uždaromi oro ventiliai, ir sukliamas tam tikras slėgis.

Uždaromas oro išleidimo iš oro kameros ventilis, ir į oro kamerą pumpuojamas oras, kol monometro rodyklė pasiekia pradinio slėgio žymę. Uždaromi abu ventiliai, tada atidaromas (2.3.1 pav. (5)) pagrindinis ventilis. Nuskaitomas monometro rodomas tariamasis oro kiekis – A_{11} . Oro kiekis betono mišinyje apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A_c = A_{11} - G;$$

Čia priimama, kad užpildų pataisos koeficientas $G = h_1 - h_2 = 0$ (h_1 – stambiojo užpildo suslūgimas monometre, h_2 – smulkiojo užpildo suslūgimas monometre).



7.2 pav. Manometro metodo prietaisas. Žymėjimas: 1) pompa; 2) ventilis B;
3) ventilis A; 4) prailgintas kalibravimo vamzdelis; 5) pagrindinis oro ventilis;
6) manometras; 7) oro išleidimo ventilis; 8) oro kamera; 9) prispaudimo mechanizmas;
10) indas.

Oro kiekis užrašomas (7.3.1 lentelėje) suapvalinus 0,1% tikslumu.

7.3.1 lentelė. Betono mišinių oro kiekis.

Mišinio pavadinimas	Su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais (DO)	Kontrolinė betono sudėtis (K)	Su chemiškai orą formuojančiu priedu (Ch)	Su orą įtraukiančiu priedu (I)
Ištirtas oro kiekis mišinyje, %	1,7	3,1	4,1	8,0

Pagal gautas oro kiekio reikšmes, galime pastebėti, kad mišinyje kuriame buvo naudojamas orą įtraukiantis priedas oro kiekis sudarė net 8% mišinio tūrio. Sudėtyse naudojant kito tipo uždaras poras formuojančius priedus, oro kiekio vertės betono mišinyje buvo mažesnės. Kontrolinėje sudėtyje nustatytas oro kiekis buvo 3,1%. Nustatyta, kad naudojant orą įtraukiančius priedus, bei cheminiu būdu oro poras formuojančias įmaišas, oro kiekis, lyginant su kontroliniu mišiniu didėja, tuo tarpu įvedant dirbtinai suformuotas poras, oro kiekis betono mišinyje lyginant su kontroline sudėtimi mažėja. Remiantis technine literatūra (Desing and control of concrete mixtures, 15th edition, p.120-122) 1% oro betono mišinyje gniuždymo stiprį sumažina 4-6 % todėl tikėtina, kad mažiausios gniuždymo stiprio vertės bus sudėtyse kuriose buvo naudojamas orą įtraukiamas priedas, tuo tarpu didžiausios vertės sudėtyse, kuriose buvo naudojama sferiniai mikro-plastikiniai burbulai.

Pagal (7.3.1 lentelę) nustatyta, kad naudojant orą įtraukiančias įmaišas betono mišiniuose, oro kiekis didėja, tai galime paaiškinti tuo, kad bendrame betono mišinio tūryje papildomai susidaro mikroporos, kurios tikėtina, kad sukietėjusiam betone atliks rezervinių, didinančių atsparumą šalčiui, porų funkciją.

Tyrimai parodė, kad įvedus dirbtines, kieto pavidalo poras, oro kiekis betono mišinyje sumažėja lyginant su kontroliniu bandiniu. Tai galime paaiškinti tuo, kad betono mišiniai kuriuose buvo dedamos kieto pavidalo poros išėjo slankesni, mažesnės klampos bei paviršinių įtempių, todėl žymiai lengviau pasišalino esantis oras betono mišinyje.

7.4. Betono bandinių gniuždymo stiprio nustatymas.

Betono gniuždymo stipris nustatomas išbandžius 100mm x 100mm x 100mm kubus, juos kietinus 100% drėgnoje aplinkoje 28 paras (7.3 pav.). Gniuždymui naudojamas presas. Rezultatai pateikiami (7.4.2 lentelėje bei 7.4 pav. grafiškai). Bandymai atlikti remiantis LST EN 12390-2:2009.



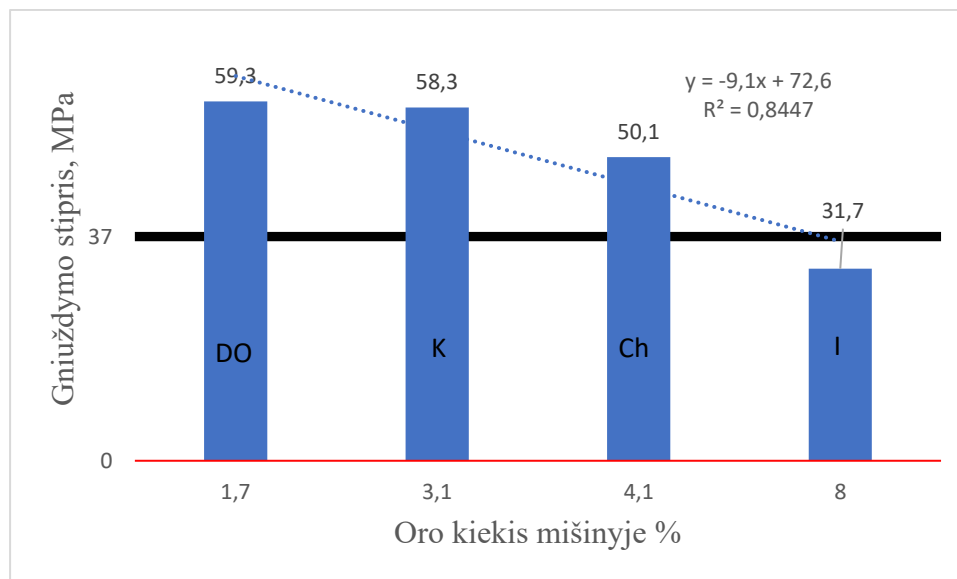
7.3 pav. Kietinami betono kubai.

2.4.1 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai.

Kubo pavadinimas	Matmenys, mm			Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Gniuždymo jėga, kN	Gniuždymo stipris, MPa
DO-4	101	101	101	2491	2418	637,2	59,3
K-3	101	102	101	2498	2401	632,4	58,3
Ch-4	101	101	102	2496	2399	537,5	50,1
I-6	101	100	101	2310	2264	337,5	31,7

Pagal gautus duomenis galima pastebėti visi betonai atlaikė savo kubinį stiprį su didele atsarga, tačiau bandinys su orą įtraukiančiu priedu neatlaiko reikiamojo gniuždymo stiprio $f_{c,kub} = 37\text{MPa}$ todėl, galima teigti, kad parinkta sudėtis neatitinka C30/37 klasės betono, dėl per didelio gauto oro kiekio betono mišinyje, tačiau tyrimas bus tęsiamas toliau.

Atlikus eksperimentus buvo paskaičiuotas gniuždymo stiprio pokytis nuo oro kiekio betono mišinyje. Gauta, kad 1% oro betono mišinyje, gniuždymo stiprį sumažina maždaug 12,5%. Tuo tarpu remiantis technine literatūra (Desing and control of concrete mixtures, 15th edition, p.120-122), 1% oro betono mišinyje gniuždymo stiprį sumažina maždaug 4-6%. Lyginant su eksperimentiniais duomenimis, gautas pokytis yra didesnis nei, kad remiantis technine literatūra, kadangi skaičiavimai buvo atlikti tik išbandžius keletą bandinių.



7.4 pav. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo oro kiekio.

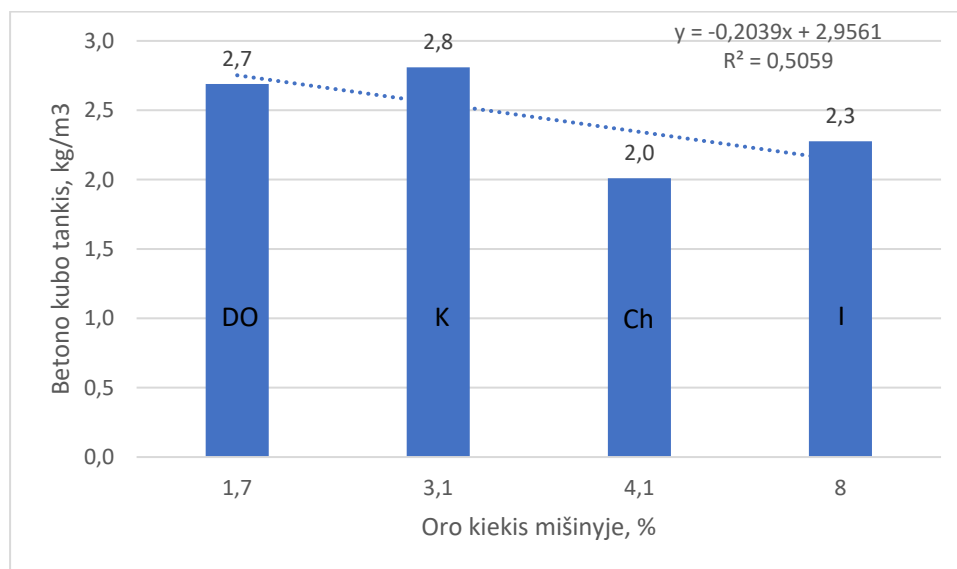
Diagramoje galime pastebėti gniuždymo stiprio priklausomybę nuo oro kiekio mišinyje, pastebime, kad mišinyje su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais (1,7%) yra didžiausias gniuždymo stipris. Tad galime teigti, jog kuo mažesnis oro kiekis mišinyje, tuo didesnis betono gniuždymo stipris.



7.5 pav. Sugniuždyti bandiniai.

Kaip matome (7.4 pav.) bandinys su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais atlaikė didžiausią gniuždymo stiprį, nes jame buvo gautas mažiausias oro kiekis 1,7%, tai parodo jog kuo mažiau mišinyje oro, tai tuo didesnę gniuždymo stiprį galima gauti. Todėl lyginant su oro įtraukiančio priedo bandinio stipriu, kuris net netenkina C30/37 betono stiprumo, oras turėjo didelę reikšmę, nes šiame kube buvo net 8 % oro.

Palyginus gniuždymo stiprio pokyčio rezultatus su sukietėjusio betono tankio pokyčio rezultatais, galime pastebėti tokias tendencijas, jog bandiniuose, kuriuose yra didžiausias tankis gaunami didžiausi gniuždymo stiprio rezultatai (7.6 pav.). Mažėjant tankiui tiesiškai, pagal $y = -46,4x + 2486,5$ priklausomybę, mažėja bandinių gniuždymo stipris. Galime išvelgti, kad tankio ir stipruminių savybių pokytis koreliuoja su oro kiekiu betone.

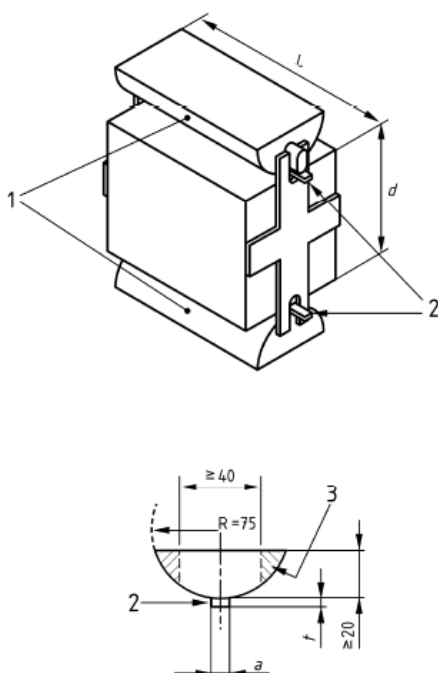


7.6 pav. Betono bandinio stiprio priklausomybė nuo tankio.

7.5. Betono bandinių tempimo stiprio skėlimu nustatymas.

Bandant kubus, rezultatas gaunamas maždaug 10 % didesnis negu bandant cilindrus. Taip pat 150mm bandinių tempimo stipris skėlimu mažesnis negu 100 mm kubelių

Nustatant tempimo stiprį skėlimu, buvo naudojamas specialus apkrovimo rėmas (7.6.1pav.). Jėga perduodama per tarpiklius. Apkrovos didėjimo greitis turi būti nuo 0,04 MPa/s iki 0,06 MPa/s. Apkrova turi didėti be smūgių ir pertrūkių pastoviu greičiu. Bandymas atliktas remiantis LST EN 12390-6 standartu.



7.6.1 pav. Tempimo stiprio skėlimu nustatymas, naudojant kubo formos bandinius (LST EN 12390-6:2009): 1 - plieninė ritinio formos nuopjova; 2 - kietlentės tarpiklis; 3 - nuopjovos skerspjūvis.

Tempimo stipris skėlimu apskaičiuojamas pagal (7.5.1 formulę):

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}; \quad (7.5.1)$$

Čia:

F – didžiausia ardomoji jėga, N;

L- bandinio kontaktinės linijos ilgis, mm;

d – bandinio skerspjūvio matmuo, mm.

Skaičiavimo duomenys pateikiami (7.5.1 lentelėje).

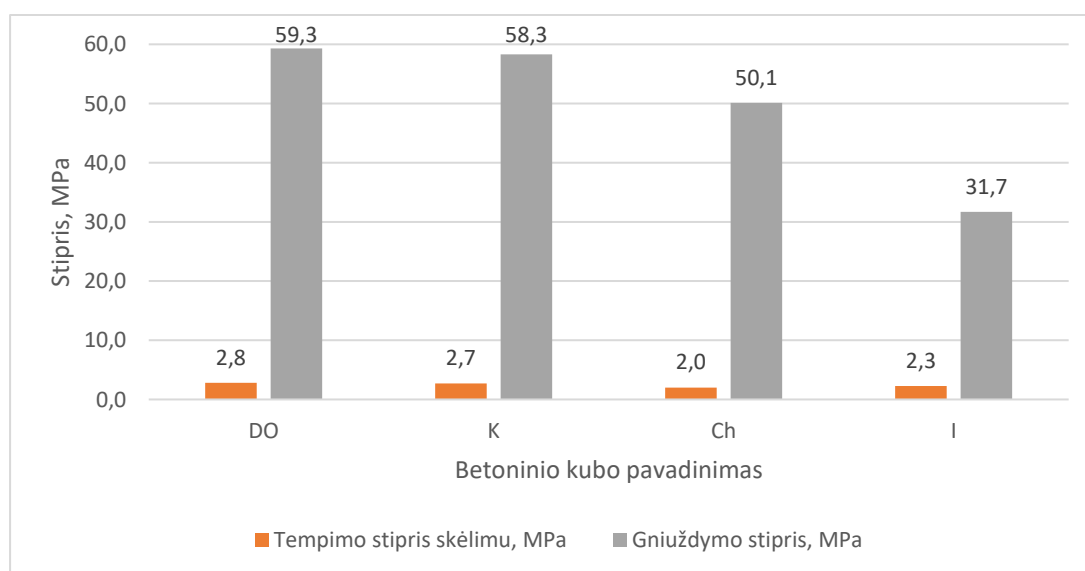
7.5.1 lentelė. Tempimo stiprio skėlimu skaičiavimo rezultatai.

Kubo pavadinimas	Matmenys, mm			Tempimo jėga skėlimu, kN	Tempimo stipris skėlimu, MPa
DO-6	101	101	101	45	2,8
K-1	101	102	101	43,5	2,7
Ch-2	101	101	102	32,5	2,0
I-1	101	100	101	36,1	2,3

Atlikus bandymą bandinių tempimo stiprio skėlimu, galime pastebėti, jog gavome didžiausią stiprį bandinio su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais visai kaip ir gniuždant bandinį su tokia pat sudėtimi. Tai parodo, kad kaip ir gniuždymo stiprio taip ir tempimo stiprį skėlimu, gaunami didžiausi stipriai tuomet kai oro kiekis mišinyje yra mažiausias (1,7%).

Palyginant gniuždymo bandymą ir tempimo skėlimu bandymą galime pastebėti, kad gniuždymo stipriai visų sudėčių buvo apytikriai 20 kartų didesni negu tempimo stipriai skėlimu (7.7 pav.).

Galime pastebėti, kad gavome keletą skirtumų nuo gniuždymo stiprio bandymo ir tempimo stiprio skėlimu. Remiantis moksline literatūra, yra nustatyta, kad stiprio skeliant rezultatų variacijos yra didesnės, nei gniuždymo stiprio, nes galutinius stiprio rezultatus įtakoja daug faktorių, todėl paprastai techninėje literatūroje pagrindinis stipruminių charakteristikų parametras yra betoninių bandinių gniuždymo stipris.



7.7 pav. Tempimo stiprio skėlimu ir gniuždymo palyginimas.

7.6. Betono bandinių vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas.

7.6.1. Vandens įgėrio nustatymas.

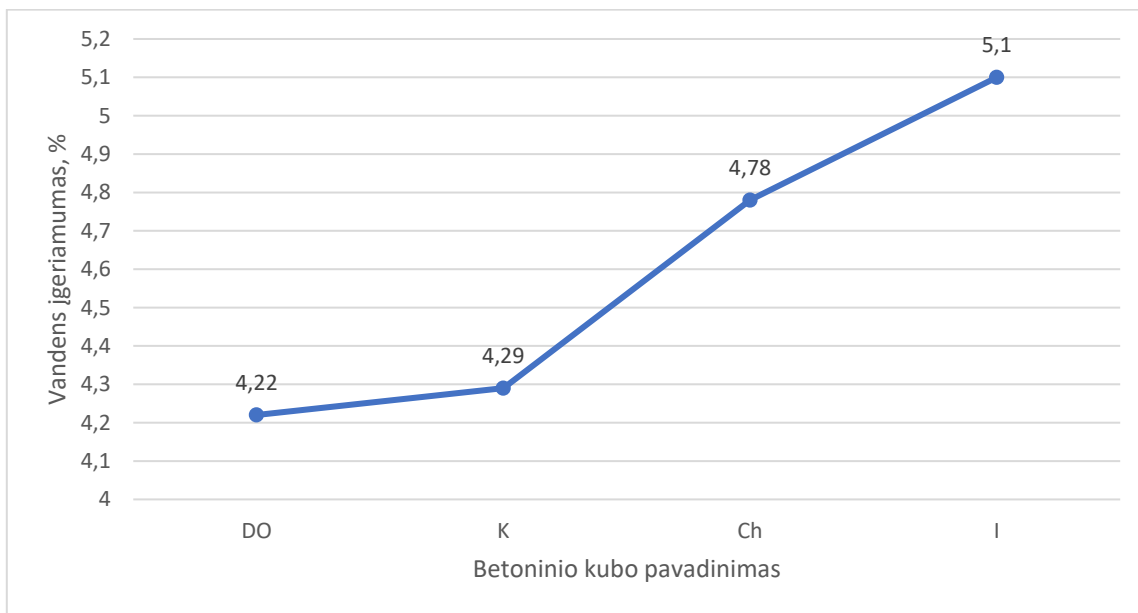
Vandens įgėris taip pat parodo struktūros charakteristikas ir turi įtakos stiprumui ir šilumos laidumui. Betone vandens įgėris priklauso nuo betono rūšies, sudėties, struktūros formavimo būdo. Gamybai naudojant daugiau skirtingų įmaišų betono vandens įgėrį galima sumažinti 15-25%. Drėgmė betone susidaro iš liekamosios technologinės drėgmės ir bandiniams absorbuojant oro drėgmę bei dirbinių sąlyčio su vandenio metu veikiant hidrostatiniam slėgiui, virsta kondensatu. Absorbuotos drėgmės kinta betone, veikiant aplinkos temperatūrai. Iš betono porų sunkiai pasišalina tas vanduo, kuris įsigeria esant bandiniams atvira ore. Toks vanduo pakyla kapiliarais ir užpildo stambesnes poras. Vandens įgėris priklauso nuo betono tankio.

Šis bandymas atliktas bandinius išdžiovinus iki visiškai sauso bandinio (krosnyje 105°C temperatūroje). Rezultatai pateikiami (7.6.1 lentelėje).

7.6.1 lentelė. Vandens įgėris.

Kontrolinė sudėtis be priedų (K)	Bandinio numeris	Sausas bandinys, g	Po 15 min, g	Po 60 min, g	Po 24 h, g	po 48 h, g	Bandinio masė g, hidrostatinėmis svarstyklėmis	%	Vidurkis, %
	K-1,1	623,66	637	644,11	647,95	648,14	384,27	3,93	4,29
K-1,2	615,97	629,81	636,41	639,42	639,98	382,4	3,90		
K-1,3	510,86	526,48	532,42	535,25	535,4	314,12	4,80		
K-1,4	625,5	643,41	650,43	653,72	653,94	384,34	4,55		
Sudėtis su sferiniais mikroplastikiniais burbulais (DO)	Bandinio numeris	Sausas bandinys, g	Po 15 min, g	Po 60 min, g	Po 24 h, g	po 48 h, g	Bandinio masė g, hidrostatinėmis svarstyklėmis	%	Vidurkis, %
	DO-6,1	514,71	531,03	535,44	537,57	537,72	319,35	4,47	4,22
	DO-6,2	531,25	547,98	553,76	556,37	556,52	328,44	4,76	
	DO-6,3	656,72	672,31	677,82	680,93	681,03	407,99	3,70	
	DO-6,4	701,47	718,77	725,02	729,09	729,3	433,84	3,97	
Sudėtis Su chemiškai orą formuojančiu priedu (Ch)	Bandinio numeris	Sausas bandinys, g	Po 15 min, g	Po 60 min, g	Po 24 h, g	po 48 h, g	Bandinio masė g, hidrostatinėmis svarstyklėmis	%	Vidurkis, %
	Ch-2,1	528,43	546,52	553,3	556,12	556,46	322,1	5,30	4,78
	Ch-2,2	510,33	528,3	534,36	537,04	537,14	313,18	5,25	
	Ch-2,3	584,88	599,28	605,4	608,67	608,76	359,4	4,08	
	Ch-2,4	523,94	538,36	544,01	547,15	547,37	320,18	4,47	
Sudėtis su orą įtraukiančiu priedu (I)	Bandinio numeris	Sausas bandinys, g	Po 15 min, g	Po 60 min, g	Po 24 h, g	po 48 h, g	Bandinio masė g, hidrostatinėmis svarstyklėmis	%	Vidurkis, %
	I-1,1	486,68	499,98	505,09	508,98	508,94	293,45	4,57	5,10
	I-1,2	526,83	541,34	546,92	551,34	551,53	317,16	4,69	
	I-1,3	511,84	532,49	537,05	541,92	541,83	304,43	5,86	
	I-1,4	343,74	356,18	359,81	361,8	361,86	206,26	5,27	

Grafinis duomenų palyginimas pateikiamas (7.8 pav.):



7.8 pav. Betoninių bandinių vandens įgeriamumo kreivė.

Matome, kad gaunamas didžiausias vandens įgėris bandinio su orą įtraukiančiu priedu, dėl to, jog bandinyje susidaro daugiau kapiliarinių oro porų (mikroporų), nei, kad kontroliniame bandinyje, į kurias vanduo ir įsiskverbia. Mažiausiai vandens įgėrė bandinys su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais, dėl susidariusių mažiausių uždaro poringumo verčių bei dėl betono tankio.

Atsižvelgiant į bandinių tankius galime pastebėti, kad ten kur didžiausias sukietėjusio bandinio tankis (7.4.1 lentelė), ten ir įgeriamumas mažiausias (7.8 pav.). Todėl galime daryti prielaidą, jog kuo mažesnis betono tankis, tuo geriau betonas į save įgeria vandenį, todėl norint mažinti betono vandens įgeriamumą reikia didinti betono tankį, bei mažinti kapiliarinį poringumą.

7.6.2. Vandens įgeriamumo kinetikos nustatymas.

Bandiniai ventiliuojamoje (105 ± 5) C⁰ temperatūros džiovykloje buvo džiovinami, kol jie tapo visiškai sausi. Prieš svėrimą bandinys buvo išimtas iš kameros ir atvėsintas iki artimos kambario temperatūros. Tada buvo mirkomas vandenyje 15 minučių, 60 minučių, 24 valandas ir 48 valandas ties kiekvienu laiku bandinys buvo išimamas ir sveriamas. Po dviejų parų bandinys buvo sveriamas vandenyje. Žinant šias bandinių mases apskaičiuojami betono įgėris ir poringumo parametrai (7.8 pav.).

Vandens įgėris pagal masę:

$$W_p = \frac{m_{48} - m_s}{m_s} \times 100, \% \quad (7.6.1)$$

čia:

m_{48} - bandinio masė po 48 val. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g.

Tankis:

$$T = \frac{m_s}{m_{48} - m_v} \times 1000, \text{ kg/m}^3 \quad (7.6.2)$$

čia:

m_{48} - bandinio masė po 48 val. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g;

m_v – bandinio masė vandenyje po 48 val. mirkymo, g.

Vandens įgėris pagal tūrį :

$$W_{p(t)} = (W_p \times T) / 1000, \% \quad (7.6.3)$$

čia:

W_p – vandens įgėris pagal masę, %;

T – tankis, kg/m^3 .

Vandens įgėris po 15 min. :

$$W_1 = \frac{m_{15} - m_s}{m_s} \times 100, \% \quad (7.6.4)$$

čia:

m_{15} - bandinio masė ore po 15 min. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g.

Vandens įgėris po 60 min. :

$$W_2 = \frac{m_{60} - m_s}{m_s} \times 100, \% \quad (7.6.5)$$

čia:

m_{60} - bandinio masė ore po 60 min. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g.

Santykiai :

$$W_{1(s)} = \frac{W_1}{W_p}, \% \quad (7.6.6)$$

čia:

W_1 – vandens įgėris po 15 min.;

W_p – vandens įgėris pagal masę.

$$W_{2(s)} = \frac{W_2}{W_p}, \% \quad (7.6.7)$$

čia:

W_2 – vandens įgėris po 60 min.;

W_p – vandens įgėris pagal masę.

Iš standarte GOST 12730.4 – 78 pateiktos nomogramos tirtam betonui parenkami porų dydį apibūdinantys santykiniai rodikliai: porų vienodumo rodiklis - α , porų pasiskirstymas pagal dydį rodiklis - λ_1 .

Vidutinių porų dydžių rodiklis:

$$\lambda = \lambda_1 (1 / \alpha) \quad (7.6.8)$$

Bendras poringumas:

$$P_p = \left(1 - \left(\frac{T}{2690} \right) \right) \times 100, \% \quad (7.6.9)$$

čia:

T – tankis, kg/m^3 .

Atviras poringumas:

$$P_a = W_{p(t)}, \% \quad (7.6.10)$$

čia:

$W_{p(t)}$ – vandens įgėris pagal tūrį, %.

Uždaras poringumas:

$$P_u = P_p - P_a, \% \quad (7.6.11)$$

čia :

P_p – bendras poringumas, %;

P_a – atviras betono poringumas, %.

Atsparumo šalčiui kriterijus:

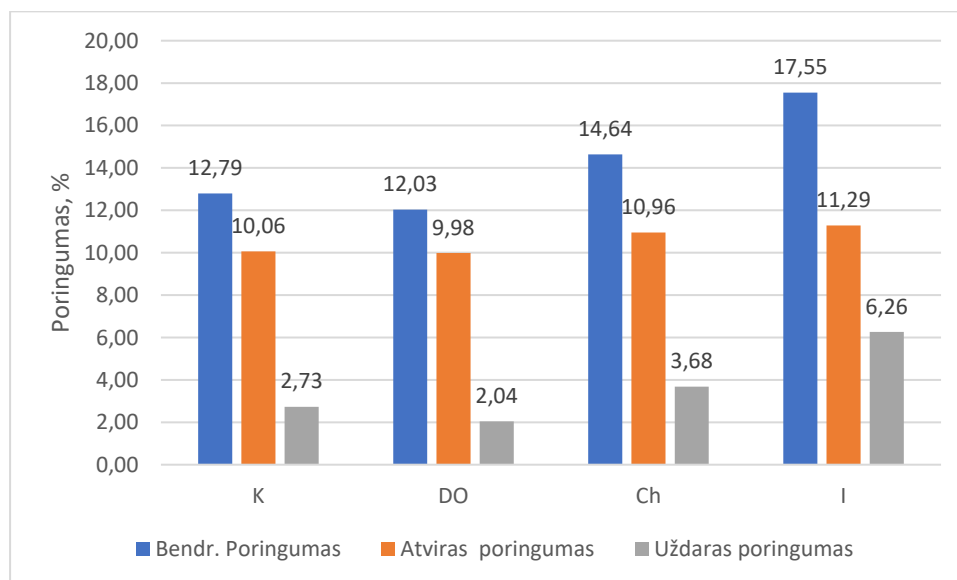
$$K_{\text{š}} = \frac{P_u}{(0,09 \times P_a)} \quad (7.6.12)$$

čia :

P_u – uždaras betono poringumas (oro kiekis betone), %;

P_a – atviras betono poringumas, %.

Pastebėjus (7.9 pav.) didžiausias bendras poringumas gaunamas bandinio su orą įtraukiančiu priedu 17,55%, dėl didelio poringumo bandinio tankis gaunamas mažiausias. Palyginus su kontrolinės sudėties bandiniais, galime pastebėti, jog bandiniuose su orą įtraukiančiu priedu bendras poringumas didesnis 1,4 karto, atviras su uždaru atitinkamai didesni 1,12 karto ir 2,3 karto. Taip pat atitinkamai palyginus sudėtį su orą įtraukiančiu priedu, sferiniais mikro-plastikiniais burbulais ir orą formuojančiu cheminiu priedu yra gaunama, kad poringumas didesnis: bendro poringumo DO – 1,46 karto, Ch – 1,2 karto; atviras poringumas DO – 1,13 karto, Ch – 1,03 karto; uždaras poringumas DO – 3,07 karto, Ch – 1,7 karto. Remiantis teorija bei atsparumo šalčiui kriterijumi K_s , bandiniai su didesniu uždaru poringumu (naudojant orą įtraukiančius priedus bei orą formuojantį cheminį priedą) turėtų atlaikyti didesnę užšaldymo/atšildymo ciklą kiekį.



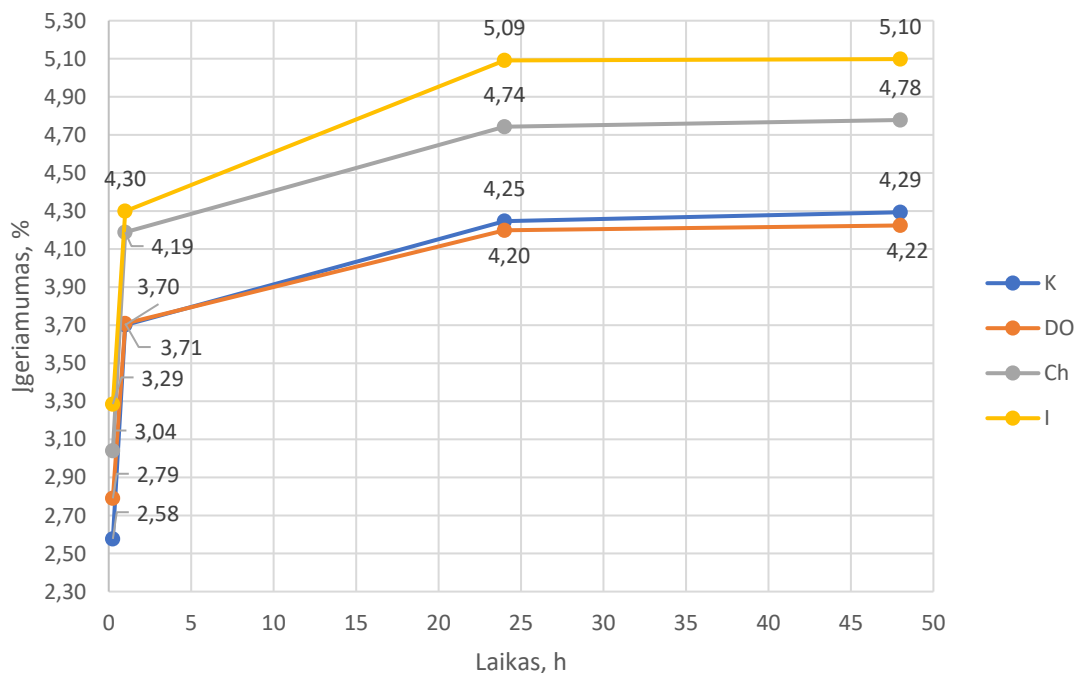
7.9 Bandinių poringumų palyginimai.

7.6.2.1 lentelė. Betono uždaro/atviro poringumo nustatymas pagal įgeriamumo kinetiką.

Bandinių nr. / Pavadinimas	Bandinio masė, g						Wp,% po 48h	Tankis ρ, kg/m ³ sauso band.	Wp(t),% pagal turį	Wt ₁ ,% po 15min	Wt ₂ ,% po 1h	Wt ₃ ,% Po 24h	W _{t1} arba W ₁ /W _p	W _{t2} arba W ₂ /W _p	Bendr. Poringumas	Atviras poringumas	Uždaras poringumas	Atsparumo šalčiui kriterijus	Prognozuojamas atsparumas šalčiui, ciklais
	Masė sauso	Po 15 min	Po 1h	Po 24h	Po 48h	Masė vandenyje									P, %	P _a , %	P _u , %	K _s	F, ciklais
K-1,1	623,66	637,00	644,11	647,95	648,14	384,27	3,93	2364	9,28	2,14	3,28	3,89	0,54	0,84	12,14	9,28	2,86	3,43	550,27
K-1,2	615,97	629,81	636,41	639,42	639,98	382,40	3,90	2391	9,32	2,25	3,32	3,81	0,58	0,85	11,10	9,32	1,78	2,12	324,41
K-1,3	510,86	526,48	532,42	535,25	535,40	314,12	4,80	2309	11,09	3,06	4,22	4,77	0,64	0,88	14,18	11,09	3,09	3,09	494,81
K-1,4	625,50	643,41	650,43	653,72	653,94	384,34	4,55	2320	10,55	2,86	3,99	4,51	0,63	0,88	13,75	10,55	3,20	3,37	541,61
Vidurkiai							4,29	2345,91	10,06	2,58	3,70	4,25	0,60	0,86	12,79	10,06	2,73	3,02	482,20
DO-6,1	514,71	531,03	535,44	537,57	537,72	319,35	4,47	2357	10,54	3,17	4,03	4,44	0,71	0,90	12,38	10,54	1,84	1,94	289,77
DO-6,2	531,25	547,98	553,76	556,37	556,52	328,44	4,76	2329	11,08	3,15	4,24	4,73	0,66	0,89	13,41	11,08	2,33	2,34	364,21
DO-6,3	656,72	672,31	677,82	680,93	681,03	407,99	3,70	2405	8,90	2,37	3,21	3,69	0,64	0,87	10,59	8,90	1,68	2,10	320,47
DO-6,4	701,47	718,77	725,02	729,09	729,30	433,84	3,97	2374	9,42	2,47	3,36	3,94	0,62	0,85	11,74	9,42	2,32	2,74	434,56
Vidurkiai							4,22	2366,41	9,98	2,79	3,71	4,20	0,66	0,88	12,03	9,98	2,04	2,27	352,65
Ch-2,1	528,43	546,52	553,30	556,12	556,46	322,10	5,30	2255	11,96	3,42	4,71	5,24	0,65	0,89	16,18	11,96	4,22	3,92	628,17
Ch-2,2	510,33	528,30	534,36	537,04	537,14	313,18	5,25	2279	11,97	3,52	4,71	5,23	0,67	0,90	15,29	11,97	3,32	3,08	493,08
Ch-2,3	584,88	599,28	605,40	608,67	608,76	359,40	4,08	2346	9,58	2,46	3,51	4,07	0,60	0,86	12,81	9,58	3,23	3,75	601,80
Ch-2,4	523,94	538,36	544,01	547,15	547,37	320,18	4,47	2306	10,31	2,75	3,83	4,43	0,62	0,86	14,27	10,31	3,96	4,26	676,63
Vidurkiai							4,78	2296,29	10,96	3,04	4,19	4,74	0,63	0,87	14,64	10,96	3,68	3,73	599,73
I-1,1	486,68	499,98	505,09	508,98	508,94	293,45	4,57	2258	10,33	2,73	3,78	4,58	0,60	0,83	16,04	10,33	5,71	6,14	897,16
I-1,2	526,83	541,34	546,92	551,34	551,53	317,16	4,69	2248	10,54	2,75	3,81	4,65	0,59	0,81	16,44	10,54	5,90	6,22	915,28
I-1,3	511,84	532,49	537,05	541,92	541,83	304,43	5,86	2156	12,63	4,03	4,93	5,88	0,69	0,84	19,85	12,63	7,22	6,35	953,36
I-1,4	343,74	356,18	359,81	361,80	361,86	206,26	5,27	2209	11,65	3,62	4,68	5,25	0,69	0,89	17,88	11,65	6,23	5,95	858,70
Vidurkiai							5,10	2217,87	11,29	3,29	4,30	5,09	0,64	0,84	17,55	11,29	6,26	6,17	902,64

Iš (7.10 pav.) galime pastebėti kaip kinta bandinių su skirtingomis sudėtimis (K – kontrolinė, DO – su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais, Ch – orą formuojančiu cheminiu priedu, I – orą įtraukiančiu priedu) įgeriamumas kas: 15min, 1h, 24h ir 48h. Galime pastebėti, kad geriausiai vandenį į save įgeria bandinys su orą įtraukiančiu priedu, taip atsitinka, kad bandinyje yra didelis kapiliarinis poringumas, kurio dėka bandinys greitai ir daug įgėrė vandens. Bandinys su kontroline sudėtimi vandens įgėrė mažiausiai; tik per pirmąją valandą, bandinys su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais mažiau vandens įgėrė nei bandinys su kontroline sudėtimi.

Manoma, kad bandinys su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais turėjo didesnę atvirą poringumą vertinant su kontroline sudėtimi, tačiau dėl mažesnio kapiliarinio poringumo ir tvarkingesnio uždaro poringumo (mažesnio oro kiekio 1,7%) bandinys su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais pradėjo mažiau įgerti vandens vertinant bandinį su kontroline sudėtimi.



7.10 pav. Vandens įgeriamumo kreivės.

7.7. Betono bandinių kapiliarinis šaldymas/šildymas.

Atliktas kapiliarinio šaldymo/šildymo bandymas, kurio metu buvo nustatinėjamas keturių betoninių bandinių su skirtingomis sudėtimis: kontrolinė (be priemaišų), su orą įtraukiančiu priedu, su orą formuojančiu cheminiu priedu ir su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais. Bandiniai pateikti (7.11 pav.).

Bandiniai yra pamerkiami į 3% NaCl druskos tirpalą (pamirkoma maždaug 1-2 cm bandinio aukščio (7.12 pav.)), tada indas su bandiniais ir druskos tirpalu yra izoliuojami, kad druskos tirpalas neišgaruotų ir įdedama į ciklinį šaldytuvą. Atliekant bandymą reikia bandinius tikrinti po kiekvieno ciklo, vizualiai patikrinti bandinių išorę, bei pažiūrėti ar kuris nors bandinys nepradėjo irti.

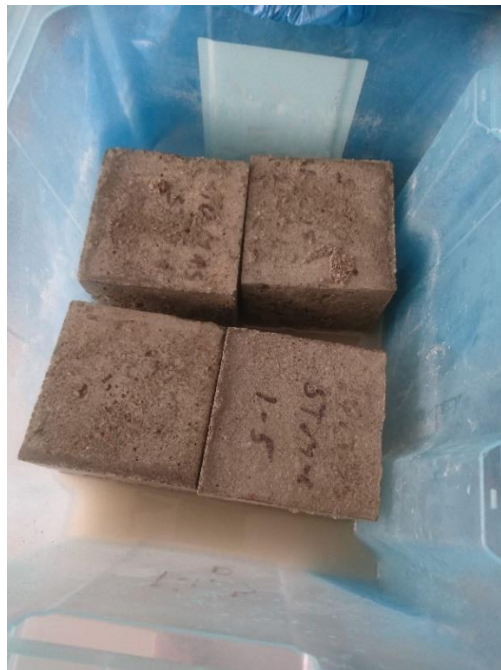


7.11 pav. Betoniniai kubai paruošti paviršiniam šaldymui/šildymui.



7.12 pav. Betoninių bandinių užpylimų druskos tirpalo aukštis.

Šiame bandyme iki šiol yra atlikti 14 šalčio ciklų, po šių ciklų (7.13 pav.) galime pastebėti, kad bandiniai jau yra šiek tiek pasikeitę, matosi nedidelių nutrupėjimų bei paviršiaus komponentų atsiskyrimų. Tačiau galima pastebėti, kad estetiniu požiūriu geriausi rezultatai yra bandinyje su orą įtraukiančiu priedu (mažiausia paviršinė erozija). Priimtas sprendimas pratęsti bandymą iki visiško silpniausio bandinio suirimo.



7.13 pav. Betono kubai po 14 ciklų paviršinio šaldymo.

Vertinant bendrą bandinių būklę pagal V. Šestopiorovą (1.1 lentelė), po 14 ciklų paviršinio šaldymo galima skirti 8 balus (atsparumą šalčiui balas), tai reiškia, kad bandiniai turi: briaunų apvalėjimo požymių ir nedidelių lokaliųjų ištrupėjimų šalia neatsparių šalčiui užpildų. Manoma, jog jei bandymas būtų tęsiamas toliau, bandiniai dar po kelerių ciklų būtų visiškai suirę.

7.8. Betoninių bandinių tūrinis šaldymas/šildymas.

Buvo atliktas tūrinio šaldymo/šildymo bandymas, kurio metu buvo nustatinėjama keturių skirtingų sudėčių betono atsparumas šalčiui (betono sugebėjimas be didesnio irimo požymių išlaikyti užšaldymą ir atšildymą). Šiame tyrime tikrinama ar betono bandiniai su skirtingomis sudėtimis, sugebės atlaikyti atsparumo šalčiui markes F200 ir F300. Jeigu visi paruošti bandiniai atlaikys F300, tuomet jie bus paliekami pažiūrėti kiek sugeba atlaikyti ciklų iki žymių bandinio pasikeitimų.

Bandiniai yra sužymimi ir sudedami į specialią kamerą, kurioje cikliškai yra šaldoma ir šildoma.



7.14 pav. Tūrinio šaldymo rezervuaras.

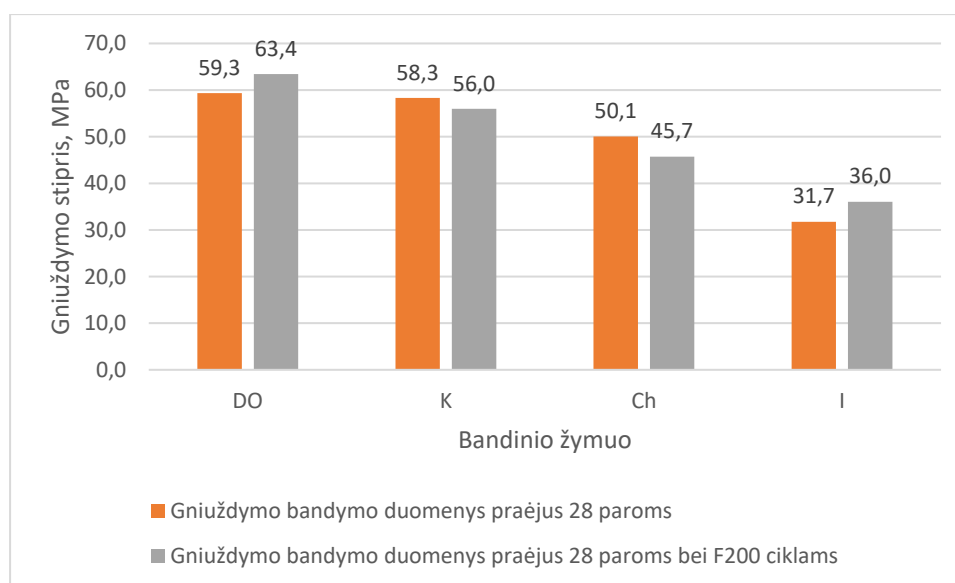


7.15 pav. Betoniniai bandiniai paruošti tūriniam užšaldymui/atšildymui.

7.8.1. Betono bandinių gniuždymas praėjus F200 ciklams.

7.8.1.1 lentelė. Betono bandinių gniuždymo stiprio palyginimas.

Gniuždymo bandymo duomenys praėjus 28 paroms							
Kubo pavadinimas	Matmenys, mm			Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Gniuždymo jėga, kN	Gniuždymo stipris, MPa
DO-4	101	101	101	2491	2418	637,2	59,3
K-3	101	102	101	2498	2401	632,4	58,3
Ch-4	101	101	102	2496	2399	537,5	50,1
I-6	101	100	101	2310	2264	337,5	31,7
Gniuždymo bandymo duomenys praėjus 28 paroms bei F200 ciklams							
Kubo pavadinimas	Matmenys, mm			Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Gniuždymo jėga, kN	Gniuždymo stipris, MPa
DO-1	101	101	101	2530	2456	681,1	63,4
K-2	99	100	101	2410	2410	583,2	56,0
Ch-1	102	101	99	2385	2338	495,6	45,7
I-3	101	99	100	2295	2295	379,3	36,0



7.16 pav. Stiprių gniuždant palyginimas.

Galime pastebėti, jog lyginant stiprius po 28 parų kietėjimo bei po 28 parų kietėjimo ir F200 ciklą didelių skirtumų nepastebime, kai kur stipriai net yra ir padidėję (sudėtyje su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais DO ir sudėtyje su orą įtraukiančiu priedu I). Taip yra todėl, kad bandiniai su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais ir oru įtraukiančiu priedu toliau stiprėjo net ir veikiami užšaldymo/atšildymo ciklų, o tai parodo, jog šiuose bandiniuose gerai pasiskirstė mikroporos, kurios padėjo betonui atlaikyti vandens plėtimąsi (užšalimą). O kontrolinė sudėtis bei sudėtis su orą formuojančiu cheminiu priedu parodė gniuždymo stiprio sumažėjimą, taip pat galime manyti, jog tam įtaką padarė betono poringumas. Tačiau darant prielaidą, bandinių stipriai gniuždant svyruoja apie 5 MPa, tai atitinka nominalų 10% skirtumą tarp bandinių stiprių, tad galima tegti, kad visų sudėčių bandiniai atlaikė F200 ciklus.

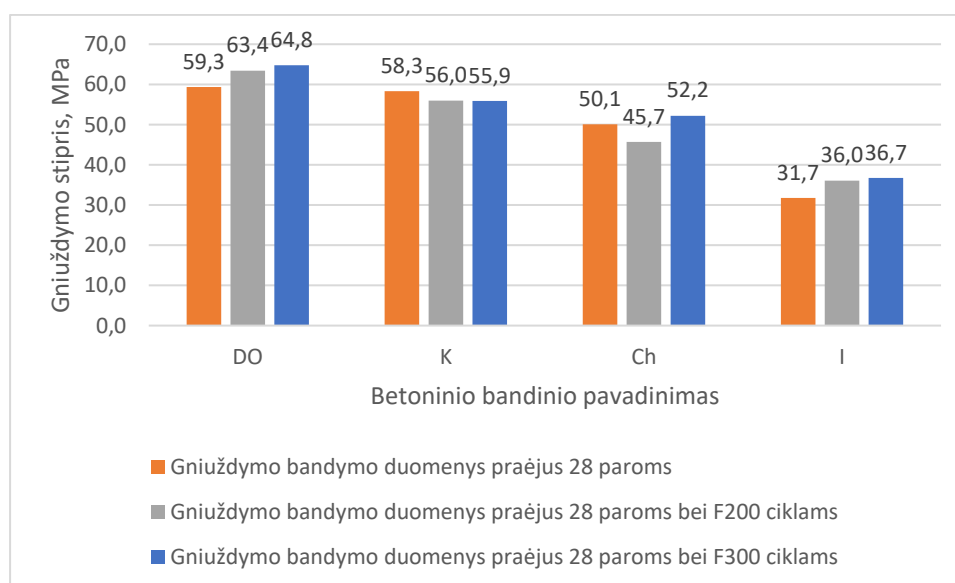


7.17 pav. Sugniuždyti betoniniai bandiniai po 28 parų ir F200 ciklų.

7.8.2. Betono bandinių gniuždymas praėjus F300 ciklams.

7.8.2.1 lentelė. Betono bandinių gniuždymo stiprio palyginimas.

Gniuždymo bandymo duomenys praėjus 28 paroms								
Kubo pavadinimas	Matmenys, mm			Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Gniuždymo jėga, kN	Gniuždymo stipris, MPa	
DO-4	101	101	101	2491	2418	637,2	59,3	
K-3	101	102	101	2498	2401	632,4	58,3	
Ch-4	101	101	102	2496	2399	537,5	50,1	
I-6	101	100	101	2310	2264	337,5	31,7	
Gniuždymo bandymo duomenys praėjus 28 paroms bei F200 ciklams								
Kubo pavadinimas	Matmenys, mm			Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Gniuždymo jėga, kN	Gniuždymo stipris, MPa	
DO-1	101	101	101	2530	2456	681,1	63,4	
K-2	99	100	101	2410	2410	583,2	56,0	
Ch-1	102	101	99	2385	2338	495,6	45,7	
I-3	101	99	100	2295	2295	379,3	36,0	
Gniuždymo bandymo duomenys praėjus 28 paroms bei F300 ciklams								
Kubo pavadinimas	Matmenys, mm			Svoris, g	Tankis, kg/m ³	Gniuždymo jėga, kN	Gniuždymo stipris, MPa	Gniuždymo stiprio vidurkis, MPa
DO-2	101	101	99	2470	2446	713,3	66,4	64,8
DO-3	98	101	101	2425	2426	657,7	63,1	
K-4	102	101	101	2505	2407	603,3	55,6	55,9
K-6	100	101	100	2500	2475	597,3	56,2	
Ch-3	102	101	101	2470	2374	637,7	58,8	52,2
Ch-5	100	101	97	2355	2404	484,5	45,6	
I-2	100	101	101	2340	2294	397,0	37,3	36,7
I-4	101	97	100	2280	2327	372,6	36,1	



7.18 pav. Stiprių gniuždant palyginimas.

Atsižvelgus į gautus rezultatus (7.8.2.1 lentelė ir 7.18 pav.) pastebime, jog bandiniai su kontroline sudėtimi toliau minimaliai sumažėjo gniuždymo stipris, tačiau tas pamažėjimas nėra akivaizdus vertinant bandinių pradinį stiprumą. Tačiau vertinant kontrolinės sudėties (K) bandinių vizualinę išvaizdą (7.19 pav.), matoma ryškesnių paviršiaus medžiagų nutrupėjimų, kurių dėka galima manyti, jog kontrolinė sudėtis jau ne už ilgio būtų netenkinus gniuždomųjų kriterijų (netenkintų C30/37 betono klasės).

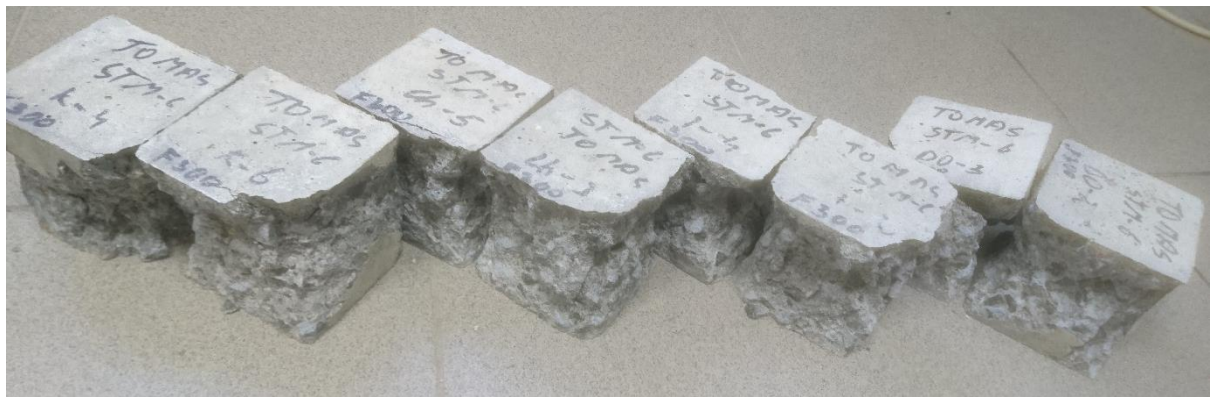
Labiausiai pastebimas pasikeitimas bandinių su orą formuojančiu cheminiu priedu (Ch), kur vertinus bandinius po 28 parų kietėjimo bei bandinius po 28 parų kietėjimo plus F200 šalčio ciklą, buvo matomas gniuždymo stiprio sumažėjimas nuo 50,1 MPa iki 45,7 MPa, o po 28 parų kietėjimo plus F300 šalčio ciklą šios sudėties bandinių gniuždymo stipris padidėjo tiek vertinant pradinę sudėtį, tiek ir po F200 ciklą 52,2 MPa. Galime teigti, kad rezultatai tikslesni po F300 ciklą, nes bandymai atliekami su daugiau bandinių (2 vnt.) vertinant pirmuosius du bandymus (po 1 vnt.). Viską įvertinus matome, kad šios sudėtis gerai atlaikė F300 ciklus ir toliau stiprėjo.

Bandiniai su orą įtraukiančiu priedu (I) toliau sėkmingai stiprėjo po F300 šalčio ciklą ir jau beveik tenkina C30/37 betono klasės kriterijus (gniuždymo stipris po F300 ciklą = 36,7 MPa). Galima manyti, kad bandiniai su šia sudėtimi būtų toliau sėkmingai stiprėję ir ne už ilgio būtų tenkinę C30/37 klasę, taip galime manyti dėl vizualinių (7.19 pav.) šių bandinių rodmenų.

Galiausiai geriausiai atlaikė bandiniai sudėtis su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais (DO), kuri po 28 parų turėjo geriausius gniuždymo bandymo duomenis (po 28 parų gniuždymo stipris = 59,3 MPa) taip pat duomenis (po F200 šalčio ciklą = 63,4 MPa), kuri ir toliau stiprėjus išgavo stiprumą gniuždant (po F300 šalčio ciklą = 64,8 MPa). Manoma, jog dėl šios sudėties bandinių vizualinės išvaizdos (7.19 pav.) kuria jie atlaikė po F300 šalčio ciklą bandiniai ir toliau sėkmingai būtų atlaikę tūrinio šaldymo bandymą, bei galbūt būtų pasiekę net 70 MPa gniuždymo stiprį.



7.19 pav. Bandiniai po 28 parų kietėjimo ir F300 šalčio ciklą.



7.20 pav. Sugniuždyti bandiniai po 28 parų kietėjimo ir F300 ciklą.

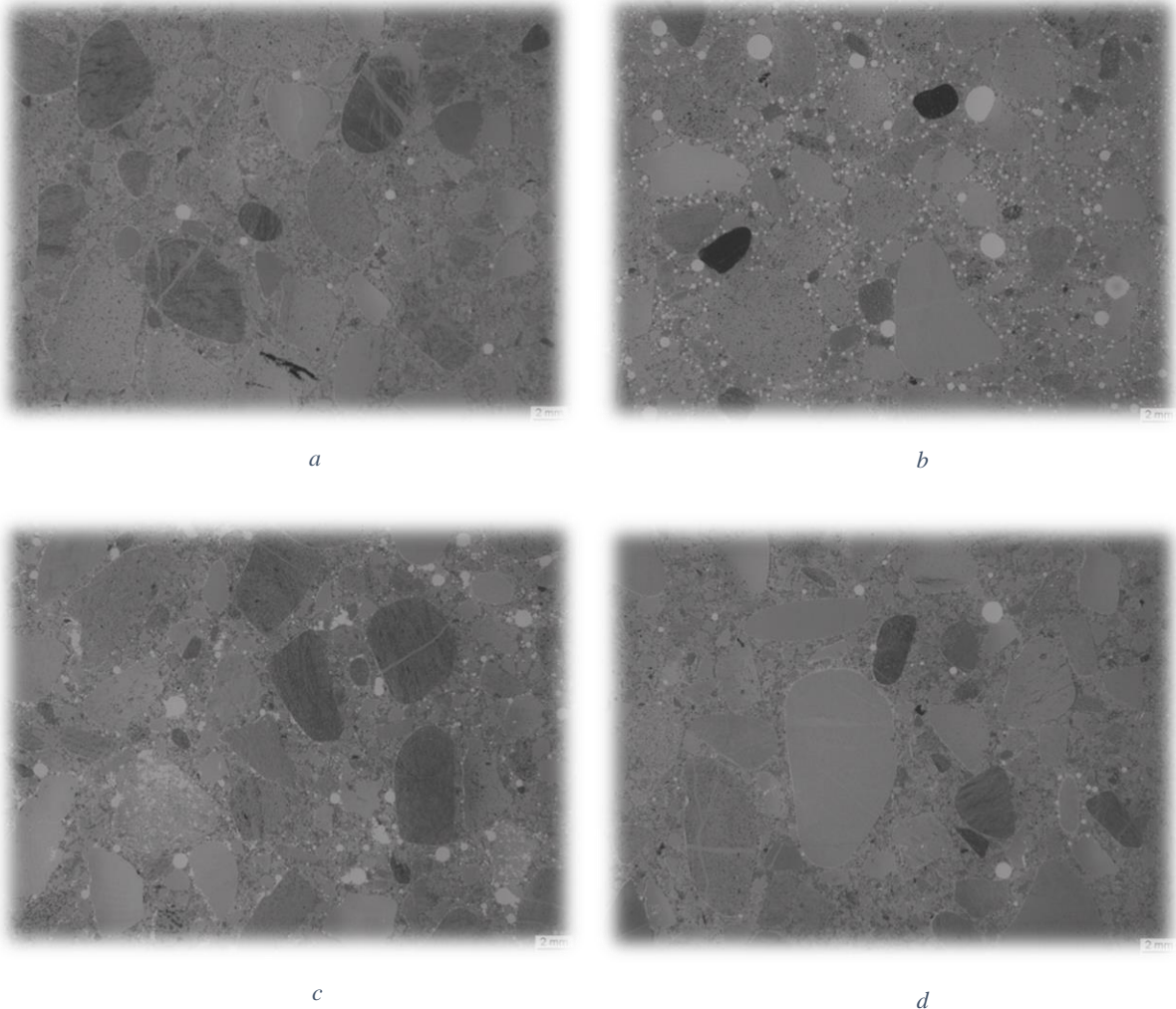
Vertinant visų bandinių rodmenis, galima teigti, jog visi bandiniai sugebėjo išlaikyti savo mechanines savybes, net ir bandiniai su kontroline sudėtimi išlaikė gniuždymo stiprį reikiamose ribose (10% nuo pradinio stiprio po 28 parų).

7.9. Mikroporų kiekio L300 ir atstumo tarp porų faktoriaus nustatymas pagal ASTM C 457 metodiką.

ASTM C 457 yra amerikiečių standartas skirtas nustatyti poringumo parametrus metodo sukietėjusiame betone. Populiariausias šio standarto metodas yra „RapidAir 457 Air Void“, šio metu betono bandinys yra nušlifuojamas ir paruošiamas panaudojus specialias medžiagas, kurios išryškina oro poras bandinyje (paruoštas bandinys yra baltos arba juodos spalvos)

Bandymo eiga:

- 1) Bandiniai yra perpjaunami ir viena pusė nušlifuojama (nupoliruojama);
- 2) Nulyginta pusė yra nudažoma juodu markeriu;
- 3) Užpilama bario sulfatu (balti milteliai), užpilta masė įtrinama į bandinį;
- 4) Perteklinės medžiagos nuvalomos ir vėl paviršius yra nujuodinamas markeriu;
- 5) Sudarytas paviršius yra tiriamas.



7.21 pav. Paruošti bandinių paviršiai. a – kontrolinė sudėtis (K), b – su orą formuojančiu cheminiu priedu (Ch), c – su orą įtraukiančiu priedu (I), d – su sferiniais mikroplastikiniais burbulais (DO).

Kontrolinės sudėties bandinių (7.21 pav. a) nuotraukoje galime pastebėti nedidelį porų kiekį, bei jų netvarkingą pasiskirstymą. Mažas poringumas lėmė didelį pradinį gniuždymo stiprį, tačiau dėl uždarytų porų trūkumo tokie bandiniai yra neatsparūs agresyviai šalčio poveikiui.

Bandinyje su chemiškai oro poras betono mišinyje suformuojančiu priedu (7.21 pav. b) matome smulkių porų struktūrą su dideliu mikroporų kiekiu. Remiantis technine literatūra, norint kad betonas būtų atsparus šalčiui, reikia užtikrinti ne tik tam tikrą oro kiekį betono mišinyje, tačiau oro poros turi būti smulkios ir tolygiai pasiskirsčiusios betono matricoje. Pagal standartų reikalavimus tuo tikslu naudojami taip vadinami atstumo tarp porų (space factor AF, mm) ir mikro porų kiekio (L300, Vol.-%) rodikliai. Atstumo tarp porų rodiklis turi būti $\leq 0,20$ mm, tuo tarpu mikro porų, mažesnių už $300\mu\text{m}$ skersmenį, kiekis turi būti $\geq 1,8\%$ nuo porų kiekio. Remiantis paveikslu galime manyti, kad bandinys su chemiškai oro poras betono

mišinyje suformuojančiu priedu, pilnai atitiko standartų reikalavimus, todėl šios sudėties bandiniai atlaikė F300 šalčio ciklą bandymą.

Sekančioje nuotraukoje (7.21 pav. c) matome daugybę porų, kurios nėra tvarkingai išsidėstę, bei yra vietų kur jų yra didelės koncentracijos. Tai parodo kodėl bandiniai su orą įtraukiančiu priedu (I) atlaiko tokį mažą gniuždymo stiprį. Tačiau bandinius veikiantis šaltis visiškai netrukdo stiprėjimo proceso, kurio metu bandiniai netgi parodė didėjančią stiprį, manoma, jog laikui bėgant bandinys būtų pasiekęs reikiamą stiprį. Taip pat bandiniai (I) po F300 šalčio ciklą neparodė didesnių vizualinių pokyčių. Dėl didelės porų koncentracijos, bandiniai su šia sudėtimi (I) parodė didžiausią prognozuojamą šalčių ciklų skaičių net 902 ciklus.

Galiausiai paskutinėje nuotraukoje (7.21 pav. d) pastebime ganėtinai panašų vaizdą kaip ir kontrolinės sudėties (K) nuotraukoje. Sudėtyje su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais (DO) pastebime ne daug porų todėl, jog tuščios erdvės užpildytos dirbtiniais burbuliukais, kurie nėra matomi. Tačiau bandiniai su šia sudėtimi (DO) veikiami šalčio drėgmei leidžia plėstis į tas vietas kur yra dirbtinis burbulas, taip tokiam betonui ne tik padidiname atsparumą šalčiui, bet ir nesugadiname pradinio gniuždymo stiprio, laikui bėgant stipris netgi didėja (7.18 pav.).

Apibendrinant mikroporų kiekio L300 ir atstumo tarp porų faktoriaus nustatymas pagal ASTM C 457 metodiką bandymą galima teigti, kad visose sudėtyse buvo pakankamai porų, kurios padėjo atlaikyti šalčio ciklus (F200 ir F300) bei po šių ciklų parodyti stiprio augimą (DO, Ch ir I) arba nežymų kritimą (K). Bendrai pažvelgus į nuotraukas galima pastebėti, jog visose sudėtyse yra didesnių porų ir mažesnių. Kadangi, nebuvo gauta priemonių atlikti bandymo L300 (porų kiekio), todėl nuotraukos buvo peržvelgtos vizualiai, vėliau nuspręsta, jog šiame bandyme sąlygas ($\geq 1,8$ – didesnių ir mažesnių už 300 mikronų porų kiekio santykis) būtų tenkinusios sudėtyse: su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais, su orą įtraukiančiu priedu ir su orą formuojančiu cheminiu priedu.

Išvados

Betono atsparumas šalčiui priklauso uždaro poringumo (oro kiekis mišinyje). Didėjant uždaru porų kiekiui, betono atsparumas šalčiui didėja.

Oro poras formuojantys priedai, įpilti į betono mišinį maišymo metu, suformuoja betone mikroporas. Šis veiksnys suformuoja sukietėjusiame cementiniame akmenyje mikroporų struktūrą, kuri labai pagerina betono ilgalaikiškumą, veikiamą vandens užšalimo ir atšilimo ciklų metu. Dėl įtraukto oro padidėja šviežio cementinio mišinio kohezija ir lipnumas. T_{500} pasklidimo vertės geriausios gautos betono mišinyje su orą įtraukiančiu priedu, nes betono mišinys tapo slankesnis ir skystesnis, dėl geresnio tarpusavio dalelių dispersinio poveikio bei tarp dalelių sumažėjusios tarpusavio trinties.

Tyrimai parodė, kad įvedus dirbtines, kieto pavidalo poras, oro kiekis betono mišinyje sumažėja lyginant su kontroliniu bandiniu. Tai galime paaiškinti tuo, kad betono mišiniai kuriuose buvo dedamos kieto pavidalo poros išėjo slankesni, mažesnės klampos bei paviršinių įtempių, todėl žymiai lengviau pasišalino esantis oras betono mišinyje.

Atlikus eksperimentus buvo paskaičiuotas gniuždymo stiprio pokytis nuo oro kiekio betono mišinyje. Gauta, kad 1% oro betono mišinyje, gniuždymo stiprį sumažina maždaug 12,5%, vertinant techninę literatūrą ši sąlyga didesnė apie 2 kartus. Tyrimuose nustatyta, kad bandinių gniuždymo stipris yra 20 kartų didesnis negu tempimo stiprį skeliant.

Atsižvelgiant į bandinių tankius galime pastebėti, kad ten kur didžiausias sukietėjusio bandinio tankis, ten ir įgeriamumas mažiausias. Todėl galime daryti prielaidą, jog kuo mažesnis betono tankis, tuo geriau betonas į save įgeria vandenį, todėl norint mažinti betono vandens įgeriamumą reikia didinti betono tankį, bei mažinti kapiliarinį poringumą.

Didžiausias bendras poringumas gaunamas bandinio su orą įtraukiančiu priedu 17,55%, dėl didelio poringumo bandinio tankis gaunamas mažiausias. Palyginus su kontrolinės sudėties bandiniais, galime pastebėti, jog bandiniuose su oro poras formuojančiais priedais uždaras poringumas padidėjo nuo 0,35 karto iki 1,3 karto, o bandiniuose naudojant dirbtinai suformuotas oro poras, uždaras poringumas keitėsi nežymiai. Didėjant uždaram poringumui didėjo atsparumo šalčiui kriterijaus K_s vertė, todėl tokie bandiniai geba atlaikyti didesnę užšaldymo/atšildymo ciklų kiekį.

Kapiliarinio šaldymo/šildymo bandyme atlikti 14 šalčio ciklą, po šių ciklų galime pastebėti, kad kai kurie bandiniai jau yra šiek tiek pasikeitę, matosi nedidelių nutrupėjimų bei paviršiaus komponentų atsiskyrimų. Vertinant bendrą bandinių būklę pagal V. Šestopiorovą, po 14 ciklų paviršinio šaldymo kontroliniams bandiniams galima skirti 8 balus (atsparumą šalčiui balas), tai reiškia, kad bandiniai turi: briaunų apvalėjimo požymių ir nedidelių lokaliųjų ištrupėjimų šalia neatsparių šalčiui užpildų, visiems kitiems bandiniams 9 arba 10 balų (nedideli pažeidimai: briaunų apvalėjimo požymiai arba pažeidimų nematyti).

Bandiniai su sferiniais mikro-plastikiniais burbulais bei su orą įtraukiančiu priedu toliau stiprėjo net ir veikiami užšaldymo/atšildymo ciklų, o tai parodo, jog juose gerai pasiskirstė mikroporos, kurios padėjo betonui atlaikyti vandens užšalimą. O kontrolinė sudėtis ir sudėtis su orą formuojančiu cheminiu priedu parodė gniuždymo stiprio sumažėjimą, taip pat galime manyti, jog tam įtaką padarė betono poringumas. Tačiau darant prielaidą, bandinių stipriai gniuždant svyruoja apie 5 MPa, tai atitinka nominalų 10% skirtumą tarp bandinių, tad šie bandiniai atlaikė F200 ciklus.

Vertinant visų bandinių rodmenis po F300 ciklų, galima teigti, jog visi bandiniai sugebėjo išlaikyti savo mechanines savybes, net ir bandiniai su kontroline sudėtimi išlaikė gniuždymo stiprį reikiamose ribose (10% nuo pradinio stiprio po 28 parų).

Apibendrinant mikroporų kiekio L300 ir atstumo tarp porų faktoriaus AF nustatymą pagal ASTM C 457 metodiką galima teigti, kad ne visose sudėtyse buvo pakankamas uždarytų porų kiekis, tačiau bandiniai atlaikė šalčio ciklus (F200 ir F300) dėl sudėtyse naudojamo mažo V/C ir tankios struktūros. Atlikus bandinių šlifo nuotraukų vizualinį vertinimą buvo nustatyta, kad L300 ir AF rodiklius atitiko bandiniai, kuriuose buvo naudojamas standartinis orą įtraukiantis priedas ir chemiškai oro poras formuojantis priedas.

Literatūra

- 1) Gurskis V. 2008. *Statybinės medžiagos*. Mokomoji knyga. Kaunas: Ardiva;
- 2) Naujokaitis A. 2007. *Statybinės medžiagos. Betonai*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika;
- 3) Skripkiūnas G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Vadovėlis. Kaunas: Vitea Litera;
- 4) Daukšys M., Ivanauskas E., Juociūnas S., Pupeikis D., Šeduikytė L. *The Assessment of Prediction Methodology of Concrete Freezing and Thawing Resistance*. Kaunas University of Technology. ISSN 1392-1320 Materials science (Medžiagotyra). Vol. 18, No 4, 2012;
- 5) Nagrockienė D., Skripkiūnas G., Girskas G. *Predicting Frost Resistance of Concrete with Different Coarse Aggregate Concentration by Porosity Parameters*. ISSN 1392–1320 Materials science (Medžiagotyra). Vol. 17, No. 2. 2011;
- 6) Venčkauskas L., Daukšys M. *Cementinio akmens su skirtingos paskirties cheminiais priedais poringumo rodikliai*. Statyba. 2013. ISSN 2029-2341 print / ISSN 2029-2052 online 2013 5(5): 530-535;
- 7) Beata Łaz'niowska-Piekarczyk. *The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self compacting concrete*. Construction and Building Materials 31 (2012) 310–319;
- 8) Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. 1989. *Цементные бетоны высокой морозостойкости*. Стройиздат, Лен. Отд, Л;
- 9) Whiting, D.A. and Nagi, M.A. 1998. *Manual on Control of Air Content in Concrete*. EB116. Portland Cement Association, Skokie, Illinois;
- 10) Aligizaki K.K. 1995. *Determination of pore structure parameters in hardened cementitious materials*. MS Thesis, The Pennsylvania State University, p. 265;
- 11) Cai, H.; Liu, X. 1998. *Freeze – thaw durability of concrete: ice formation process in pores*. Cement and Concrete Research 28(9): 1281–1287;
- 12) Hulshizer, A.J. 1997. *Air-Entrainment Control or Consequences*. Concrete International. 19(7);
- 13) Dodson, V. 1990. *Air-Entraining Admixtures. Concrete Admixtures*. Chapter 6, Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 129-158;
- 14) Powers, T. C. and Brownyard T. L. 1947. *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste*. Journal of American Concrete Institute 43;

- 15) Kalliopi K. Aligizaki. 2006. *Pore structure of cement-based materials*. Testing, interpretation and requirements. Taylor & Francis. p. 440;
- 16) AB „Akmenės cementas“. Cemento tipai. Prieiga per internetą: www.cementas.lt/lt/cemento-tipai;
- 17) LST EN 12620:2003+A1:2008. *Betono užpildai*;
- 18) LST EN 1008:2005. *Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant gražinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti*;
- 19) LST EN 934-2:2009+A1:2012. *Betono, statybinio ir injekcinio skiedinio įmaišiniai priedai. 2 dalis. Betono įmaišiniai priedai. Apibrėžtys, reikalavimai, atitiktis, ženklavimas ir etiketavimas*;
- 20) Sika AG. *Betono savybes keičiantys priedai*. Prieiga per internetą: www.sika.com;
- 21) LST EN 206:2013+A1:2017. *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis*;
- 22) LST EN 12350-2:2009. *Betono mišinio bandymai. 2 dalis. Slankumo bandymas*;
- 23) LST EN 12350-8:2010. *Betono mišinio bandymai. 8 dalis. Susitankinantis betonas. Slankumo bandymas, naudojant standartinį kūgį*;
- 24) LST EN 12350-7:2009. *Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai*;
- 25) LST EN 12390-2:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 2 dalis. Bandinių pagaminimas ir kietinimas stipriui nustatyti*;
- 26) LST EN 12390-3:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris*;
- 27) LST EN 12390-6. *Betono bandymas. 6 dalis. Bandinių tempimo stipris skeliant*;
- 28) ГОСТ 12730.4-78. 1980. *БЕТОНЫ. Методы определения показателен пористости*. СССР;
- 29) СВ. Шестоперс ь, 1960. *Долговечность бетона*. Москва, "Автотрансиздат";
- 30) T. C. Powers, 1949. *The Air Refinement of frost Resistant Concrete // Proceedings of the Highway Research Board.*, vol. 29, p. 184-202;
- 31) T. C. Powers, R. A. Helmut. *Theory of Volume Changes in Hardened Cement Paste During Freezing // Proceedings of the Highway Research Board.*, vol. 32, p. 285-297.