



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Gintautas Lukauskas

**CEMENTINIO AKMENS PORINGUMO PARAMETRŲ ANALIZĖ
ANALYSIS OF HARDENED CEMENT PASTE POROSITY PARAMETERS**

Baigiamasis magistro darbas

Statybinių medžiagų studijų programa, valstybinis kodas 621H75001

Gamybos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

doc. dr. Gintautas Skripkiūnas

(Vardas, pavardė)

(Data)

Gintautas Lukauskas

CEMENTINIO AKMENS PORINGUMO PARAMETRŲ ANALIZĖ
ANALYSIS OF HARDENED CEMENT PASTE POROSITY PARAMETERS

Baigiamasis magistro darbas

Statybinių medžiagų studijų programa, valstybinis kodas 621H75001

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Gintautas Skripkiūnas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lekt. Lina Rutkienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Statybinių medžiagų studijų programa, valstybinis kodas 621H75001

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

doc. dr. Gintautas Skripkiūnas

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

..... Nr.

Vilnius

Studentui.....Gintautui Lukauskui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Cementinio akmens poringumo parametrų analizė.....

patvirtinta 2011 m. lapkričio 4 d. dekanų potvarkiu Nr. 707 st.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2012 m. birželio 4 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti literatūros analizę nagrinėjant klam-
mų poringumo bandymo metodus ir nustatant
cementinio akmens poringumo skaitmeninį V/C
santykio poringumo parametrų skait-
meninį metodą – pagal vidulės išėjimo kin-
tiką mikroskopiniu metodu ir gautas iš-
vadas pateikti rezultatus. Atlikti rezultatus analizę.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

(Parašas)

doc. dr. Gintautas Skripkiūnas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Gintautas Lukauskas 1026708

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statybinės medžiagos, SMfm-10

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2012 m. gegužės 29 d.
(Data)

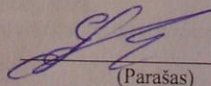
Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema Cementinio akmens poringumo
parametrų analizė

patvirtintas 2011 m. lapkričio 4 d. dekanų potvarkiu Nr. 707 st., yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: doc. dr. Gintautas Skripkiūnas

Mano darbo (projekto) vadovas doc. dr. Gintautas Skripkiūnas

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų
piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).


(Parašas)

GINTAUTAS LUKAUSKAS
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Statybinių medžiagų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

Statybinių medžiagų studijų programos baigiamasis magistro darbas

Cementinio akmens poringumo parametrų analizė

Autorius **Gintautas Lukauskas**

Vadovas doc. dr. **Gintautas Skripkiūna**

Kalba
☒ X lietuvių
☐ užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe analizuojami cementinio akmens poringumo parametrai. Darbe siekiama palyginti cementinio akmens bandinių su skirtingais vandens ir cemento santykiais poringumo parametrus, gautus pagal skirtingas poringumo parametrų tyrimo metodikas. Apžvelgta literatūra lietuvių, anglų ir rusų kalbomis. Išanalizuotas cementinio akmens ilgalaikiškumo ir poringumo ryšys, įvairių parametrų įtaka cementinio akmens poringumui bei orą įtraukiančių priedų įtaka poringumui reguliuoti. Aprašytos cementinio akmens gamybai naudotos medžiagos: portlandcementis, vanduo ir superplastiklis. Darbe projektuojami trys skirtingi cementinio akmens mišiniai, kurie skiriasi vandens ir cemento santykiu. Pateiktos cementinio akmens mišinių sudėtys. Aprašytos tyrimų metodikos, pagal kurias nustatyti cementinio akmens poringumo parametrai. Atlikti sukietėjusio cementinio akmens tyrimai bei jų palyginimas. Tyrimų duomenys apdoroti kompiuterinėmis programomis „Microsoft Excel“ ir „UTHSCSA ImageTool“, išanalizuoti gauti rezultatai bei pateiktos išvados.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, literatūros analizė, medžiagos ir tyrimai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 74 p. teksto, 30 iliustr., 20 lent., 40 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: cementinis akmuo, poringumo parametrai, bendras poringumas, atviras poringumas, uždaras poringumas, hidratacijos laipsnis, pora.

Vilnius Gediminas Technical University
Construction faculty
Building materials department

ISBN ISSN
Copies No.
Date-....-....

Building materials study programme master thesis.

Analysis of hardened cement paste porosity parameters

Author: Gintautas Lukauskas Academic supervisor: doc. dr. Gintautas Skripkiūnas

Thesis language

☒ X Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

The master thesis analyzes hardened cement paste porosity parameters. The aim of work is to compare methods for determination of porosity parameters of hardened cement paste samples with different w/c ratios. Reviewed the literature in Lithuanian, English and Russian languages. Was analyzed the bond between durability and porosity, influence of various parameters to hardened cement pastes porosity and influence of air-entraining admixtures to control porosity. Was analyzed the concrete making materials: cement, water and superplasticizer. The work is designed three different cement stone mixtures with different w/c ratios. Presented cement stone compositions of mixtures and set their properties. Described research methodology, by which established hardened cement paste porosity parameters. With solidified cement stone made researches. The research data treated by computer programs Microsoft Excel and UTHSCSA ImageTool, done an analysis of the results and made conclusions.

Structure: introduction, literature review, materials and research, conclusions, references.

Thesis consist of: 74 p. text without appendixes, 30 pictures, 20 tables, 40 bibliographical entries.

Keywords: cement stone, porosity parameters, total porosity, open porosity, closed porosity, degree of hydratation, pore.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė	13
1.1. Cementinio akmens ilgalaikiškumo ir poringumo ryšys	13
1.2. Įvairių parametrų įtaka cementinio akmens poringumui	16
1.3. Orą įtraukiančių priedų įtaka poringumui reguliuoti.....	19
1.4. Betono poringumo parametrai	21
1.4.1. Uždarasis ir atvirasis poringumas.....	21
1.4.2. Porų kiekis	22
1.4.3. Porų klasifikacija	23
1.5. Poringumo nustatymo metodikos	25
1.5.1. Vandens įgėrio metodas.....	27
1.5.2. Optinės mikroskopijos metodas	30
1.5.3. Gyvsidabrio porometrija.....	41
2. Medžiagos ir tyrimai.....	43
2.1. Žaliavos	43
2.1.1. Portlandcementis	43
2.1.2. Plastifikuojantis priedas.....	44
2.1.3. Vanduo	45
2.2. Bandinių gamyba.....	45
2.3. Atlikti tyrimai ir jų aptarimas	47
2.3.1. Vandens įgėrio kinetika	47
2.3.2. Optinės mikroskopijos metodas	52
2.3.3. Gyvsidabrio porometrija.....	60
2.4. Atliktų tyrimų pagal skirtingas metodikas rezultatų palyginimas.....	63
2.5. Cementinio akmens poringumo prognozavimo skaičiavimai pagal vandens ir cemento santikį	65
Išvados.....	71
Literatūra	72

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Vandens ir cemento sąnaudų santykio V/C įtaka cementinio akmens savybėms.....	16
2 lentelė. Betono medžiagų, jų kiekių ir gamybos veiksnių daromas poveikis įtraukto oro tūriui naudojant orą įtraukiančius priedus	19
3 lentelė. Porų dydžių skirstymas ir terminologija pagal IUPAC ir medžiagų mokslininkus.....	24
4 lentelė. Cementinio akmens poringumo parametrų nustatymo metodikos pagal tiriamus porų dydžio intervalus	26
5 lentelė. Oro porų pasiskirstymo nustatymas.....	40
6 lentelė. Pagrindiniai portlandcemenčio CEM I 42,5 R rodikliai	44
7 lentelė. Cementinio akmens sudėtis 1m ³ cementinio akmens paruošti.....	45
8 lentelė. Cementinio akmens savitojo tankio tyrimo rezultatai	48
9 lentelė. Cementinio akmens poringumo parametrai	51
10 lentelė. Apskaičiuoti tyrimo duomenys	55
11 lentelė. Skaičiavimų lentelė, kai V/C = 0,35	56
12 lentelė. Skaičiavimų lentelė, kai V/C = 0,5	57
13 lentelė. Skaičiavimų lentelė, kai V/C = 0,65	58
14 lentelė. Gyvsidabrio porometrijos rezultatai	60
15 lentelė. Poringumo parametrų rezultatai gauti pagal skirtingas metodikas	64
16 lentelė. Porų dydžio ir porų dydžio pasiskirstymo parametrai	65
17 lentelė. Pradiniai duomenys.....	66
18 lentelė. Rezultatų suvestinė kintatnt hidratacijos laipsniui, kai V/C = 0,35	68
19 lentelė. Rezultatų suvestinė kintatnt hidratacijos laipsniui, kai V/C = 0,5.....	68
20 lentelė. Rezultatų suvestinė kintatnt hidratacijos laipsniui, kai V/C = 0,65.....	68

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kapiliarų užpildymas vandeniu	14
2 pav. Cemento akmens kapiliarinio poringumo, hidratacijos naujų gelio ir nehidratavusio cemento kiekių priklausomybės nuo cemento hidratacijos laipsnio ir V/C santykio.....	17
3 pav. Cemento akmens bendro poringumo P_{ca} , kapiliarinio poringumo P_k ir gelio poringumo P_g kitimas, didėjant hidratacijos laipsniui α_h	18
4 pav. Įtraukto oro mikroskopinės poros	20
5 pav. Uždaras ir atviras poringumas	21
6 pav. Bendro, kapiliarinio ir gelio poringumo kitimas laikui bėgant.....	22
7 pav. Atvirų porų tūrio priklausomybė nuo kietėjimo laiko	23
8 pav. Porų klasifikacija pagal jų ryšį su aplinka	25
9 pav. Porų geometrinė klasifikacija	25
10 pav. Nomograma vidutinių porų dydžio rodiklio λ ir porų vienodumo rodiklio α nustatymui....	30
11 pav. Bandinio išpjovimas iš gaminio.....	34
12 pav. Stebėjimo linijų išdėstymas bandinio paviršiuje	35
13 pav. Chordo ilgio ir porų matavimas, esant briaunų defektui	36
14 pav. Porometras	42
15 pav. Vandens adsorbcijos kreivės.....	47
16 pav. Tankio priklausomybė nuo V/C.....	48
17 pav. Cementinio akmens bendras, atviras ir uždaras poringumai, kai V/C = 0,35.....	49
18 pav. Cementinio akmens bendras, atviras ir uždaras poringumai, kai V/C = 0,5.....	49
19 pav. Cementinio akmens bendras, atviras ir uždaras poringumai, kai V/C = 0,65.....	50
20 pav. Cementinio akmens bandinių su skirtingu V/C bendro, atviro ir uždaro poringumų vidutinės reikšmės.....	50
21 pav. Optinis mikroskopas „Motic“	53
22 pav. Vaizdų analizės programa „UTHSCSA ImageTool“	54
23 pav. Patikslinta stebimoji linija	54
24 pav. Chordų pasiskirstymas pagal dydį	59

25 pav. Gyvsidabrio įsiskverbto tūrio ir porų skersmens priklausomybė ($V/C=0,35$).....	61
26 pav. Gyvsidabrio įsiskverbto tūrio ir porų skersmens priklausomybė ($V/C=0,5$).....	62
27 pav. Gyvsidabrio įsiskverbto tūrio ir porų skersmens priklausomybė ($V/C=0,65$).....	63
28 pav. Kapiliarinių porų koncentracija naujadaruose kintant hidratacijos laipsniui.....	69
29 pav. Kapiliarinių porų kiekio kitimas kintant hidratacijos laipsniui	69
30 pav. Gelio porų kitimas cemento akmenyje kintant hidratacijos laipsniui.....	70

Ivadas

Betonas pirmoje vietoje buvo laikomas kaip apkrovas laikanti medžiaga ir todėl pagrindiniai moksliniai tyrimai ilgą laiką buvo orientuoti į jo mechanines savybes. Gniuždymo stipris buvo ir yra lemiamas rodiklis skirstant į klases skirtingus betono tipus. Nors anksčiau buvo pastebėta, kad poringumo ir stiprumo ryšys yra labai stiprus, bet susidomėjimas poringumo parametrais liko labai ribotas. Po novatoriško darbo, kurį atliko T. C. Pauersas, porų dydis ir geometrinis oro porų pasiskirstymas tapo svarbiu rodikliu bandant gaminius laboratorijose ir naudojant praktikoje, kur daugiausia dėmesio buvo skiriama vertinant atsparumą šalčiui. Po T. C. Paurso atlikto mokslinio tyrimo daugumai inžinierių dirbančių su betonu, porų dydžio pasiskirstymas sukietėjusiame cementiniame akmenyje ir betone pasirodė paslaptingas.

Susidomėjimas betono ilgalaikiškumu ėmė augti taip pat, kaip ėmė didėti statinių priežiūros ir remonto darbų kainos. Detalus tyrimas parodė, kad daugumoje šalių finansiškai negalėtų atlaikyti pastatų priežiūrai reikiamų finansinių išlaidų, o didinti pastatams naudojamo betono stiprumą būtų neracionalu ir neteisinga. Poringos struktūros medžiagos, šiuo atveju cementinio akmens, 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.

Šiame baigiamajame magistro darbe yra detalai apibūdinti ir palyginti paprastesni ir sudėtingesni eksperimentiniai metodai, kuriais nustatomas tiek bendras poringumas, tiek siauresnės poringumo parametrų reikšmės, tokios kaip porų pasiskirstymas, dydis. Pateiktos bandymo metodikos, ataskaitos su gautais duomenimis, poringumo prognozavimo skaičiavimai bei išvados.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Baigiamojo magistrinio darbo tikslas – atlikti bandinių su skirtingais vandens ir cemento santykiais poringumo parametrų analizę pagal kelias poringumo parametrų nustatymo metodikas ir jas palyginti.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti betono ilgalaikiškumo ir poringumo ryšio analizę;
2. Nustatyti įvairių parametrų įtaką cementinio akmens poringumui bei orą įtraukiančių priedų įtaką jam reguliuoti;
3. Apžvelgti cementinio akmens poringumo parametrus;
4. Pasigaminti bandinius su skirtingais vandens ir cemento santykiais ir juos išbandyti pagal kelias poringumo parametrų nustatymo metodikas;
5. Atlikti cementinio akmens poringumo prognozavimo skaičiavimus;

1. Literatūros analizė

1.1. Cementinio akmens ilgalaikiškumo ir poringumo ryšys

Poringos medžiagos struktūra yra labai svarbus mikrostruktūros rodiklis dėl savo įtakos medžiagos fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei ilgalaikiškumui. Poringos medžiagos fizikinės ir mechaninės savybės labai priklauso nuo to, kaip įvairiausių dydžių poros yra pasiskirsčiusios medžiagoje. Medžiagos, kurių bendras poringumas yra vienodos gali turėti visiškai skirtingas savybes dėl to, kad jose yra mažas skaičius didelių porų arba didelis skaičius mažų porų. Poringą struktūrą yra labai sunku charakterizuoti dėl egzistuojančių skirtingos formos ir dydžio porų bei jų tarpusavio ryšio (Kalliopi 2006).

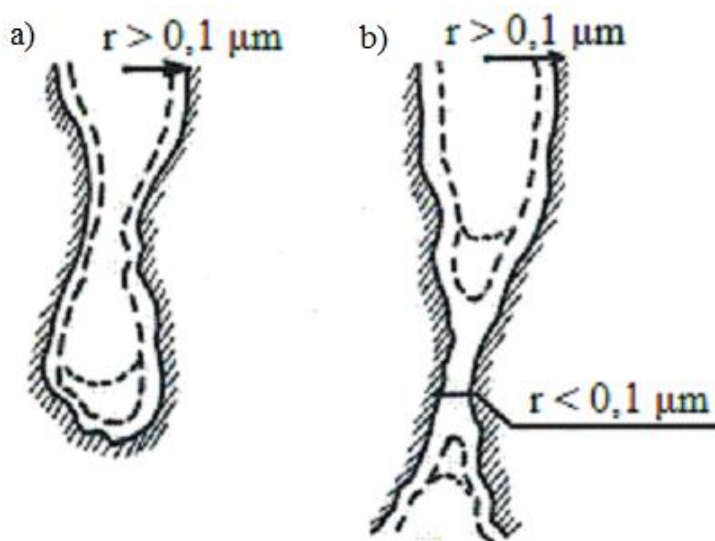
Sukietėjęs cementinis akmuo, cementinis skiedinys ir betonas yra poringos medžiagos, į kurias gali įsiskverbti dujos bei skysčiai. Pagrindinės rišančiosios medžiagos, portlandcemenčio tešlos, savybės ir elgsena reguliuoja kompozito savybes. Poros gali daryti įtaką medžiagos savybėms įvairiais būdais. *Gniuždomasis stipris ir elastingumas* visų pirma yra paveikiami bendro porų tūrio, taip pat gali būti paveikti porų dydžio, pasiskirstymo medžiagoje, didžiausio porų dydžio, formos ir ryšio tarp porų. *Pralaidumas ir difuzingumas* paveikiami bendro porų tūrio, dydžio, formos ir ryšio tarp porų. *Susitraukimas* daugiausia yra porų sienelių paviršiaus energijos pasikeitimo funkcija, kuri priklauso nuo poringosios sistemos bendrojo paviršiaus ploto. *Ilgalaikiškumas*, kuris pagrinde priklauso nuo atsparumo šalčiui yra kontroliuojamas įtrauktų oro porų tūriu ir tarpu tarp jų (Brown, Shi 1991; Hearn et al. 1994; Beaudoin et al. 1994).

Cementinio akmens irimas dėl šalčio poveikio yra dažniausiai pasitaikantis cementinio akmens gaminių destruktijos atvejis. Cikliškaai šaldomas ir šildomas vandens prisotintas cementinis akmuo, kaip ir kitas mineralinis kietasis kūnas, gali suirti (Vektaris, Vilkas 2006).

Cementinio akmens ilgalaikiškumas gali būti suprastas ir pagerintas tik analizuojant kompleksą sąveikų tarp poringos struktūros ir aplinkos. Daugiausia ilgalaikiškumą bloginančių mechanizmų yra susiję su migracijos procesais. Vandens absorbcija ir druskos tirpalų judėjimas kapiliarais yra keli iš migracijos procesų, kurie žymiai sutrumpina cementinio akmens eksploatacinį laiką – kontroliuojamą poringumo ir porų dydžio pasiskirstymo. Ištirpę jonai gali taip pat prasiskverbti į cementinį akmenį difuzijos būdu per porose esantį skystį. Taip pat, reaktyvios dujos kaip CO₂ gali patekti į medžiagą per dalinai vandeniui užpildytas poras ir inicijuoti reakcijas su vientisa medžiaga. Migracijos mechanizmas labai priklauso nuo porų dydžio pasiskirstymo, kuris cementiniame akmenyje yra pakankamai platus ir svyruoja nuo nanometrų iki milimetrų (Kalliopi 2006).

Vienas iš migracijos procesų vykstančių sukietėjusiame akmenyje - kapiliarinės kondensacijos reiškinys, tai kai absorbuoti vandens garai padengia porų sienelės 0,1 mikrometrų

storio vandens sluoksniu. Jei kapiliarų spindulys yra mažesnis nei 0,1 mikrometras, tada kapiliarai gali būti visiškai užpildyti vandeniu dėl garų absorbcijos, nepaisant to, ar kapiliaras uždaras ar susisiekiantis (1 pav.). Esant kapiliaro spinduliui didesniai nei 0,1 mikrometras, kondensacijos reiškinys gali pasireikšti tik uždaruose kapiliaruose, kaip pavaizduota 1 paveikslo a dalyje.



1 pav. Kapiliarų užpildymas vandeniu: a) uždaras kapiliaras, b) susisiekiantis kapiliaras (Kalliopi 2006)

Taigi, mikropapiliarai, kurių spindulys mažesnis nei 0,1 mikrometras, gali pasidengti plėvele dėl garų absorbcijos iš aplinkos. Makropapiliarai, kurių spindulys didesnis kaip 0,1 mikrometras, skysčiu gali būti užpildyti tik esant tiesioginiam kontaktui su juo. Be to, makropapiliarų bruožas – jie ne tik nesugeria drėgmės iš aplinkos, bet iš savės atiduoda drėgmę aplinkai (Лыков 1968). Dėl migracijos procesų priklausomybės nuo porų dydžio poringa cementinio akmens struktūra yra sprendimo būdas kaip padidinti ilgalaikiškumą (Kalliopi 2006).

Pagrindinė irimo, trūkinėjimo, trupėjimo ir aižėjimo priežastis yra gaminio porose užšalimo vandens, virtusio ledu, tūrio didėjimas. Vandens tankis yra 1 g/cm³, o ledo 0,917 g/cm³. Ledas užima 9 % didesnę tūrį negu vanduo. Ledo kristalai slegia sukietėjusio cementinio akmens porų bei kapiliarų sienelės, plečia visą gaminį ir gali jį suardyti (Zuber, Marchand 2000; Cai, Liu 1998).

S. Chatterji (2003) iš atliktų tyrimų rezultatų padarė išvadą, kad ledas yra labai stipri medžiaga ir jo adhezija su cementiniu akmeniu yra didelė. W. Micah Hale kartu su kitais mokslininkais nustatė, kad vanduo, esantis kapiliarinėse porose, ne visuomet užšąla 0 °C temperatūroje. Šią užšalimo temperatūrą lemia porų dydis ir sudėtis. Kai poros mažėja, temperatūra, reikalinga vandeniui užšalti - mažėja. Pavyzdžiui, porose, kurių skersmuo 10 nm, vanduo neužšals

iki $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, o porose, kurių skersmuo – 3,5 nm, vanduo neužšals iki $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Shang et al. 2009; Coussy, Monteiro 2008).

Hidraulinio slėgio jėgos dydis priklauso nuo porų užpildymo vandeniu laipsnio ir šaldymo greičio. Jeigu vandeniu užpildoma mažiau kaip 75 % porų, užšalancio vandens slėgis nepavojaingas. Manoma, kad užšalanciam gaminyje veikia ir osmosinio slėgio jėgos. Porose esančiame vandenyje būna ištirpusių junginių ir druskų. Vandeniui virstant ledu, tirpalo koncentracija didėja, ir per porų sienelės ima vykti osmoso reiškiniai. Osmosinio slėgio jėgos gali padidinti ledo kristalizacijos jėgas. Gaminys suyra tuomet, kada dėl užšalancio vandens atsirandantys įtempiai tampa didesni negu cementinio akmens tempiamasis stipris. Vadinasi, kuo medžiaga mechaniškai stipresnė, tampresnė ir kuo mažiau užpildytos vandeniu poros, tuo medžiaga atsparesnė šalčiui (Невиль 1972).

Cementinio akmens vandens įmirkis ir atsparumas šalčiui priklauso nuo porų bei kapiliarų dydžio, jų pasiskirstymo ir pobūdžio, porų uždaro. Uždaros ir nedidelės poros nevisiškai užsipildo vandeniu. Neužsipildžiusios arba nevisiškai užsipildžiusios vandeniu poros yra vadinamos rezervinėmis. Šalant į tokias poras gali pereiti dalis kitose, visiškai užpildytose porose esančio vandens, ir taip gali susidaryti vieta ledui plėstis. Kad šalantis vanduo spėtų pereiti iš pilnų į pustuštes poras, atstumas tarp jų turi būti nedidelis. Yra duomenų, kad cementiniame akmenyje pakankamas nuotolis tarp porų yra 0,25 mm (Невиль 1972).

Cementinio akmens atsparumą šalčiui mažina atviros poros ir kapiliarai, kurie susidaro garuojant iš cementinio akmens laisvajam vandeniui. Tokių porų ir kapiliarų kiekis priklauso nuo V/C santykio dydžio. Kuo daugiau į cementinio akmens mišinį pripilama vandens, tuo daugiau lieka nesurišto vandens, o jam išgaravus, atvirų porų (Vektaris, Vilkas 2006).

Uždarnosios poros formuojasi iš aplinkos įtraukiant orą ir dėl kietėjančio cementinio akmens kontrakcijos. Oro įtraukimą skatina kai kurie specialūs priedai, o kontrakcija įvyksta savaime. Įtraukto oro poros ir kontrakcinės poros sudaro uždaras poras, kurios pagerina atsparumą šalčiui.

Cementiniame akmenyje yra dar vadinamosios cementinio gelio poros, tačiau jos yra labai mažos. Manoma, kad jose ledas susidaryti negali ir, nagrinėjant cementinio akmens atsparumą šalčiui, į jas nekreipiama dėmesio.

Egzistuoja betono atsparumo šalčiui kriterijus Kš – tai yra uždaro poringumo P_u (įtrauktas oras + kontrakcinės poros) ir atviro poringumo P_a (kapiliarinės poros) santykis: $Kš = P_u / 0,09 \cdot P_a$ turi būti didesnis arba lygus vienetui (Шейкин 1989). Taip pat nustatytas tam tikras oro tūris sutankintame betono mišinyje, kuriam didėjant, sukietėjusio betono atsparumas šalčiui iki tam tikros ribos irgi didėja. Oro kritinis kiekis yra apie 3 %. Vadinasi, jeigu betono arba skiedinio sutankintame mišinyje – gaminio pusfabrikatyje įtraukto oro yra daugiau kaip 3 %, galima tikėtis, kad gaminys bus šalčiui atsparus. Reikalingas įtraukto oro kiekis dar priklauso ir nuo betono

mišinio sudėties, cemento kiekio, V/C santykio, užpildų dydžio, įtraukto oro porų pasiskirstymo bei dydžio ir kt (Невиль 1972, Шейкин 1989).

Didelis įtraukto oro kiekis taip pat yra nepageidautinas, nes gali sumažinti cementinio akmens mechaninį stiprumą ir pabloginti kitas jo savybes. Paprastai, kiekvienam procentui įtraukto oro tūrio, cementinis akmuo praranda apie penkis procentus savo gniuždomojo stiprio. Todėl technologams svarbu parinkti kiek galima optimalesnę sudėtį, pritaikytą konkrečioms eksploatacijos sąlygoms (Vektaris, Vilkas 2006; Hulshizer 1997).

Cementinio akmens stiprumas, ilgalaikiškumo rodikliai daugiausia priklauso nuo cemento sąnaudų bei vandens ir cemento sąnaudų santykio (V/C) kuriam didėjant betono kokybė blogėja (1 lentelė) (Kalliopi 2006).

1 lentelė. Vandens ir cemento sąnaudų santykio V/C įtaka cementinio akmens savybėms

V/C	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Gniuždomasis stipris, %	100	87	70	55	44
Vandens įgeriamumas, %	100	220	375	550	750
Susitraukimas kietėjant, %	100	140	180	220	260

1.2. Įvairių parametru įtaka cementinio akmens poringumui

Cementiniame akmenyje visada yra tam tikras kiekis porų, atsiradusių dėl įvairių priežasčių (Skrupkiūnas 2007, Соломатов 1989):

- dėl per didelio vandens kiekio, įpildo maišant ir nesunaudoto cemento hidratacijai;
- poros, patekus oro maišant ir likus jų pavienių burbulėlių pavidalu;
- poros, atsiradusios išgaravus vandens pertekliui bei susidariusios dėl kontrakcijos, kai vykstant hidratacijai dalis laisvosios būsenos vandens tampa chemiškai sujungtuojų;
- oro prisipildžiusios poros – įdėjus orą įtraukiančių įmaišų;
- poros, susidariusios dėl gamybos technologijos netobulumo ar nepakankamai sutankinus;
- poros ir mikroplyšiai, susidarę dėl temperatūrinių ir susitraukimo deformacijų.

Medžiagų akytumas yra jų struktūros rodiklis, nuo kurio priklauso vandens įgeriamumas, atsparumas šalčiui, stiprumas, laidumas šilumai, garsui, ir daug kitų savybių. Ilgainiui dėl hidratacijos cemento struktūra vienodėja, poros mažėja, stiprumas didėja (Skrupkiūnas 2007, Соломатов 1989).

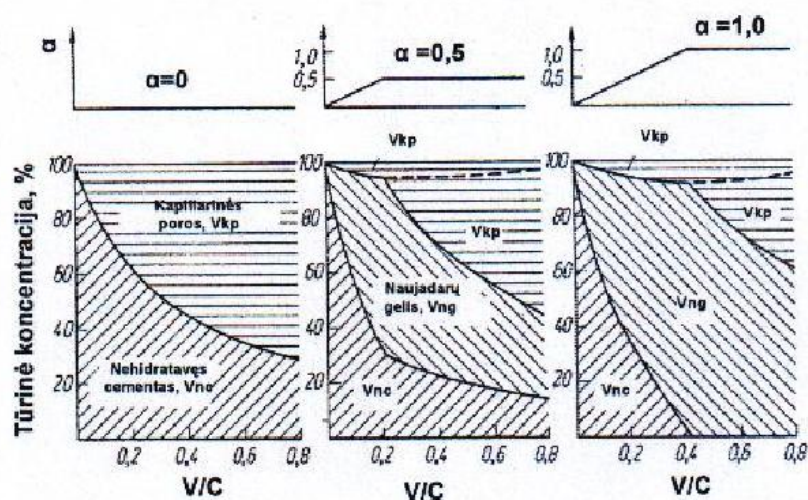
Cemento akmenyje yra labai įvairaus dydžio poros, kurių dydis skiriasi tūkstančius kartų. Todėl naudojami įvairūs metodai šioms poroms tirti.

Cementiniame akmenyje esančios poros pagal formą, dydį ir prigimtį gali būti suskirstytos į 3 grupes:

- kapiliarinės poros;
- gelio poros;
- oro poros.

Kapiliarinės poros sukietėjusiame cemento akmenyje atsiranda išgaravus vandens pertekliui. Gaminant mišinį (tešlą, skiedinį ar betoną) reikiamoms mišinių technologinėms savybėms gauti vandens imama daugiau negu jo reikia cheminėms reakcijoms. Vandens perteklius išsidėsto gelio porose ir tarpuose tarp nesureagavusių cemento dalelių ir hidratacijos naujadarų. Iš pastarųjų išgaravus laisvajam vandeniui, lieka kapiliarinės poros. Tai susisiekiantys vienas su kitu siauri kanalai, vadinami kapiliarais. Kapiliarinių porų skersmuo 0,1 – 10 μm (Skripkiūnas 2007).

Kapiliarinis porų kiekis cementiniame akmenyje daugiausia priklauso nuo vandens kiekio arba V/C santykio ir hidratacijos laipsnio. Cemento tešlai susirišus, jos tūris kinta labai mažai, galima sakyti, lieka lygus cemento ir vandens tūrių sumai. Padarius šią prielaidą, galima suskaičiuoti kapiliarinių porų kiekio kitimą didėjant cemento hidratacijos laipsniui. Cemento akmens kapiliarinio poringumo, hidratacijos naujadarų gelio ir nehidratavusio cemento kiekių priklausomybės nuo cemento hidratacijos laipsnio ir V/C santykio pateiktos 2 pav.



2 pav. Cemento akmens kapiliarinio poringumo, hidratacijos naujadarų gelio ir nehidratavusio cemento kiekių priklausomybės nuo cemento hidratacijos laipsnio ir V/C santykio (Skripkiūnas 2007)

Kaip matome iš 2 pav., mažėjant V/C santykiui galima pasiekti tokį tašką, kai esant pilnai hidratacijai, naujadarų susidarys tiek, kad jais bus užpildytos visos kapiliarinės poros (Skripkiūnas 2007).

Cemento akmens kapiliarinis poringumas didėjant cemento hidratacijos laipsniui (ilgėjant cementinio akmens kietėjimo trukmei) mažėja, nes susidarančio naujadarų gelio tūris apie 2,2 karto

didesnis už nehidratavusio cemento tūrį ir cemento hidratacijos produktai užima ir dalį vandeniu užpildyto tūrio.

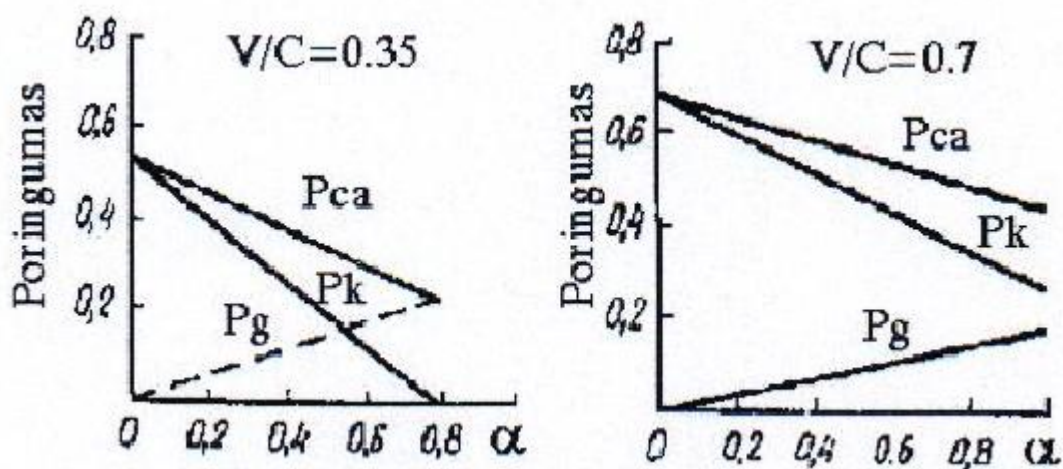
Gelio poros – tai tuštumos tobermoritiniame gelyje tarp šio gelioidispersinės fazės dalelių. Gelio poros daug smulkesnės už kapiliarines poras. Jų dydis $15 - 20 \text{ \AA}$, t.y. jos tik apie 10 kartų didesnės už vandens molekulių dydį.

Pauersas, atlikęs skaičiavimus, gavo, kad minimalus sauso cementinio gelio poringumas yra 28 %. Tai rodo, kad gelio poros užima apie 1/3 naujadarų gelio tūrio. Jo nuomone, visais cemento kietėjimo etapais susidaro beveik to paties poringumo naujadarų gelis (apie 28 % poringumo), ir toliau vykstanti cemento hidratacija neturi didelės įtakos anksčiau susidariusio naujadarų gelio struktūrai. Pauersas manė, kad priklausomai nuo kietėjimo laiko ir sąlygų bei V/C santykio kinta tik cementinio akmens kapiliarinis poringumas, o gelio porų kiekis nepriklauso nuo cemento akmens V/C santykio ir hidratacijos laipsnio. Tačiau gelio porų kiekis cemento akmenyje didėjant hidratacijos laipsniui didėja, nes didėja paties gelio kiekis cemento akmenyje (Skripkiūnas 2007).

Oro poros cemento akmenyje yra stambiausios ir gali siekti iki kelių milimetrų dydžio. Jos yra uždaros, jų forma artima sferai.

Oro poros susidaro maišant mišinius. Oro kiekiui padidinti dedami specialūs orą įtraukiantys priedai. Įtraukto oro poros būna nuo 50 iki 200 μm dydžio, ir yra daug stambesnės už kapiliarines poras. Jos mažina sukietėjusio mišinio stiprumą, tačiau padidina atsparumą šalčiui ir vandens nelaidumą.

Cemento akmens poringumas kinta didėjant cemento hidratacijos laipsniui. Cemento akmens bendro poringumo P_{ca} , kapiliarinio poringumo P_k ir gelio poringumo P_g kitimas, didėjant hidratacijos laipsniui α_h , pateiktas 3 pav.



3 pav. Cemento akmens bendro poringumo P_{ca} , kapiliarinio poringumo P_k ir gelio poringumo P_g kitimas, didėjant hidratacijos laipsniui α_h (Skripkiūnas 2007)

Kaip matome, didėjant cemento hidratacijos laipsniui, mažėja bendras ir kapiliarinis poringumas ir didėja gelio porų kiekis (Skripkiūnas 2007).

1.3. Orą įtraukiančių priedų įtaka poringumui reguliuoti

Oras į betoną gali būti įtraukiamas naudojant orą įtraukiančius priedus arba orą įtraukiantį cementą, arba derinant šiuos abu būdus. Orą įtraukiantis cementas tai portlandcementis su papildomu priedu, kuris yra įvedamas į sudėtį gamybos metu. Orą įtraukiantys priedai yra dedami į betoną prieš maišant arba maišymo metu.

Maišymo metu oras yra įtraukiamas į cementinę tešlą ir suskaidomas į burbuliukus apsuptus stabilizuojančio agento. Būtina pakankamai ilgai atlikti maišymo procedūrą, kad oro burbuliukai būtų pilnai suformuoti ir stabilizuoti. Taip pat yra reikalinga prieš gaminant gaminius atlikti bandymus, kad nustatyti medžiagų kiekius bei optimalų maišymo laiką (Whiting, Nagi 1998).

Oro įtraukimo kokybę veikia cementinio akmens medžiagų ir jų kiekių pasirinkimas, maišymas ir daug kitų su gamyba susijusių veiksnių (2 lentelė).

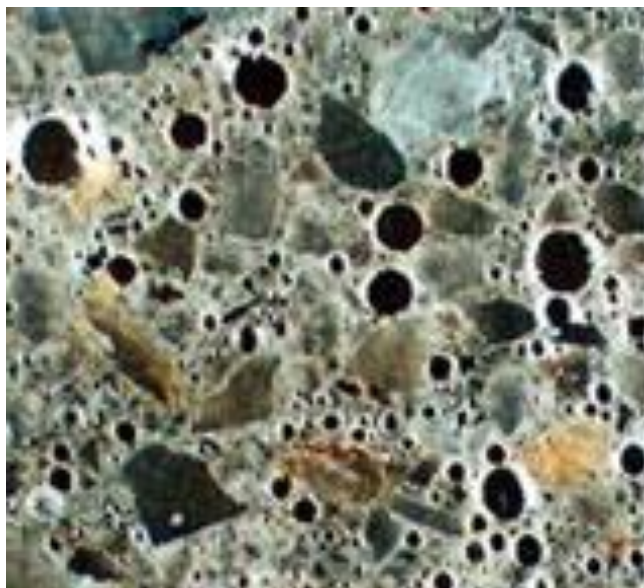
2 lentelė. Betono medžiagų, jų kiekių ir gamybos veiksnių daromas poveikis įtraukto oro tūriui naudojant orą įtraukiančius priedus

Pavadinimas	Pakeitimas	Įtraukto oro tūris
Cementas	Cemento kiekio padidinimas	Sumažės
	Naudojamas geresnės kokybės cementas	Sumažės
	Šarmų kiekio padidinimas	Padidės
Priedai	Plastikliai	Padidės
	Lėtikliai	Padidės
	Greitikliai	Nepakis
V/C	V/C padidinimas	Padidės
Maišymas	Padidinta maišymo talpa	Padidės
	Maišymo greitis iki 20 aps./min.	Padidės
	Maišymo laikas	Padidės
Vibravimas	Ilgai trunkantis vibravimas	Sumažės

Orą įtraukiantis priedas įpiltas į cementinio akmens mišinį maišymo metu suformuoja betone mikro burbulus, kas padeda suformuoti suketėjusiame cementiniame akmenyje mikroporų

struktūrą, kuri labai pagerina ilgalaikiškumą, veikiamą drėgmės, užšalimo ir atitirpimo ciklų metu. Taip pat, dėl įtraukto oro padidėja šviežio cementinio akmens mišinio kohezija ir lipnumas (Whiting, Nagi 1998).

Įtrauktas oras sudaro mikroskopines poras (4 pav.), kurių skersmuo yra nuo 10 μm iki 1 mm, kurios yra tolygiai pasiskirsčiusios per visą tūrį. Oro porų sistema sukiestėjusiame cementiniame akmenyje yra įvertinama atliekant mikroskopinį tyrimą pagal prEN 480-11:2005 (E) „Oro porų parametrų nustatymas sukiestėjusiame betone“ metodiką.



4 pav. Įtraukto oro mikroskopinės poros (Whiting, Nagi 1998)

Pagrindinės sukiestėjusio cementinio akmens savybės, kurias veikia oro įtraukimas, tai gniuždomasis ir tempiamasis stipriai bei tamprumo modulis.

Stiprumo sumažėjimas yra aptinkamas kai po 28 dienų kietėjimo, gniuždomasis stipris išmatuojamas mažesnis nei numatytas projektinis. Oro tūrio padidėjimas vienu procentu paskatina vidutiniškai nuo trijų iki penkių procentų gniuždomojo stiprio sumažėjimą (Hulshizer, A.J. 1997).

Tempiamojo stiprio sumažėjimas yra šiek tiek mažesnis nei gniuždomojo stiprio ir siekia vidutiniškai nuo dviejų iki keturių procentų nuo kiekvieno įtraukto oro tūrio procento. Įtraukto oro tūrio poveikis tamprumo moduliui yra labai panašus į gniuždomojo stiprio. Tamprumo modulis paprastai sumažėja nuo pustrečio iki šešių procentų kiekvienam įtraukto oro tūrio procentui (Whiting, Nagi 1998).

Sumažėjusio cementinio akmens stiprumo galima visiškai arba dalinai išvengti mažinant vandens ir cemento santikį (Dodson 1990).

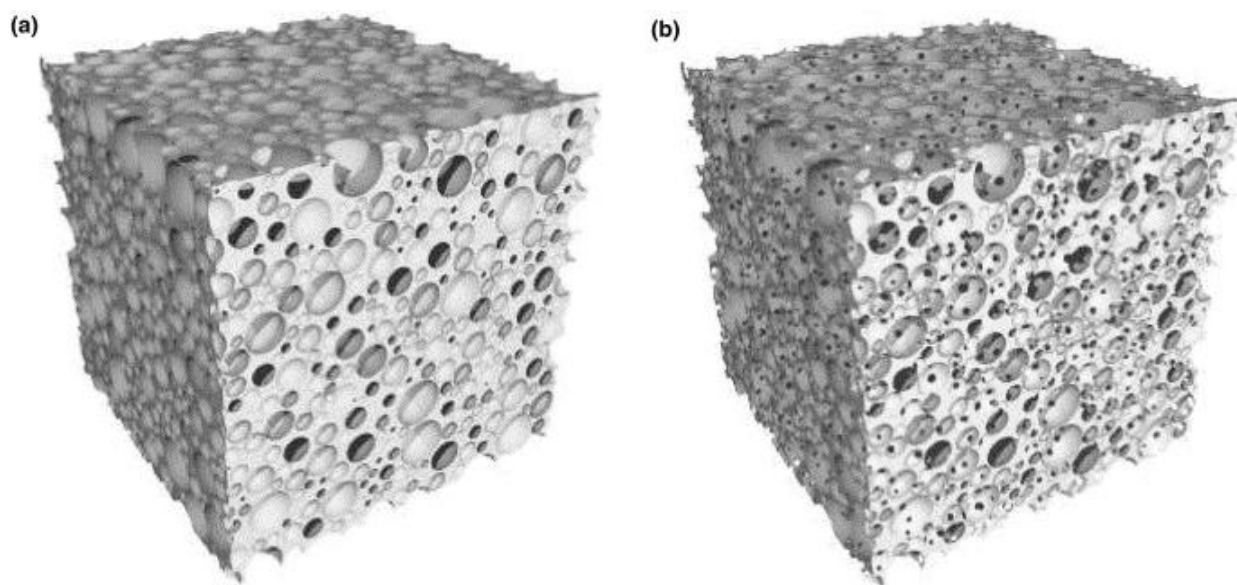
Kaip bebūtų, be atsparumo šalčiui ir paviršiaus pleišėjimui, įtrauktas oras pagerina cementinio akmens tinkamumą, sumažina vandens poreikį, segregaciją ir pralaidumą (Hulshizer 1997).

1.4. Betono poringumo parametrai

1.4.1. Uždarasis ir atvirasis poringumas

Atviros poros (5 pav.) susidaro garuojant iš betono nesurištam vandeniui. Tokių porų ir kapiliarų kiekis priklauso nuo vandens ir cemento santykio dydžio. Kuo daugiau į betono mišinį pripilama vandens, tuo daugiau lieka nesurišto vandens, o jam išgaravus, atvirų porų.

Uždaras poras sudaro įtraukto oro poros ir kontrakcinės poros. Uždaros poros (5 pav.) formuojasi iš aplinkos įtraukiant orą ir dėl kietėjančio cementinio akmens kontrakcijos. Oro įtraukimą skatina specialūs priedai, o kontrakcija įvyksta savaime. Kontrakcija (susispaudimas) tai yra sistemos „cementas+vanduo“ pradinio tūrio sumažėjimas, vykstant klinkerio mineralų hidratacijai. Hidratacijos produktų tūris, lyginant su nehidratuotų junginių tūriu, yra apie 2 kartus didesnis, nes vanduo pereina į kietą būklę, o hidratuotų klinkerio mineralų tankis mažesnis negu buvo nehidratuotų junginių. Tačiau nehidratuoto cemento ir viso panaudoto vandens pradinis tūris yra didesnis negu hidratuoto cemento tūris. Tokiu būdu kieta fazė išsiplečia, bet visa sistema susitraukia. Tačiau šis susitraukimas yra suvaržytas. Todėl susidaro vadinamos kontrakcijos poros, kurių bendras tūris ne didesnis kaip 5 - 7 % (Невиль 1972, Шейкин 1989).

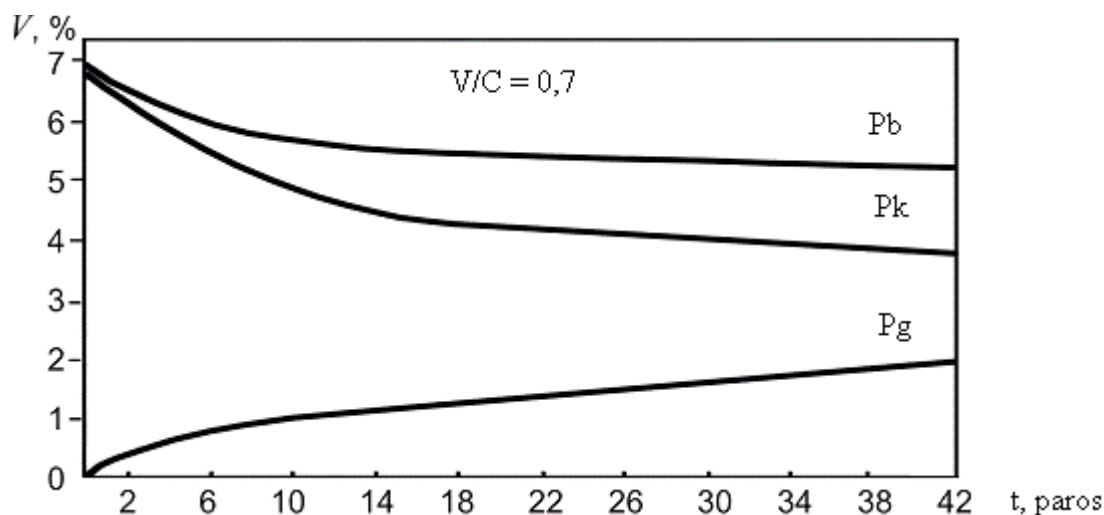


5 pav. Uždaras ir atviras poringumas: (a) uždaros poros, (b) atviros poros (Whiting, Nagi 1998)

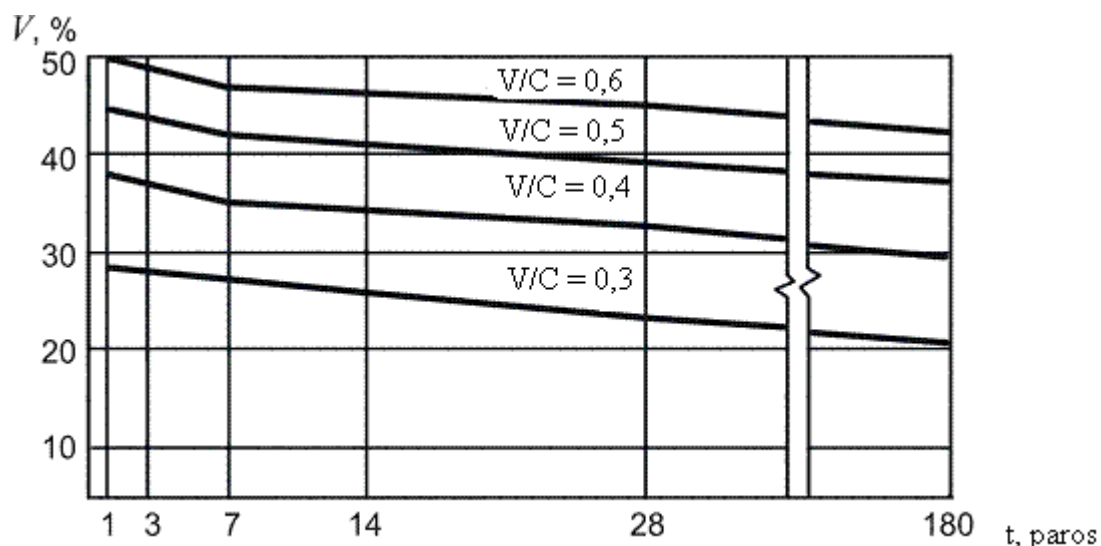
1.4.2. Porų kiekis

Cementiniame akmenyje porų kiekis priklauso nuo vandens kiekio, oro kiekio, kuris patenka maišant, kontrakcijos, gamybos technologijos, temperatūrinių ir susitraukimo deformacijų, cemento smulkumo ir orą įtraukiančių priedų (Соломатов 1989).

Dėl ilgalaikio hidratacijos proceso, naujų kristalų augimo ir persikristalizavimo, poringos cementinio akmens struktūros erdvė nuolat keičiasi. Didžiausias intensyvumas šių pokyčių pastebimas pradiniam hidratacijos laikotarpyje, o vėliau po truputi nyksta. Restruktūrizacijai, jos veikimo metu, turi didelį poveikį vandens kiekis cementiniame akmenyje. Pasikeitimai vykstantys cementinio akmens struktūroje pasižymi sumažėjusiu bendru ir kapiliariniu poringumu, ir padidėjusiu gelio poringumu (6 pav.). Atvirų porų tūrio priklausomybė nuo kietėjimo laiko pavaizduota 7 paveiksle.



6 pav. Bendro, kapiliarinio ir gelio poringumo kitimas laikui bėgant (Шейкин 1979)



7 pav. Atvirų porų tūrio priklausomybė nuo kietėjimo laiko (Шейкин 1979)

1.4.3. Porų klasifikacija

Buvo siūloma daug įvairių porų dydžio klasifikavimo modelių, kuriais remiamasi buvo sudaryta ir pripažinta Tarptautinės teorinės ir taikomosios chemijos sąjungos porų klasifikacija, charakterizuojanti porų suskirstymą pagal skersmenį:

- mikroporos, kurių skersmuo mažesnis nei 2 nm;
- mezoporos, kurių skersmuo svyruoja nuo 2 iki 50 nm;
- makroporos, kurių skersmuo didesnis kaip 50 nm.

Ribos tarp skirtingų porų klasių nėra griežtai apibrėžtos ir priklauso nuo porų formos. Dubininas, taip pat, siūlė tokius terminus, kaip: ultramikroporas, kurių skersmuo mažesnis nei 0,6 nm ir supermikroporas, kurių skersmuo svyruoja nuo 0,6 iki 1,6 nm (Dubinin 1960, Dubinin 1978). Literatūroje aptinkama, jog ultramikroporos kartais pavadinamos submikroporomis.

Būtina atkreipti dėmesį į tai, kad dydžių ribos mikro-, mezo-, ir makroporoms kartais medžiagų moksle yra naudojamos skirtingai. Pavyzdžiui J. Young et al., 1998, identifikuoja poras, kurių skersmuo yra mažesnis nei 2,5 nm, kaip mikroporas, kurių skersmuo svyruoja nuo 2,5 ir 100 nm - kaip mezoporas, o didesnio skersmens kaip 100 nm – makroporas (Young et al., 1998). Makroporomis vadinti poras, kurių skersmuo yra didesnis kaip 100 nm, taip pat pasiūlė P. Mehta ir D. Manmohan (Mehta, Manmohan 1980). Skirtumai dydžio apibrėžimų tarp medžiagų mokslo ir taikomosios fizikos mokslo nėra labai ryškius. Dėmesį reiktų atkreipti į tai, kaip poros yra įvardijamos kai yra aprašomi tyrimų rezultatai.

Remiantis IUPAC (Tarptautinė teorinės ir taikomosios chemijos sąjunga) ir medžiagų mokslininkais buvo palygintas skirtingų porų dydžių skirstymas ir terminologija (3 lentelė) (Aligizaki 1995).

Reiktų paminėti, tokie terminai, kaip porų spindulys, skersmuo, plotis yra naudojami, kad apibūdinti porų dydį.

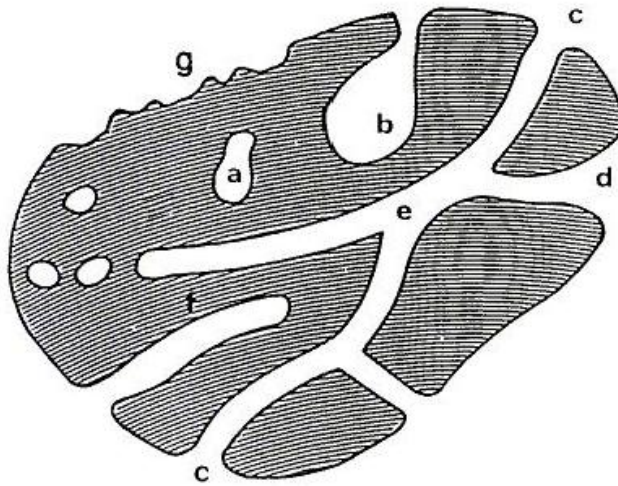
3 lentelė. Porų dydžių skirstymas ir terminologija pagal IUPAC ir medžiagų mokslininkus (Aligizaki 1995)

Pagal IUPAC		Pagal P. Mehta		Pagal S. Mindess				
Pavadinimas	Skersmuo	Porų tipas	Skersmuo	Pavadinimas		Skersmuo	Paveiktos teslos savybės	
Mikroporos	Iki 2 nm	Tarpai tarp C-S-H plokštelių	Nuo 1 nm iki 3 nm	Mikroporos (tarp sluoksnių)	Gelios poros	Iki 0.5 nm	Susitraukimas, valkšnumas esant <u>ivairiam drėgnumui</u>	
				Mikroporos		Nuo 0.5 nm iki 2.5 nm	Susitraukimas, valkšnumas esant <u>ivairiam drėgnumui</u>	
Mezoporos	nuo 2 nm iki 50 nm			Kapiliarai (esant mažam V/C)		Nuo 10 nm iki 50 nm	Smulkūs kapiliarai	Kapiliarinės poros
		Vidutiniai kapiliarai	Nuo 10 nm iki 50 nm		Stipris, laidumas, susitraukimas esant aukštam drėgnumui, <u>>80%</u>			
Makroporos	>50 nm		Kapiliarai (esant dideliame V/C)		Nuo 3 μm iki 5 μm		Stambūs kapiliarai	
		Įtraukto oro poros		Nuo 50 μm iki 1 mm		Įtraukto oro poros		Nuo 0.1 mm iki 1 mm

Iš lentelės matome, kad pagal P. Mehta, poros, kurių skersmuo svyruoja nuo 3 iki 10 nm, nuo 50 nm iki 3 µm ir nuo 5 iki 50 µm, yra nesuskirstytos į klases. S. Mindess pasiūlytoje klasifikacijoje nėra klasifikuojamos poros, kurių skersmuo yra nuo 10 iki 100 µm. Kitų mokslininkų pasiūlytos klasifikacijos buvo labai panašios (Setzer 1991, Oberholster 1986). Iš dydžio ribų ir terminų naudojimo matyti, kad nėra atskiros, konkrečios terminologijos nusakyti įvairaus dydžio poroms cementiniame akmenyje. Dydžių pasiskirstymas tarp kapiliarinių porų ir gelio porų yra per didelės apimties, nes porų dydžio spektras yra nenutrūkstamas.

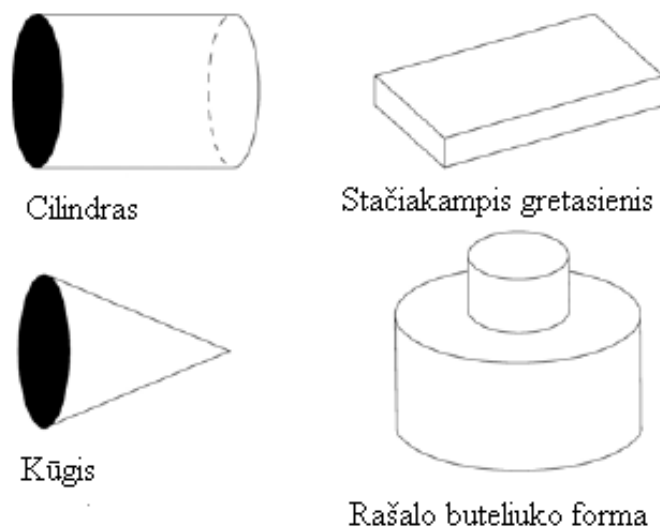
Cementiniame akmenyje esančias poras pagal formą, dydį ir prigimtį patogiau suskirstyti į 3 grupes: 1) kapiliarinės poros, kurių skersmuo 0,1 – 10 µm; 2) gelio poros, kurių skersmuo 15 – 20 Å; 3) oro poros, kurios būna nuo 50 iki 200 µm skersmens (Skripkiūnas 2007).

Taip pat, poros gali būti suskirstytos pagal jų ryšį su aplinka (8 pav.) (IUPAC 1994). Poros, kurios jungiasi su išorine aplinka yra atviros, kaip (b), (c), (d), (e) ir (f). Atviros tik ties viena pabaiga (b ir f). Jos taip pat apibūdinamos kaip aklosios (baigtinės) poros. Kitos gali būti atviros abiejose pabaigose (per poras, (e)). Poros neturinčios jokio ryšio su aplinka – uždarnosios (a).



8 pav. Porų klasifikacija pagal jų ryšį su aplinka: a – uždaros poros, b, f – atviros poros iš vienos pusės, c, d, g – atviros poros, e - atviros poros abiejuose galuose (IUPAC 1994)

Poras dar galima suskirstyti pagal formą. Pagal Kaneko klasifikaciją ir panašias Bindra studijas, porų suskirstymas pagal formas remiasi geometrinėmis figūromis: cilindras, stačiakampis gretasienis, kūgis, rašalo buteliuko forma (9 pav.) (Kaneko 1994, Bindra 2000).



9 pav. Porų geometrinė klasifikacija (Kaneko 1994)

1.5. Poringumo nustatymo metodikos

Cementinio akmens poringos struktūros apibūdinimui yra naudojamas pakankamai platus spektras metodų. Eksperimentiniai metodai buvo kuriami remiantis taikomosios fizikos ir medžiagų mokslo teorinėmis formuluotėmis. Dauguma bandymų metodikų cementiniui akmeniui buvo

taikomi juos pritaikant iš kitų medžiagų bandymo metodikų, pavyzdžiui akmenų. Kai kurių metodikų prielaidos laikui bėgant tapo netinkamos.

Bendro poringumo nustatymas yra bene lengviausiai nustatomas parametras, o ir naudojant skirtingus metodus, gautos reikšmės yra labai panašios, kas parodo, kad tyrimo metodai yra pakankamai tikslūs. Kiekvienas tyrimo metodas nustato poringumo parametrus skirtingame porų dydžio intervale. Kai kurie tyrimo metodai gali tirti tik atvirą poringumą, kaip kad laidumo ir įgėrio metodai. Kiti metodai turi priėjimą tiek prie atvirų, tiek prie uždarų porų, kaip kad metodai naudojantys radiaciją. Sorbcijos metodai plačiai naudojami apibūdinti poras didesnes nei 30 nm. Poros, kurių dydžio intervalas yra 2,5 nm – 100 μm gali būti tiriamos gyvsidabrio porometrijos metodu. Gyvsidabrio porometrijos metodu priimama, kad gyvsidabrio įsiskverbto poros yra cilindro formos, ko pasekoje yra išmatuojamas charakteristinis porų dydžio pasiskirstymas, o ne realus porų dydžio pasiskirstymas. Gyvsidabrio porometrijos rezultatai gali būti panaudoti cementinio akmens parametrų palyginimui, kai cementinio akmens sistemos pakeitimai vienodi. Atominis magnetinis rezonansas naudojamas tirti bandinius, kurie nėra visiškai išdžiovinti. Didelės poros, kaip sferinės įtraukto oro poros, analizuojamos optiniais metodais. Per paskutinius 25 metus ypač populiarios tapo kompiuterizuotos vaizdų analizavimo technologijos. 4 lentelėje yra išvardintos įvairios cementinio akmens poringumo parametrų nustatymo metodikos, iš kurių tris aš panaudojau savo darbe. Taip pat, ties bandymų metodikomis yra pavaizduoti porų dydžio intervalai, kurių ribose kiekvieną metodiką yra naudojama (Aligizaki 1995, Kalliopi, Aligizaki 2006).

4 lentelė. Cementinio akmens poringumo parametrų nustatymo metodikos pagal tiriamus porų dydžio intervalus (Aligizaki 1995)

Skersmuo	1 nm	10 nm	100 nm	1 μm	10 μm	100 μm	1 mm
Porų pavadinimai pagal IUPAC	Mikroporos		Mezoporos		Makroporos		
Porų pavadinimai pagal betono mokslų terminologiją	Gelio poros		Kapiliarinės poros			Oro poros	
Tyrimo metodai							
Gyvsidabrinė porometrija							
Dujų adsorbcija							
Wandens adsorbcija							
Helio piknometrija							
Terminė porometrija							
Atominis magnetinis rezonansas							
Optinė mikroskopija							
Elektroninė mikroskopija							

Bandymų metodai, naudojami eksperimentiškai išmatuoti porų tūrį arba nustatyti porų dydžio pasiskirstymą cementinio akmens poringoje struktūroje, gali būti suskirstyti į tiesioginius ir netiesioginius metodus (Haynes 1973, Pratt 1988).

Netiesioginiai bandymo metodai, tai 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 ir kiti. Dažniausiai naudojami netiesioginiai bandymo metodais (Kalliopi, Aligizaki 2006):

- gyvsidabrio porometrija;
- dujų adsorbcija;
- terminė porometrija;
- atominis magnetinis rezonansas.

Tiesioginiai bandymo metodai – tokie metodai, kai tiesiogiai tiriamas bandinio paviršius, jo mikrostruktūra, kur pamatuojamas porų dydis ir forma bei matematinės analizės metodais išanalizuojamas ryšys tarp poringos erdvės ir kietos fazės. Dažniausiai naudojami tiesioginio bandymo metodai (Kalliopi, Aligizaki 2006):

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

1.5.1. Vandens įgėrio metodas

Cementinio akmens poringumo parametrai nustatomi matuojant vandens įgėrio kinetiką pagal ГOCT 12730.4-78.

Pagal šią metodiką nustatomas atvirasis (kapiliarinis) poringumas, bendrasis poringumas ir uždasis poringumas (įtrauktas oras betone). Taip pat nustatomi porų dydį apibūdinantys santykiniai rodikliai, tai: λ – vidutinio porų dydžio rodiklis ir α – porų vienodumo rodiklis (ГOCT 12730.4-78).

Žinant minėtus poringumo parametrus, galima prognozuoti cementinio akmens atsparumą šalčiui pagal atsparumo šalčiui kriterijų:

$$K_{\text{с}} = \frac{P_u}{0,09 \cdot P_a} ; \quad (1.1)$$

čia $K_{\text{с}}$ – atsparumo šalčiui kriterijus;

P_u – uždasis poringumas (oro kiekis cementiniame akmenyje), %;

P_a – atvirasis (kapiliarinis) poringumas, %.

Žinant cementinio akmens atsparumo šalčiui kriterijų K_s , galima prognozuoti užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių, kurį atlaikys cementinis akmuo pagal empirinę priklausomybę.

Atlikimas

Įranga. Bandymas atliekamas pagal ГООТ 12730.4-78 standarte nurodytą metodiką. Naudojama įranga: svarstyklės, kurių svėrimo tikslumas 0,1g, vandens vonia, termometras, sekundmetis, skudurėlis.

Bandiniai. Bandinys turi būti ne didesnis kaip 100 mm kraštinės kubai. Geriausia naudoti atskeltus apie 50 mm kraštinės panašios į kubą formos bandinius. Išgręžtų iš konstrukcijos bandinių matmenys gali būti kitokie.

Bandomi ne mažiau kaip 4 bandiniai.

Bandymas. Cementinio akmens bandiniai nuvalomi, nuo jų nuimamos visos atskilusios dalys. Bandiniai išdžiovinami 105 ± 5 °C temperatūroje iki pastovios masės.

Išdžiovinti bandiniai pasveriami, rezultatai surašomi į rezultatų lentelę.

Bandiniai merkami į vandens vonią ir atliekamas bandinių svėrimas po 15 min., po 1 h, po 1 paros, po 2 parų iki kol pasiekama pastovi masė. Prieš sveriant iš vandens išimtus bandinius jų paviršius nuvalomas drėgnu audeklu. Bandinių paviršiuje turi nelikti vandens. Bandymo pabaigoje bandiniai pasveriami hidrostatinėmis svarstyklėmis. Svėrimų rezultatai surašomi į rezultatų lentelę (ГООТ 12730.4-78).

Bandymo rezultatai. Cementinio akmens bendrasis poringumas skaičiuojamas pagal lygtį:

$$P = \left(1 - \left(\frac{\rho_b}{\rho_{bs}} \right) \right) 100, \% ; \quad (1.2)$$

čia ρ_b – cementinio akmens tankis, kg/m^3 ;

ρ_{bs} – cementinio akmens savitasis tankis, kg/m^3 .

Cementinio akmens tankis skaičiuojamas pagal lygtį:

$$\rho_b = m_b \cdot \frac{\rho_v}{m_{bd} - m_{bv}}, \quad \frac{kg}{m^3}; \quad (1.3)$$

čia m_b – cementinio akmens masė (sausos), kg;

m_{bd} – drėgno (sudrėkinto iki pastovios masės) cementinio akmens masė, kg;

m_{bv} – drėgno masė vandenyje, kg;

ρ_v – vandens tankis, kg/m³ (priimama, kad vandens tankis lygus 1000 kg/m³).

Cementinio akmens atvirasis poringumas lygus vandens įgėriui pagal turį ir skaičiuojamas pagal lygtį:

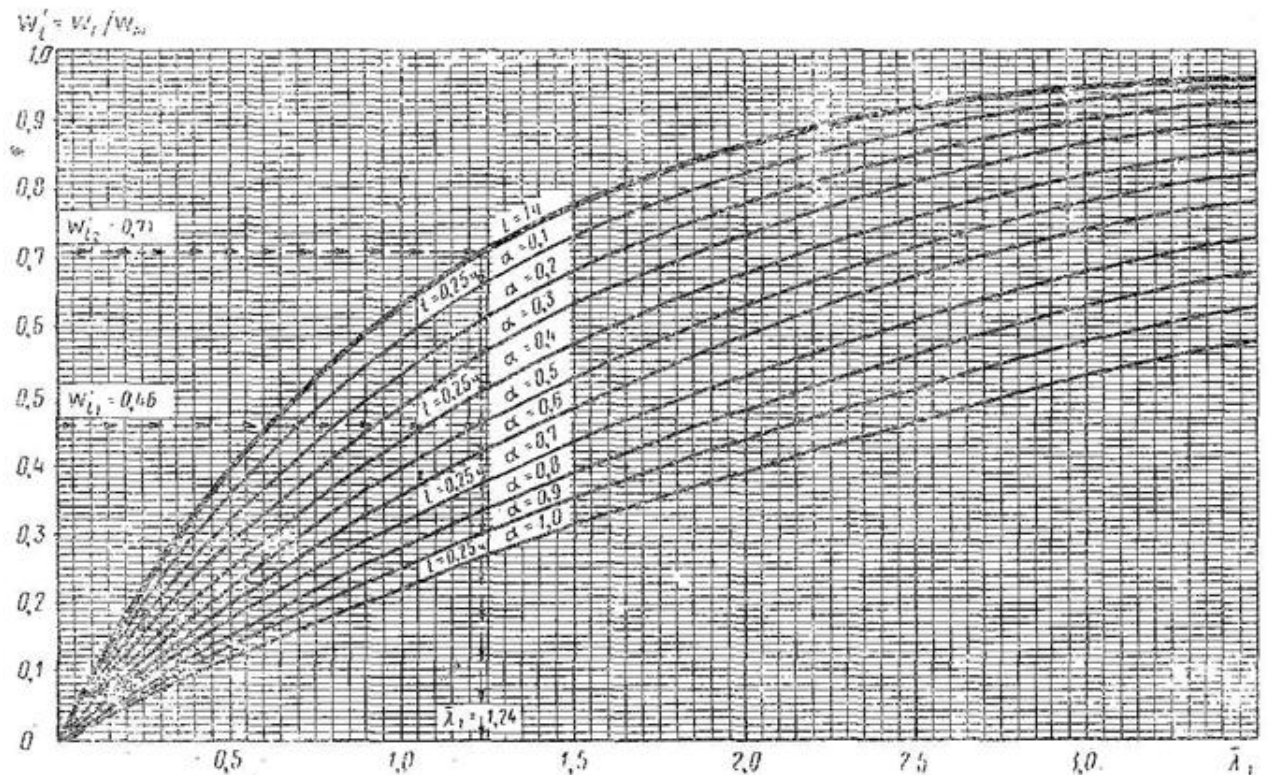
$$P_a = \left(\frac{m_{bd} - m_b}{m_b} \right) \cdot \left(\frac{\rho_b}{\rho_v} \right) \cdot 100, \% . \quad (1.4)$$

Cementinio akmens uždarojo poringumas skaičiuojamas pagal lygtį:

$$P_u = P - P_a, \% . \quad (1.5)$$

Cementinio akmens vidutinių porų dydžio rodiklis λ ir porų vienodumo rodiklis α surandami iš nomogramos (10 pav.) pagal Cementinio akmens vandens įgėrius po 15 min. ir 1 h, kurie skaičiuojami pagal lygtį:

$$I_b = \left(\frac{m_{bd} - m_b}{m_b} \right) . \quad (1.6)$$



10 pav. Nomograma vidutinių porų dydžio rodiklio λ ir porų vienodumo rodiklio α nustatymui (ГОСТ 12730.4-78)

1.5.2. Optinės mikroskopijos metodas

Čia aprašomas bandymo metodas nustatyti oro porų struktūrai sukietėjusių betono bandinių. Oro porų struktūra aprašyta naudojant parametrus:

- I. Bendras oro kiekis;
- II. Specifinis oro porų paviršius;
- III. Tarpų veiksnys;
- IV. Oro porų dydžio suskirstymas;
- V. Mikro oro porų tūris.

Bandymo metodas yra taikomas tik sukietėjusių betono bandinių tyrimui, kur betono mišinio proporcijos yra tiksliai žinomos (prEN 480-11:2005).

Norminės nuorodos

- prEN 480-1 , Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 1: Reference concrete and reference mortar for testing;

- EN 934-2, Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labeling;
- ISO 1920-3, Testing of concrete - Part 3: Making and curing test specimens.

Šie nurodyti dokumentai yra būtini taikant šį bandymo metodą. Terminuotos nuorodos taikomos tik atnaujintos. Neterminuotos nuorodos taikomos vėliausiai atnaujinto dokumento nuoroda (įskaitant visus papildymus).

Terminai ir apibrėžtys

Oro poros

Erdvė apsupta sukietėjusio cementinio akmens, kuri buvo pripildyta oro ar kitų dujų iki cemento tešla sukietėjo. Tai nepriskiriama submikroskopinių matmenų poroms, kaip poringumas būdingas hidratuotai cemento tešlai. Šio bandymo tikslui visos poros yra laikomos matomomis priartinus, kai chordo ilgis siekia iki 4 mm, išskyrus akivaizdžius įtrūkius.

Bendras poringumas A

Viso cementinio akmens ir oro porų tūrio santykis, išreikštas procentais.

Tešlos tūris P

Viso betono, tai yra suma cemento, vandens ir priedų tūrių, ir sukietėjusios cemento tešlos tūrio santykis išreikštas procentais.. Šiam bandymui jis skaičiuojamas pagal žaliavų masę naudojamą bandiniams.

Savitasis oro porų α sistemos paviršius

Apskaičiuojamas parametras, kuris parodo bendrą oro porų paviršiaus plotą, suskirstytą pagal jų tūrį. Vienetai yra mm. Apskaičiavimo metodas paremtas vidutiniu chordų ilgiu ir galimas bet kokiai sferinių tuštumų sistemai.

Tarpų veiksnys

Apskaičiuojamas parametras, susijęs su didžiausiu atstumu nuo bet kurio taško iki oro poros krašto, matuojant per cementinio akmens kietąją fazę. Vienetai yra mm. Šio parametro skaičiavimas paremtas prielaida, kad visos oro poros yra vienodo dydžio ir tolygiai pasiskirsčiusios cementiniame akmenyje, ir kad modelio sistema turi tokį pat tūrį bei paviršiaus plotą kaip ir reali sistema.

Oro porų suskirstymas

Nustatomas pagal suskaičiuotas reikšmes, tai yra pagal įvairių skersmenų oro porų skaičių ir/arba tūrį sukietėjusiam betone.

Mikrooro tūris A_{300}

Skaičiuojamas parametras, parodantis oro tūrį, kurį užima 0,3 mm arba mažesnio skersmens poros. Šio parametro reikšmė randama skaičiuojant oro porų pasiskirstymą.

Stebėjimo linija

Viena iš linijų, einančių per paruoštą bandinį, stebima optiniu mikroskopu bandymo metu.

Stebimos linijos ilgis T_{tot}

Tai bendras matavimo metu stebimas atstumas, kuris susideda iš dviejų dalių: bendras stebimas atstumas kietos fazės (T_s) ir bendras stebimas atstumas per oro poras (T_a). Bet koku atveju matavimo vienetai yra mm.

Chordo ilgis l

Atstumas stebimos linijos, kuri eina per oro porą. Matavimo vienetai yra μm .

Chordo ilgių klasifikacija

Chordo ilgis per individualią oro porą yra klasifikuojamas į klases, kuris remiasi chordo ilgiu. Bendras chordų skaičius, bet kurioje klasėje (i) yra žymimas C_i .

Principas

Sukietėję bandiniai yra paruošiami bandymui nušveičiant taip, kad paviršius būtų plokščias ir tinkamas tyrimui mikroskopu.

Oro porų struktūra yra nustatoma stebint pasižymėtas stebėjimo linijas. Oro porų kiekis yra skaičiuojamas, kaip ir kiekvieno chordo ilgis per stebimą liniją.

Atliktų matavimų matematinė analizė leidžia susisteminti duomenis pagal reikiamus parametrus.

Įranga

Čia pateikiamas reikalingų priemonių sąrašas atlikti bandymui. Kitos priemonės taip pat gali būti naudojamos, jei yra nustatyta, kad galima gauti patenkinamus rezultatus. Ne visos priemonės gali būti reikalingos individualiam bandymo matavimui.

Bandinio paruošimui naudojama įranga:

- a) Deimantinis pjūklas;
- b) Šlifavimo mašina. Viena ar daugiau priemonių, kuriomis galima suteikti reikiamą paviršių. Tai gali būti ketaus diskai, dažniausiai mažiausio skersmens (400 mm), naudojami kartu su silicio karbido milteliais su įvairiu granulių dydžiu (dažniausiai 120, 60, 30, 16 ir 12 μm) arba priemonės su specialiais šlifavimo diskais su įvairiu granulių stambumu.
- c) šaldytuvas ir kaitinimo kamera;
- d) įvairios cheminės priemonės, nušlifavimo paviršiaus apdorojimui (glicerolis, cinko pasta, gipso milteliai (dalelių dydis $\leq 3 \mu\text{m}$)).

Mikroskopinei analizei naudojama įranga:

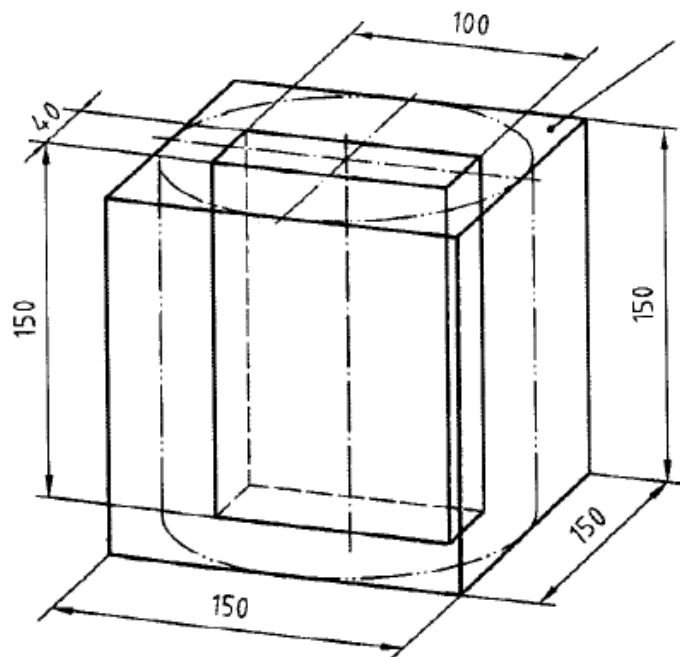
- a) Mechanizuotas arba rankinis bandymo stalelis;
- b) Apšvietimo įrenginys;
- c) Įrašymo įrenginys, kuris įrašo stebimos linijos atstumą, visą stebėtų oro porų skaičių, suskirstytą į klases pagal skirtingą chordų ilgį;
- d) Optinis mikroskopas galintis priartinti vaizdą 100 ± 10 kartų. Priemone turi būti įmanoma išgauti reikiamą ryškumą, kad būtų galima suskirstyti chordus į klases.

Bandinio gamyba ir ruošimas

Bandinio gamyba

Du bandiniai, mažiausio matmens 150 mm, pagaminti pagal realią gaminio sistemą. Bandiniai gali būti arba 150 mm kubai arba 150 mm skersmens cilindrai.

Kai betonas sukietės, mažiausiai po 7 dienų, iš bandinio vidurio turi būti išpjautas bandinys (11 pav.), kurio plotis 100 mm, aukštis 150 mm, storis 20 mm. Vienas iš didžiausių paviršių yra naudojamas bandymui.



11 pav. Bandinio išpjovimas iš gaminio (prEN 480-11:2005)

Bandomo paviršiaus paruošimas

Išpjauto bandinio paviršiai šlifuojami šlapiuoju būdu, kol tampa plokšti.

Po šlapiojo šlifavimo smulkiomis vulkaninėmis dalelėmis pasiekiamas bandymui atlikti tinkamas paviršiaus lygumas. Kai tai padaroma, paviršius nuvalomas, kad neliktų jokių likučių. Sausas paviršius turi būti matinis ir neturėti jokių pastebimų reljefo pakitimų. Oro porų kraštai turi būti aštrūs, nesuirę ir nesuapvalinti. Kad poros neužsikimštų, tuo turi būti rūpinamasi viso šlifavimo proceso metu.

Po poliravimo smulkiomis vulkaninėmis dalelėmis nuo paviršius nuvalomas vandeniu arba oro srove nuvalomi likučiai.

Tikslių rezultatų galima tikėtis tik atsargiai ir kruopščiai nupoliravus bandinių paviršius.

Mikroskopinė procedūra

Procedūros pagrindai

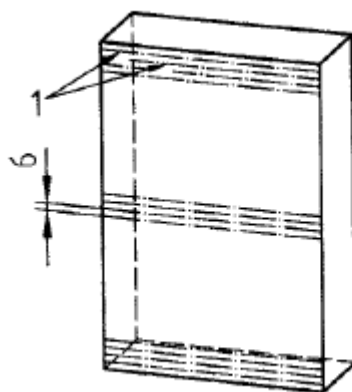
Bandiniai yra padedami ant bandymo stalelio taip, kad stebėjimo linija eitų lygiagrečiai bandinio viršutinei briaunai. Minimalus stebimos linijos ilgis turi būti 1200 mm, o viso testo ne mažiau kaip 2400 mm. Stebimų linijų ant bandinio paviršiaus turi būti tiek, kad atitiktų bandinio stebėjimui iškeltą sąlygą. Taip pat reikia pasirūpinti, kad į stebimą liniją nepatektų pažeistos bandinio vietos.

Stebimos linijos turi būti išdėstytos taip, kaip parodyta 12 paveiksle.

a) Keturios linijos yra pažymimos viršutinėje bandinio dalyje per visą jo plotį. Viršutinė linija turėtų būti apytiksliai 6 mm žemiau bandinio briaunos, o kitos linijos turi būti išsidėsčiusios viena nuo kitos lygiagrečiai žemyn tokiu pat atstumu.

b) Kitos keturios linijos pažymimos apatinėje bandinio dalyje. Žemiausia linija turėtų būti apytiksliai 6 mm nutolusi nuo žemutinės bandinio briaunos, o kitos linijos turi būti išsidėsčiusios viena nuo kitos lygiagrečiai aukštyt tokiu pat atstumu.

c) Kitos stebėjimo linijos turi būti išdėstytos ant bandinio paviršiaus vidurinės zonos taip, kad bendras ilgis atitiktų minimalų reikalaujamą stebimų linijų ilgį. Gali prireikti ir didesnio kiekio, jei stebimose linijose buvo rasta paviršiaus pažeistų vietų.



12 pav. Stebėjimo linijų išdėstymas bandinio paviršiuje (prEN 480-11:2005)

Įrašomi dydžiai

Bandinio paviršius stebimas mikroskopu, priartinus 100 ± 10 kartų. Priartinimas matavimo metu negali kisti.

a) bandinio paviršiaus kietoji dalis, T_s ;

b) tuštumos, T_a .

Sudėjus šiuos dydžius ganamas bendras stebimos linijos ilgis, T_{tot} .

Jeigu turi būti nustatytas porų dydžio pasiskirstymas ir/arba mikro-porų tūris, papildomai reikia suskaičiuoti stebėjimo linijos, kertančios oro poras, atitinkančius chordus taip:

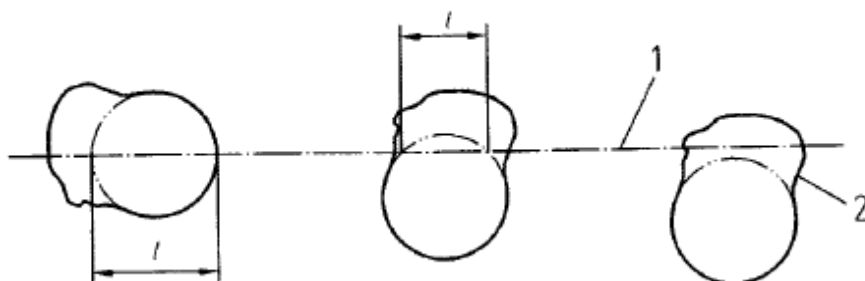
c) apskaičiuotas kiekvienas chordas iki artimiausių $5 \mu\text{m}$;

d) bendras chordų skaičius kiekvienai klasei, naudojantis klasių ribomis, pateiktomis 5 lentelėje, ir tolesniais paaiškinimais.

Ši procedūra padeda suskirstyti visus chordus į 28 klases pagal skirtingus ilgius. Vėliau tokia klasifikacija gali būti panaudota skaičiuojant atitinkamų porų pasiskirstymą. Į šiuos

skaičiavimus reikia įtraukti visus chordus nuo 0 iki 4000 μm. Vienintelė išimtis – aiškiai matomi įtrūkiai.

Jei nepriklausomai nuo atsargaus šlifavimo, porų briaunos sugadintos ties stebima linija, tada jos bus matuojamos kaip chordai, kaip nurodyta 13 pav.



13 pav. Chordo ilgio ir porų matavimas, esant briaunų defektui (prEN 480-11:2005)

Skaičiavimai

Gauti duomenys

Tolesni duomenys bus gaunami iš gautų reikšmių bandymo metu. Skaičiavimo tikslui visi duomenys abiejų bandinių iš to paties cementinio akmens bus susumuoti.

- I) kietos fazės tūris skaičiuojamas nuo mišinio proporcijų, P;
- II) bendras stebimos linijos ilgis per vientisą paviršių, T_s ;
- III) bendras stebimos linijos ilgis per oro poras, T_a ;
- IV) atskirų chordų skaičius per oro poras pagal įvairias klases, C_i .

Bendras stebimos linijos ilgis

Jis suskaičiuojamas, kaip stebimos linijos per vientisą paviršių ir per tuštumas suma.

$$T_{tot} = T_s + T_a. \quad (2.1)$$

Bendras oro tūris

Jis apskaičiuojamas, kaip proporcija bendros stebimos linijos, kuri kirto poras.

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}}. \quad (2.2)$$

Bendras išmatuotų tuštumų skaičius

Jis apskaičiuojamas kaip tuštumų skaičiaus suma N kiekvienoje dydžių klasėje.

$$N = \sum C_i \quad (2.3)$$

Specifinis oro paviršius

$$\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a} \quad (2.4)$$

Kietos fazės ir oro santykis

Jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R = \frac{P}{A} \quad (2.5)$$

Tarpų faktorius

Šio dydžio apskaičiavimas priklauso nuo R dydžio. Jei $R > 4,342$, tada skaičiuojama pagal (2.6) formulę, jei $R \leq 4,342$ - pagal (2.7) formulę.

$$\bar{L} = \frac{3 \left[1,4(1 + R)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]}{\alpha} \text{ mm}; \quad (2.6)$$

$$\bar{L} = \frac{P \cdot T_{tot}}{400 \cdot N} \text{ mm}. \quad (2.7)$$

Mikrooro tūris

Mikrooro tūris A_{300} yra paimamas tiesiogiai iš 5 lentelės kaip suskaičiuota reikšmė 10 stulpelyje 18-tai klasei ir išreikšta tūrio procentais.

Oro tuštumų paskirstymas

1. Skaičiavimo pagrindai.

Oro porų pasiskirstymas skaičiuojamas pagal chordų ilgius, išmatuotus bandymo metu. Paskirstymas yra pagrįstas modeliu, kuris nustato oro poroms tam tikras skersmens ribas. Skaičiavimui reikalingi duomenys: bendras stebėjimo linijos ilgis T_{tot} ir chordų ilgio pasiskirstymas.

2. Chordų dažnumo skaičiavimas.

Chordai išmatuojami ir suskirstomi į klases pagal ilgį 5 lentelėje, registruojami iki artimiausio per 5 μm. Klasės žymėjimo numeriai ir ribos yra pateiktos 5 lentelės 1 ir 2 stulpelyje. Lyginant su klasių ribomis, kiekvienas chordas yra priskiriamas atitinkamai klasei. Bendras chordų skaičius kiekvienoje klasėje yra įrašomas į 3 stulpelį. Chordų skaičius milimetre apskaičiuojamas dalijant gautą skaičių 3 stulpelyje iš T_{tot} , rezultatai įrašomi į 4 stulpelį.

3. Porų dažnumo skaičiavimas.

Ne kiekviena pora atsiduria stebėjimo linijoje, kaip ir ne visas bandinys yra padengtas stebėjimo linijomis, todėl būtina suskaičiuoti porų skaičių kubiniame milimetre, kad būtų galima nustatyti chordų pasiskirstymą.

Ši reikšmė kiekvienai klasei pagal chordo ilgį pateikta 5 stulpelyje. Dalijant 4 stulpelį iš 5 stulpelio gaunamas bendras porų skaičius kubiniame milimetre bandinio, atitinkamoje klasėje. Reikšmė įrašoma į 6 stulpelį.

Pastaba: 5 stulpelyje pateikta reikšmė yra pastovi visais atvejais ir gaunama pagal šią formulę:

$$Reikšmė = \frac{\pi \cdot (5 + l_{max} - l_{min}) \cdot (l_{max} + l_{min})}{4 \cdot 10^6}, \text{ mm}^2; \quad (2.8)$$

čia

l_{max} ir l_{min} – didžiausias ir mažiausias chordo ilgis klasėje.

4. Porų pasiskirstymos skaičiavimas

Bet kokio ilgio chordas gali būti rastas bet kurioje poroje, kurios skersmuo yra didesnis už chordo ilgį. Apskaičiuojamas iš 6 stulpelyje esančios klasės atimant žemiau esančią klasę, o gautą reikšmę patalpinama 7 stulpelyje.

5. Oro tūrio skaičiavimas

Oro tūris kiekvienai porų klasei yra apskaičiuojamas dauginant reikšmę iš 7 stulpelio su reikšme iš 8 stulpelio ir 100 %. Rezultatas gaunamas procentais ir įrašomas 9 stulpelyje. Kumuliacinis oro tūris įrašomas 10 stulpelyje.

Pastaba: paskutinis skaičius 10 stulpelyje yra bendras suminis oro tūris. Jis turi būti toks pat kaip apskaičiuotas prieš tai pateiktoje bendro oro tūrio skaičiavimo formulėje arba labai mažai skirtis priklausomai nuo pasirinkto skaičiavimo būdo.

Bandymo ataskaita

Bandymo ataskaitoje turi būti įtraukta informacija:

- pilnai aprašyta bandinio sudėtis, tankis ir šviežio betono oro tūris;
- detalūs betono skaičiavimai;
- apskaičiuotos suminės oro tūrio reikšmės, specifinis oro porų paviršius ir tarpų faktorius

Jei reikalinga:

- Mikro oro tūris;
- Oro porų pasiskirstymo kreivė.

Skaičiavimų 5 lentelėje tikslas yra išvesti oro porų pasiskirstymą pagal skersmenį iš išmatuotų chordų pasiskirstymo. Kai oro porų skermens pasiskirstymas yra žinomas tada galima suskaičiuoti įtraukto oro tūrį.

Linijinio stebėjimo metu įtraukiamos tik tos poros, kurios yra stebėjimo linijoje ir skaičiuojamos chordo pasiskirstyme. Didelė dalis nebus įtraukta. Skaičiavimai 5 lentelėje suteikia galimybę išmatuoti bendrą porų skaičių statistinės analizės metodais.

Prielaidos

Pagrindinė prielaida yra ta, kad nei viena oro pora nėra įtraukiama daugiau kaip kartą į linijinį stebėjimą. Tai reiškia, kad kiekvienas įrašytas chordas atspindi skirtingą oro porą.

Kita prielaida yra tam, kad palengvinti skaičiavimus – realus oro porų pasiskirstymas gali būti atspindėtas suskaičiuotu pasiskirstymu pagal kiekvieną klasę (2 stulpelis). Jokio išsiplėtimo, yra duoti tik nuolatiniai oro porų skersmenys.

5 lentelė. Oro porų pasiskirstymo nustatymas (prEN 480-11:2005)

Stebėjimo linijos ilgis, T_{tot}										
Stulpelis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rodiklis	Klasė	Klasės ribos	Chordų skaičius klasėje	Chordų dažnumas	Galimos poros	Bendras porų skaičius įskaitant chordus	Poros klasėje	Porų tūris	Oro tūris	Kumuliacinis oro tūris
Šaltinis		Žr. pastaba	Išmatuotas C_i	St. 3/ T_{tot}	Žr. pastaba	St. 4/St. 5	St. 6-St. 6 sekantis sk.	Žr. pastaba	St. 7xSt. 8x 100	Bendras St. 9
Matavimo vnt.		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	1	0 – 10			0,0001178			$5,24 \times 10^{-7}$		
	2	15 – 20			0,0002749			$4,19 \times 10^{-6}$		
	3	25 – 30			0,0004320			$1,41 \times 10^{-5}$		
	4	35 – 40			0,0005890			$3,35 \times 10^{-5}$		
	5	45 – 50			0,0007461			$6,54 \times 10^{-5}$		
	6	55 – 60			0,0009032			$1,13 \times 10^{-4}$		
	7	65 – 80			0,0022780			$2,68 \times 10^{-4}$		
	8	85 – 100			0,0029060			$5,24 \times 10^{-4}$		
	9	105 – 120			0,0035340			$9,05 \times 10^{-4}$		
	10	125 – 140			0,0041630			$1,44 \times 10^{-3}$		
	11	145 – 160			0,0047910			$2,14 \times 10^{-3}$		
	12	165 – 180			0,0054190			$3,05 \times 10^{-3}$		
	13	185 – 200			0,0060476			$4,19 \times 10^{-3}$		
	14	205 – 220			0,0066760			$5,58 \times 10^{-3}$		
	15	225 – 240			0,0073040			$7,24 \times 10^{-3}$		
	16	245 – 260			0,0079330			$9,20 \times 10^{-3}$		
	17	265 – 280			0,0085610			$1,15 \times 10^{-2}$		
	18	285 – 300			0,0091890			$1,41 \times 10^{-2}$		
	19	305 – 350			0,0257200			$2,24 \times 10^{-2}$		
	20	355 – 400			0,0296500			$3,35 \times 10^{-2}$		
	21	405 – 450			0,0335800			$4,77 \times 10^{-2}$		
	22	455 – 500			0,0375000			$6,54 \times 10^{-2}$		
	23	505 – 1000			0,5910000			$5,24 \times 10^{-1}$		
	24	1005 – 1500			0,9837000			1,77		
	25	1505 – 2000			1,3760000			4,19		
	26	2005 – 2500			1,7690000			8,18		
	27	2505 – 3000			2,1620000			14,1		
	28	3005 – 4000			5,5020000			33,5		
Pastaba: 1, 2, 5 ir 8 stulpelių dydžiai yra pastovūs.										

1.5.3. Gyvsidabrio porometrija

Gyvsidabrio porometrija leidžia nustatyti porų spindulio dydį ir kiekvieno porų dydžio tūrį. Gyvsidabris nedrėkina daugelio neorganinių medžiagų ir į poras gali patekti veikiamas slėgio. Didinant slėgį gyvsidabris vis labiau skverbiasi į smulkesnes poras ir kapiliarus.

Porų skersmuo apskaičiuojamas iš lygties:

$$pd = -4\sigma \cos \theta ; \quad (3.1)$$

čia p – slėgis;

d – porų diametras;

σ – gyvsidabrio paviršiaus įtempimas;

θ – gyvsidabrio ir analizuojamosios medžiagos drėkinimo kampas.

Lygtis rodo, kad esant nuliniam pertekliniam slėgiui nedrėkinantis skystis nepakliūs į poras.

Gyvsidabrio porometrijos bandymo metu, bandiniai yra patalpinami kameroje, iš jos išsiurbiamas oras ir bandiniai apsupami gyvsidabriu. Po truputi didinamas slėgis. Kai slėgis padidėja, gyvsidabris ima skverbtis į poras esančias bandinio paviršiuje. Jei porų sistema yra nepertraukiama, tada slėgis yra didinamas iki kol gyvsidabris įsiskverbs į mažiausių porų griovelius ir bendrą bandinio tūrį. Jei poringa struktūra nėra vientisa, gyvsidabris gali įsiskverbti į bandinio tūrį per porų sienelės. Bandymo metu sekant slėgį ir įsiskverbimo tūrį, galima išmatuoti vientisos sistemos porų griovelius arba prasiskverbimo slėgį į pertrauktą sistemą. Porų plotis, atitinkantis didžiausią gyvsidabrio įsiskverbimo greitį didinant slėgį, yra žinomas kaip kritinis porų plotis. Pasiekus šį aukščiausią įsiskverbimo lygį, gyvsidabris ima skverbtis į bandinio vidų (Winslow, Diamond 1970). Bendras bandinių poringumas atitinka įsiskverbusio gyvsidabrio tūrį esant didžiausiam bandymo slėgiui padalintam iš bandinio tūrio, kur gyvsidabris neįsiskverbė.

Gyvsidabrio porometrija negalima nustatyti tikslaus porų dydžio pasiskirstymo, nes gyvsidabris turi patekti į porų tinklą per siauriausias poras (Cook 1991). Bendro poringumo reikšmės, gautos gyvsidabrio porometrijos bandymu, skiriasi nuo kitais metodais nustatytų bendro poringumo reikšmių. Kur poros yra per smulkios arba taip izoliuotos, kad gyvsidabriui įsiskverbti neįmanoma, gyvsidabrio porometrija nurodo mažesnes poringumo reikšmes nei yra faktinės. Kita vertus, gyvsidabrio porometrijos rezultatai gali būti arčiau faktinių verčių nei gaunamų atlikus pagal kitus bandymo metodus, nes gyvsidabris gali suardyti mažas poras arba prasiskverbti į izoliuotas poras (Beaudoin 1979).

Prieš bandymą bandiniai išdžiovinami. Po džiovinimo nustatomas bandinių tankis. Išmatuoti bandiniai patalpinami į porometro (Poromaster PM-33-12) (14 pav.) konteinerį, iš kurio

išsiurbiamas oras. Gyvsidabris įleidžiamas į konteinerį ir nustatomas pradinis slėgis. Slėgis palaipsniui keliamas kol pasiekia maksimalų slėgį, kuris yra apie 345 MPa. Po kiekvieno slėgio padidinimo daroma pertrauka, kad slėgio ir tūrio matavimai stabilizuotųsi prieš įrašant slėgio/tūrio duomenis. Maksimalus slėgis pasiekiamas per 2 - 3 valandas.



14 pav. Porometras (Quantachrome Corporation 2012)

Porometru Poromaster PM-33-12 galima nustatyti platų savybių, parametrų bei priklausomybių spektrą tiek grafinių, tiek lentelių pavidalo formatais. Porometru Poromaster PM-33-12 galima gauti tokius duomenis: poringumą procentais, piltinį ir savitąjį tankį, porų dydžio pasiskirstymą, laidumą, porų kiekio priklausomybę nuo porų dydžio, porų tūrio priklausomybę nuo porų dydžio, kaupiamojo porų paviršiaus ploto priklausomybę nuo porų dydžio, kaupiamojo porų tūrio priklausomybę nuo porų dydžio ir kt.

2. Medžiagos ir tyrimai

2.1. Žaliavos

2.1.1. Portlandcementis

Portlandcemenčiu vadinama hidraulinė rišamoji medžiaga, kurios sudėtyje vyrauja kalcio silikatai (70-80 %). Portlandcementis gaunamas sumalus klinkerį ir tam tikrą 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.

Portlandcemenčio gamyba - sudėtingas technologinis ir daug energijos reikalaujantis procesas, jungiantis kasimą radimvietėje ir žaliavų (klienties, molio) tiekimą į gamyklą, žaliavų mišinio ruošimą, žaliavų mišinio sukepinimą - klinkerio gavimą, klinkerio malimą su gipso priedu - portlandcemenčio gavimą (Kičaitė, Mačiulaitis 2001).

Klinkerio kokybė lemia visas portlandcemenčio savybes. Priedai tik reguliuoja jo savybes. Klinkerio kokybė priklauso nuo jo cheminės ir mineralinės sudėties, jo degimo sąlygų ir klinkerio aušinimo režimo.

Pagrindiniai klinkerio oksidai degimo proceso metu sudaro tam tikrus junginius. Pagrindinis klinkerio mineralas yra alitas $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S), kuris lemia kietėjimo greitį, stiprumą ir kitas portlandcemenčio savybes. Jo klinkeryje yra 45-60 %.

Belitas $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) - antrasis pagal svarbą ir kiekį (20-30 %) klinkerio mineralas. Jis kietėja lėtai, bet lemia didelį portlandcemenčio stiprumą jam ilgiau kietėjant.

Trikalcio aluminatas (C_3A) - klinkeryje jo yra 4-12 %. Tai pats aktyviausias klinkerio mineralas, greitai sąveikaujantis su vandeniu. Jis yra sulfatinės korozijos priežastis, todėl sulfatams atspariame portlandcementyje C_3A turi būti ne daugiau kaip 5 %.

Tetrakalcio aliumoferito (C_4AF) klinkeryje yra 10-20 %. Jam būdingu vidutinišku šilumos išsiskyrimu ir greitu kietėjimu užima tarpinę vietą tarp C_3S ir C_2S .

Portlandcemenčio charakteristikas sąlygoja klinkerio mineralų sudėtis, malimo smulkumas, normalus tirštumas, rišimosi trukmė, klasė pagal stiprumą ir kitos techninės savybės.

Portlandcemenčio tankis (be mineralinių priedų) yra 3,05 - 3,15 g/cm³. Jo piltinis tankis priklauso nuo sutankinimo, pvz.; nesutankinto cemento piltinis tankis yra 1,10 g/cm³, labai sutankinto - 1,60 g/cm³, vidutiniškai sutankinto - 1,30 g/cm³ (Kičaitė, Mačiulaitis 2001).

Portlandcementis yra smulki miltelių pavidalo neorganinė rišamoji medžiaga, kuri sumaišyta su vandeniu, rišasi ir kietėja, vykstant hidratacijos reakcijoms ir procesams. Sukietėjusi medžiaga nepraranda stiprumo bei pastovumo ir vandenyje.

Tyrimams naudoto portlandcemenčio CEM I 42,5 R pagrindiniai rodikliai pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Pagrindiniai portlandcemenčio CEM I 42,5 R rodikliai (Akmenės cementas 2011)

Cemento tipas	Šarmai, sk. Na ₂ O kv	Stipris gniuždant po 2 parų	Stipris gniuždant po 28 parų	Spalva
CEM I 42,5 R LST EN 197 – 1	Neribojamas	28 ± 2 MPa	54 ± 3 MPa	Pilka

Portlandcemenčio pagrindinės savybės:

- Tankis;
- Piltinis tankis;
- Malinio smulkumas;
- Rišimosi pradžia;
- Tolygus cementinio mišinio tūrio kitimas ir sukietėjusio cementinio mišinio stipris.

Palaidas cementas turi būti sandėliuojamas neužterštuose ir apsaugotuose nuo drėgmės silosuose. Drėgmė sugadina cementą. Siekiant išvengti palaidojimo ar uždusimo, nevaikščioti uždaroje erdvėje, tokiose kaip silosai, aruodai, ir panašaus pobūdžio talpyklos, kuriuose nėra tinkamų apsaugos priemonių. Cementas gali prikibti arba prilipti prie sienos uždaroje erdvėje ir netikėtai atkibęs kristi. Netinkamos (nesuderinamos) kartu sandėliuoti cheminės medžiagos - stiprios rūgštys (Akmenės cementas 2011).

2.1.2. Plastifikuojantis priedas

Betono kokybė priklauso nuo jo sudėtinių dalių, todėl parenkamos medžiagos, kurios suteiktų betonui norimų savybių pagal paskirtį įvairiems gaminiams ir konstrukcijoms, kad iš jų pastatyti statiniai galėtų patikimai funkcionuoti įvairioje aplinkoje. Daugeliu atvejų tai pasiekama naudojant įmaišinius cheminius priedus, kurie padeda gerinti betono savybes (Gurskis 2008).

Carboxyment 3220 yra superplastiklis pagamintas polikarboksilato polimero pagrindu. Suteikia puikių dispersinių savybių ir ilgalaikį betono mišinio plastiškumą. Carboxyment 3220 mažina vandens kiekį reikalingą betono mišinio gamybai iki 45 % ir leidžia gaminti didelio stiprio

betonus. Esant labai mažam V/C santykiui išsaugo mišinio plastiškumą. Šio priedo naudojimo dėka pagerėja pradinis ir galutinis stipris, padidėja vandens nepralaidumas, sumažėja vandens išsiskyrimas ir išsisluoksniavimo rizika (Gurskis 2008).

2.1.3. Vanduo

Vanduo cementiniui mišiniui ruošti turi būti švarus, be žalingų, normalų cemento kietėjimą stabdančių priemaišų (rūgščių, sulfatų, riebalų ir pan.). Cementiniui akmeniui tinkamiausias yra geriamasis vandentiekio ir švarus upių bei ežerų vanduo.

Cementinio akmens mišiniui ruošti galima vartoti jūrų ir kitokį sūrų vandenį, jeigu jame ištirpusių druskų kiekis ne didesnis už leistinąjį. Cementiniui akmeniui negalima vartoti vandens, kuriame yra daug organinių priemaišų, t.y. jo pH – ne mažesnis nei 4. Cementinio akmens gamybai naudojamas vanduo turi atitikti LST EN 1008:2003 grupės standartą.

Vandens tinkamumas nustatomas remiantis chemine analize ir lyginamaisiais dirbinių – pavyzdžių bandymais. Šie bandiniai pagaminti naudojant esamą bei švarų geriamąjį vandenį yra bandomi po 28 parų kietėjimo nustatytomis sąlygomis. Vanduo laikomas tinkamu tik tada, kai su juo pagaminti cementinio akmens pavyzdžiai pasižymi ne mažesniu stiprumu nei cementinio akmens, kuriam gaminti buvo panaudotas švarus geriamasis vanduo, pavyzdžiai.

2.2. Bandinių gamyba

Tyrimams atlikti buvo suformuotos trys skirtingos cementinio akmens partijos. Kiekviena partija skyrėsi vandens ir cemento santykiu: 0,35, 0,5 ir 0,65. Cementiniui akmeniui gauti buvo naudojamas AB „Akmenės cementas“ portlandcementis CEM I 42,5 R (dalelių tankis ρ_C – 3,1 g/cm³, savitasis paviršius – 370 m²/kg). Vanduo paimtas geriamasis vandentiekio vanduo. Superplastikliu naudotas Carboxyment 3220. Priedo į cementinio akmens mišinį dėta 0,5 % nuo cemento masės. Cementinio akmens sudėties skaičiavimas atliktas pagal (4.1), (4.2), (4.3) formules. Cementinio akmens sudėtis 1m³ cementinio akmens paruošti pateikta 7 lentelėje.

7 lentelė. Cementinio akmens sudėtis 1m³ cementinio akmens paruošti

	Medžiagų kiekiai reikiamam V/C santykiui gauti		
Medžiagos	V/C=0,35	V/C=0,5	V/C=0,65
CEM I 42,5 R, kg	1486,8	1215,7	1028,8
Vanduo, l	520,4	607,8	668,3
Superplastiklis, kg	7,43	6,08	5,17

Cemento kiekio apskaičiavimas pagal pasirinktą V/C santykį:

$$V_T = \frac{V/C \cdot C}{\rho_V} + \frac{C}{\rho_C} ; \quad (4.1)$$

čia

V_T – tūris reikalingas cementinio akmens paruošti, m^3 ;

V/C – pasirinktas vandens ir cemento santykis;

C – nustatomas cemento kiekis, kg;

ρ_V – vandens tankis, kg/m^3 (priimu, kad vandens tankis lygus $1000 kg/m^3$);

ρ_C – portlandcemenčio tankis, kg/m^3 .

Vandens kiekio apskaičiavimas pagal V/C santikį nuo apskaičiuoto portlandcemenčio kiekio:

$$V = C \cdot \frac{V}{C} ; \quad (4.2)$$

čia

V – vandens kiekis, l;

C – apskaičiuotas cemento kiekis, kg;

V/C – pasirinktas vandens ir cemento santykis.

Superplastiklio dedama 0,5% nuo cemento kiekio. Jo kiekis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$S = \frac{C \cdot 0,5}{100} ; \quad (4.3)$$

čia

S – superplastiklio kiekis, kg;

C – portlandcemenčio kiekis.

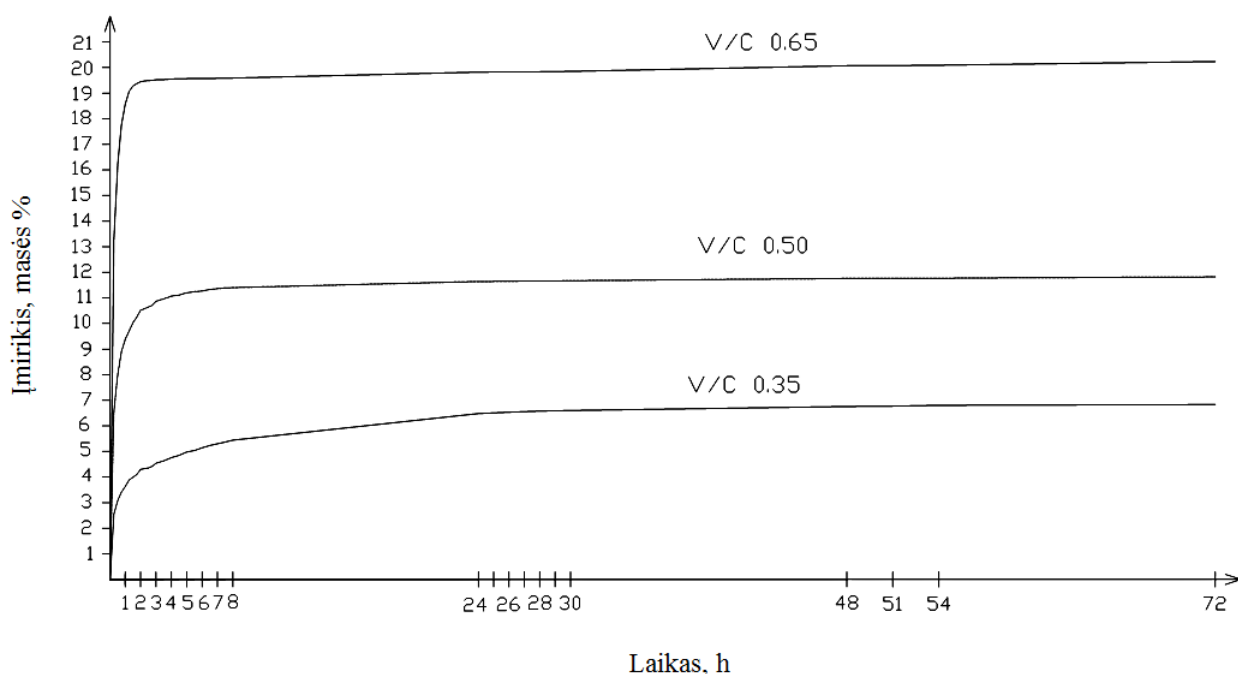
Cementinio akmens mišinys buvo maišomas laboratorijoje rankiniu būdu. Išmaišyta cementinė tešla supilta į formas. Prizmių pavidalo (4x4x16 cm) bandiniai keturias paras buvo laikomi formose. Po to išimti iš formų ir laikomi vandenyje. Po septinių parų kietėjimo vandenyje išimti ir džiovinami laboratorinėje krosnyje „SNOL“ 105 ± 5 °C temperatūroje.

Po paros džiovimo, išdžiovinti bandiniai buvo supjaustyti deimantiniu pjūklų į kubo formos (4x4x4 cm) bandinėlius ir pradėti bandymai.

2.3. Atlikti tyrimai ir jų aptarimas

2.3.1. Vandens įgėrio kinetika

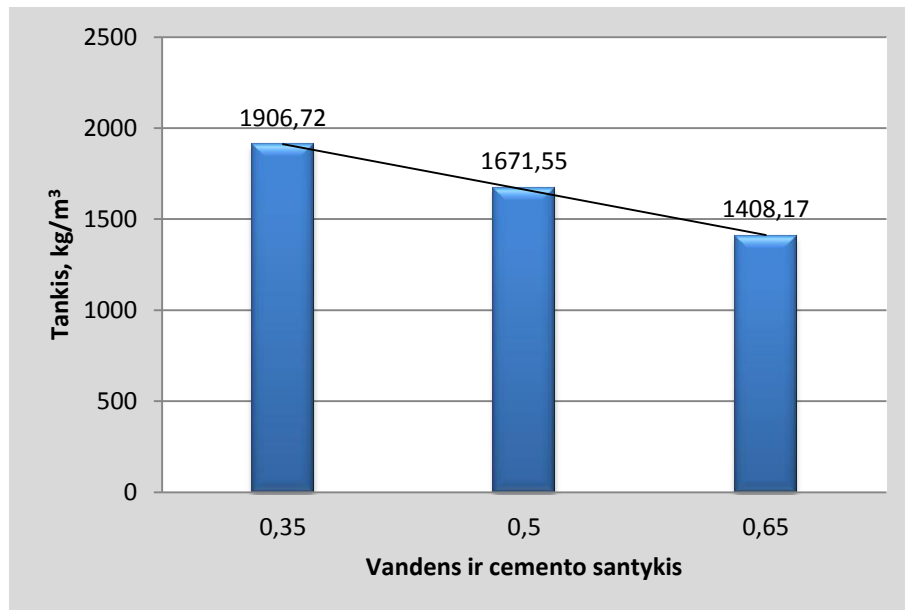
Vandens įgėrio kinetika atlikta pagal GOCT 12730.4-78 standartą. Pagal šiame standarte pateiktą metodiką buvo atliktas bandinių svėrimas ir pagal gautus duomenis nubrėžtos vandens absorbcijos kreivės kiekvienai bandinių partijai (15 pav.).



15 pav. Vandens adsorbcijos kreivės

Iš 15 pav. pateiktų kreivių matyti, kad bandiniai sparčiausiai absorbuoja vandenį per pirmąją valandą. Vėliau šis procesas lėtėja iki kol sustoja, tai yra bandiniai pasiekia pastovią masę. Pastovi bandinio masė yra laikoma tada, kai paskutinių svėrimų rezultatai nesiskiria daugiau kaip 0,1 %. Cementinio akmens bandinių, kurių cemento ir vandens santykis yra 0,35, vandens įgertis mažiausia, šių bandinių vandens įgerties vidurkis siekia vos 6,83 %, kai tuo tarpu bandinių, kurių $V/C = 0,65$, įgerties vidurkis yra 20,24 %. Bandinių su $V/C = 0,5$ įmirkio vidurkis siekia 11,82 %.

Pagal (1.3) formulę apskaičiuoti visų bandinėlių tankiai, taip pat jų vidurkiai, kurie pateikti 16 paveiksle.



16 pav. Tankio priklausomybė nuo V/C

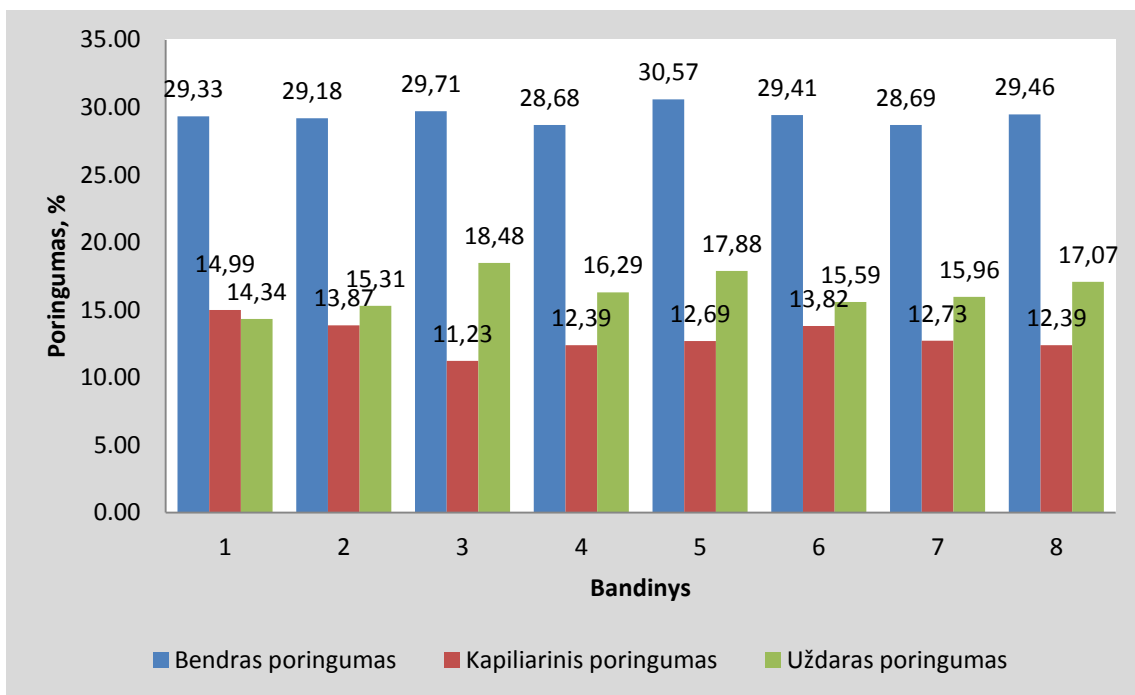
Iš 16 paveikslo matyti, kad didėjant cementinio akmens vandens ir cemento santykiui tiesiškai mažėja jo tankis.

Cementinio akmens bendrajam pringumui apskaičiuoti pagal (1.2) formulę, buvo reikalinga nustatyti jo savitąjį tankį. Cementinio akmens savitasis tankis buvo nustatomas pagal A. Kičaitės ir R. Mačiulaičio aprašytą metodiką (2001). Cementinio akmens savitojo tankio nustatymo rezultatai pateikti 8 lentelėje.

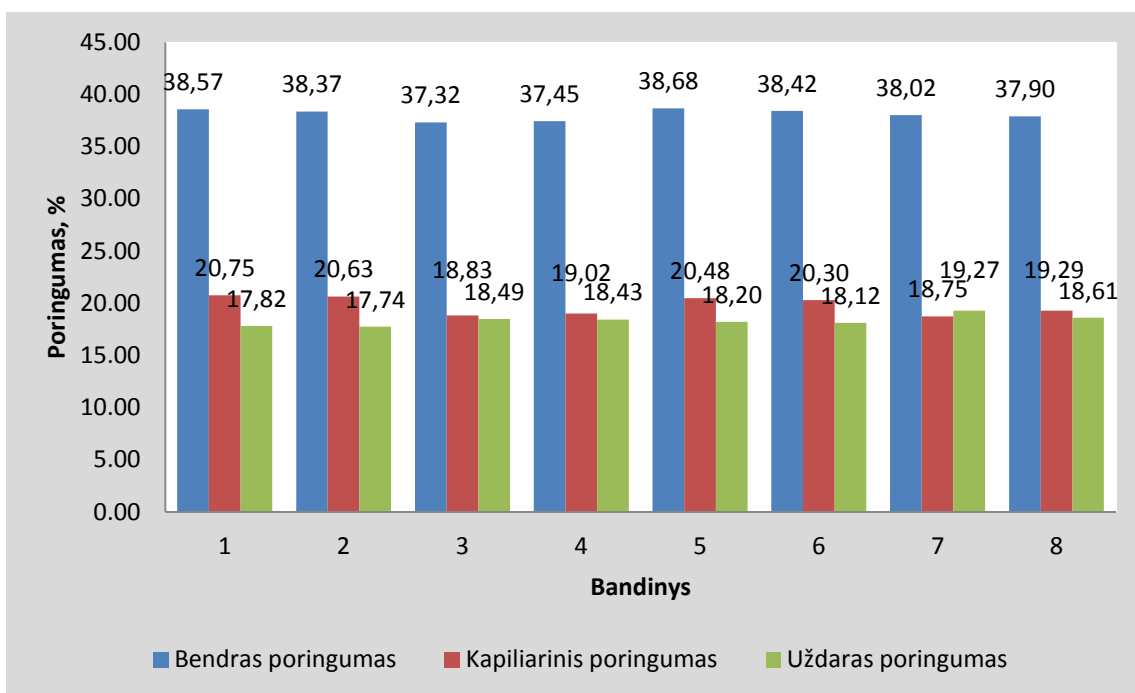
8 lentelė. Cementinio akmens savitojo tankio tyrimo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai, kurių V/C		
		0,35	0,5	0,65
Cementinio akmens miltelių masė	m, g	3,0	3,0	3,0
Cementinio akmens miltelių tūris	V, cm ³	1,2	1,2	1,2
Cementinio akmens savitasis tankis	$\rho = m/V$, g/cm ³	2,500	2,500	2,500
Cementinio akmens savitojo tankio vidurkis	ρ_{vid} , g/cm ³	2,500		

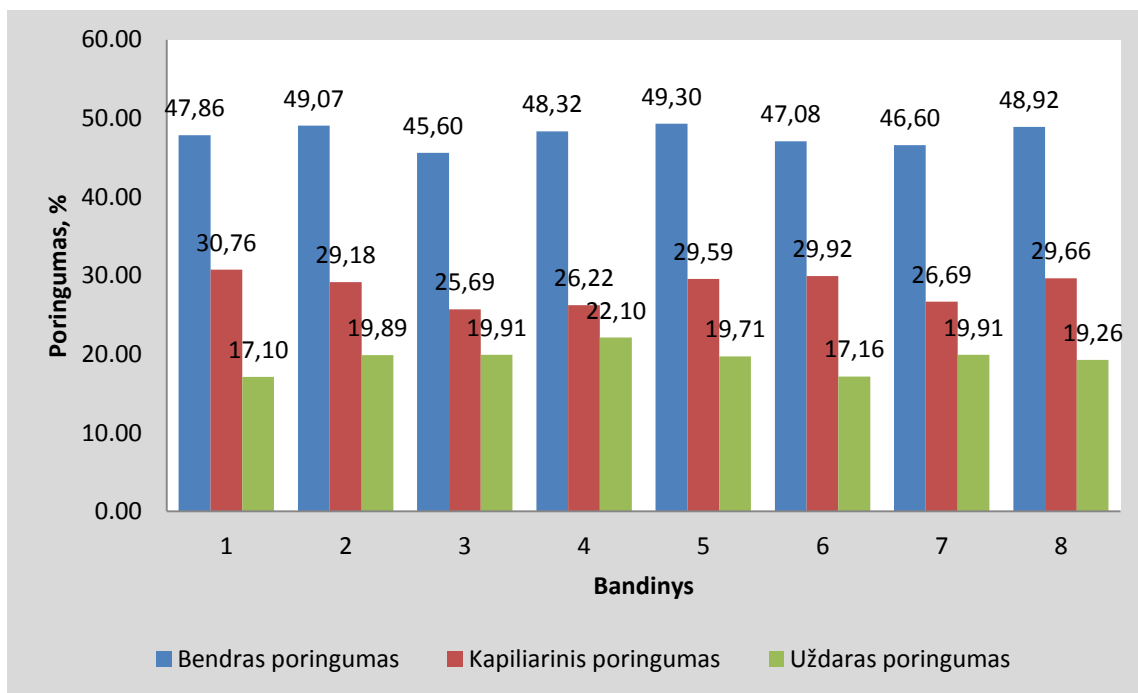
Turint visus reikalingus duomenis, pagal (1.2), (1.4), (1.5) formules apskaičiuojamas cementinio akmens bandinelių su skirtingu vandens ir cemento santykiu bendras, atviras ir uždaras poringumai. Šių poringumo parametrų vertės pavaizduotos 17, 18, 19 paveiksluose, o taip pat jų vidutinės reikšmės – 20 paveiksle.



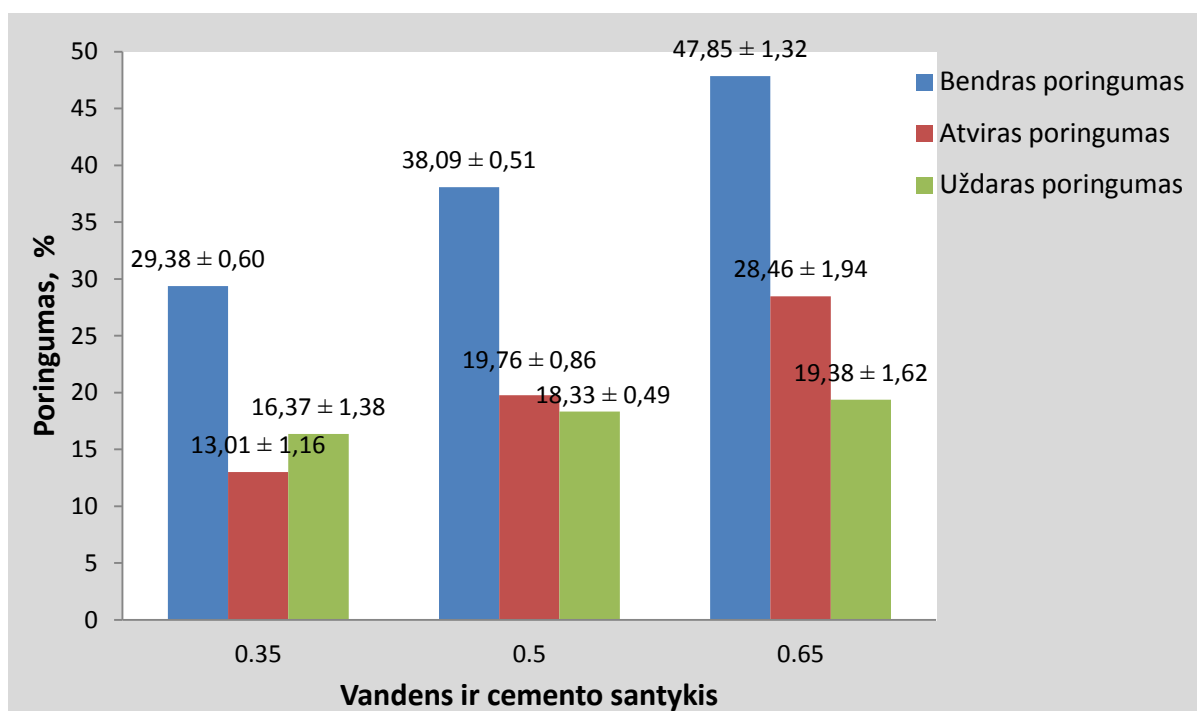
17 pav. Cementinio akmens bendras, atviras ir uždaras poringumai, kai $V/C = 0,35$



18 pav. Cementinio akmens bendras, atviras ir uždaras poringumai, kai $V/C = 0,5$



19 pav. Cementinio akmens bendras, atviras ir uždaras poringumai, kai V/C = 0,65



20 pav. Cementinio akmens bandinių su skirtingu V/C bendro, atviro ir uždaro poringumų vidutinės reikšmės

Iš paveikslų matyti, kad cementinio akmens su V/C = 0,35 kapiliarinis (atviras) poringumas svyruoja nuo 11,23 % iki 14,99 %, o uždaras poringumas – nuo 14,34 % iki 18,48 %. Cementinio akmens, kurio V/C = 0,5 kapiliarinis poringumas svyruoja nuo 18,75 % iki 20,75 %, o uždaras

poringumas – nuo 17,74 % iki 19,27 %. Cementinio akmens, kurio V/C = 0,65 kapiliarinis poringumas svyruoja nuo 25,69 % iki 30,76 %, o uždaras poringumas – nuo 17,10 % iki 22,10 %. Bandinėlių, kurių vandens ir cemento santykis yra mažiausias, poringumas yra mažiausias, o kurių vandens ir cemento santykis didžiausias - poringumas didžiausias. Reikėtų atkreipti dėmesį, jog bendro poringumo augimas didėjant vandens ir cemento santykiui daugiausia priklauso nuo kapiliarinio poringumo padidėjimo, kas patvirtina, jog atviros poros atsiranda dėl perteklinio vandens, kuris yra nesunaudojamas cemento hidratacijos metu. Uždaro poringumo padidėjimas nėra toks žymus, kaip atviro.

Cementinio akmens bandinėlių vidutinių porų dydžio rodiklis λ ir porų vienodumo rodiklis α buvo surasti iš nomogramos (10 pav.) pagal betono vandens įgėrius po 15 min. ir 1 h, kurie buvo apskaičiuoti pagal (1.6) formulę ir pateikti kartu su prieš tai nustatytais poringumo parametrais 9 lentelėje.

9 lentelė. Cementinio akmens poringumo parametrai

V/C	Bandiniai	Vandens įgėris, %	Poringumas			Poringumo rodikliai	
			bendras	atviras (P_a)	uždaras (P_u)	λ	α
0,35	1.1.	7,86	29,33	14,99	14,34	1,49	0,33
	1.2.	7,26	29,18	13,87	15,31	0,77	0,42
	1.3.	5,92	29,71	11,23	18,48	0,28	0,35
	1.4.	6,44	28,68	12,39	16,29	0,44	0,40
	1.5.	6,77	30,57	12,69	17,88	0,23	0,30
	1.6.	7,25	29,41	13,82	15,59	0,74	0,42
	1.7.	6,61	28,69	12,73	15,96	0,67	0,38
	1.8.	6,51	29,46	12,39	17,07	0,31	0,38
Vidurkis		6,83	29,38	13,01	16,37	0,62	0,37
0,50	2.1.	12,51	38,57	20,75	17,82	3,17	0,49
	2.2.	12,40	38,37	20,63	17,74	3,34	0,42
	2.3.	11,13	37,32	18,83	18,49	2,14	0,60
	2.4.	11,26	37,45	19,02	18,43	2,72	0,47
	2.5.	12,37	38,68	20,48	18,20	2,33	0,60
	2.6.	12,21	38,42	20,30	18,12	3,31	0,51
	2.7.	11,21	38,02	18,75	19,27	2,06	0,56
	2.8.	11,50	37,90	19,29	18,61	2,47	0,52
Vidurkis		11,82	38,09	19,76	18,34	2,69	0,52
0,65	3.1.	21,85	47,86	30,76	17,10	4,91	0,69
	3.2.	21,22	49,07	29,18	19,89	4,66	0,66
	3.3.	17,49	45,60	25,69	19,91	4,33	0,55
	3.4.	18,79	48,32	26,22	22,10	3,56	0,80
	3.5.	21,62	49,30	29,59	19,71	5,01	0,63
	3.6.	20,94	47,08	29,92	17,16	5,42	0,65
	3.7.	18,51	46,60	26,69	19,91	4,08	0,69
	3.8.	21,51	48,92	29,66	19,26	5,43	0,60
Vidurkis		20,24	47,84	28,46	19,38	4,68	0,66

Iš 9 lentelės matyti, kad vidutinių porų dydžio rodiklis λ rodo, jog cementinio akmens, kurio $V/C = 0,35$ poros yra palyginti smulkios (vidutinis $\lambda = 0,62$). Stambiausiomis poromis pasižymi bandiniai, kurių $V/C = 0,65$. Jų porų dydžio rodiklio vidutinė reikšmė siekia $\lambda = 4,68$. Porų vienodumo rodiklis α rodo porų pasiskirstymą pagal dydį. Didžiausias porų pasiskirstymas pagal dydį aptinkamas cementinio akmens bandiniuose su $V/C = 0,65$, o mažiausias - $V/C = 0,35$. Bandinių, kurių vandens ir cemento santykis yra 0,5, vidutiniai porų dydžio rodikliai ir porų vienodumo rodikliai užima tarpinę vietą tarp bandinių su $V/C = 0,35$ ir $V/C = 0,65$ rodiklių.

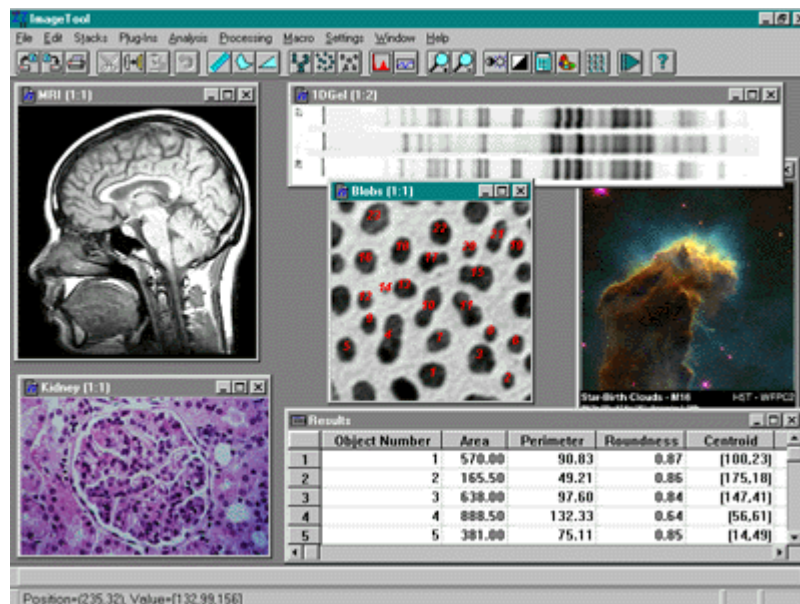
2.3.2. Optinės mikroskopijos metodas

Optinė mikroskopija buvo atliekama pagal prEN 480-11:2005 (E) standartą. Mikroanalizei atlikti, bandiniai pagal prEN 480-11:2005 (E) standartą turi būti išpjaunami. Kadangi mano bandinėliai yra maži kubai (4x4x4 cm), kad išvengti jų sutrūkinėjimo arba visiško sutrupėjimo pjovimo metu, buvo pasirinkta nepjauti. Bandymo paviršiais buvo pasirinkta naudoti tas kubelių sieneles, kurios buvo pjautos deimantiniu pjūklų, kai iš prizmių pavidalo (4x4x16 cm) bandinių buvo formuojami kubų formos bandiniai. Mikroanalizei pasirinktos plokštumos buvo šlifuojamos skirtingo rupumo švitriniais popieriais, naudojant aušinimą vandeniu. Pradžioje naudojamas švitrinis popierius, kurio abrazyvo grūdelių matmenys didesni. Keičiant švitrinį popierių, šlifuojamas bandinys pasukamas 90° kampu. Po šlifavimo bandinėliai plaunami ir džiovinami karštu oru. Ant taip paruošto paviršiaus buvo pažymimos stebėjimo linijos, kaip kad nurodyta prEN 480-11:2005 (E) standarte. Tyrimui atlikti buvo naudojamas optinis mikroskopas „Motic“ (21 pav.).

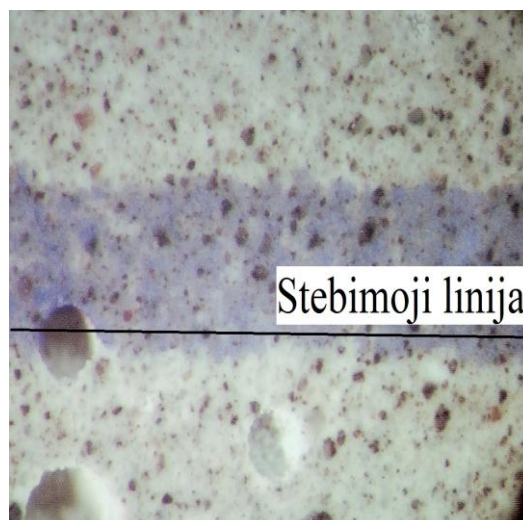


21 pav. Optinis mikroskopas „Motic“

Mikroskopu vaizdas buvo didinamas 50 kartų. Per visą stebėjimo linijos ilgį buvo atliekamas gaunamo vaizdo fotografavimas. Matavimo skalei nustatyti, prie tokio pat didinimo, buvo nufotografuota slankmačio skalė. Nuotraukos buvo analizuojamos kompiuterine programa „UTHSCSA ImageTool“ (22 pav.). Šia programa išmatuoti stebėjimo linijoje atsidūrusių chordų dydžiai mikrometrais. Patikslinta stebėjimo linija (23 pav.) buvo nubrėžta kompiuterine programa „Paint“.



22 pav. Vaizdų analizės programa „UTHSCSA ImageTool”



23 pav. Patikslinta stebimoji linija

Reikalingi duomenys buvo gauti iš gautų reikšmių bandymo metu pagal prEN 480-11:2005 (E) standarte pateiktas (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6), (2.7) formules ir įrašyti 10 lentelėje. Skaičiavimo tikslui visi duomenys to paties vandens ir cemento santykio bandinėlių buvo susumuoti.

10 lentelė. Apskaičiuoti tyrimo duomenys

V/C Pavadinimas	0,35	0,5	0,65
Bendras oro tūris, %	26,54	34,67	38,73
Išmatuotų tuštumų skaičius, vnt	845	1260	1755
Specifinis oro paviršius, m ⁻¹	31,84	36,34	45,32
Kietos fazės ir oro santykis	3,77	2,88	2,58
Tarpų faktorius, mm	0,118	0,079	0,057

Iš 10 lentelės matyti, kad didžiausias bendras oro tūris yra apskaičiuotas bandinėlių, kurių vandens ir cemento santykis lygus 0,65, o mažiausias – 0,35. Daugiausia tuštumų (1755 vnt.) išmatuota bandinėlių su $V/C = 0,65$, mažiausia (845 vnt.) - $V/C = 0,35$, o su $V/C = 0,5$ bandinių tuštumų skaičius užėmė tarpinę vietą (1260 vnt.). Specifinis oro paviršius, kuris parodo porų paviršiaus plotą suskirstytą pagal jų tūrį, buvo didesnis tų bandinėlių, kurių vandens ir cemento santykis didesnis. Tarpų veiksnys, tai didžiausias atstumas nuo bet kurio cemento akmenų kietosios fazės taško iki oro poros krašto. Yra duomenų, kad cementiniame akmenyje pakankamas nuotolis tarp porų yra 0,25 mm (Невиль 1972), vadinasi tarpų veiksnys negali viršyti 0,125 mm. Kaip matyti iš 10 lentelės, bandinių su $V/C = 0,35$ tarpų veiksnys yra arčiausiai šios reikšmės ir siekia 0,118 mm, kai kitos sudėties bandinių apskaičiuotas tarpų veiksnys yra mažesnis. Literatūroje randama, kad mažesnis tarpų veiksnys reiškia geresnį atsparumą šalčiui.

Iš tyrimo metu gautų duomenų, pagal prEN 480-11:2005 (E) standartą, buvo sudaryta po lentelę kiekvienai bandinių sudėčiai, kurios tikslas yra išvesti oro porų pasiskirstymą pagal skersmenį iš išmatuotų chordų pasiskirstymo. Skaičiavimai 11, 12, 13 lentelėse suteikia būdus išmatuoti skaičių porų statistinės analizės metodais. Taip pat, buvo sudaryta chordų pasiskirstymo pagal klases, kurių ribos nurodytas skaičiavimo lentelėse, kreivės (24 pav.).

11 lentelė. Skaičiavimų lentelė, kai $V/C = 0,35$

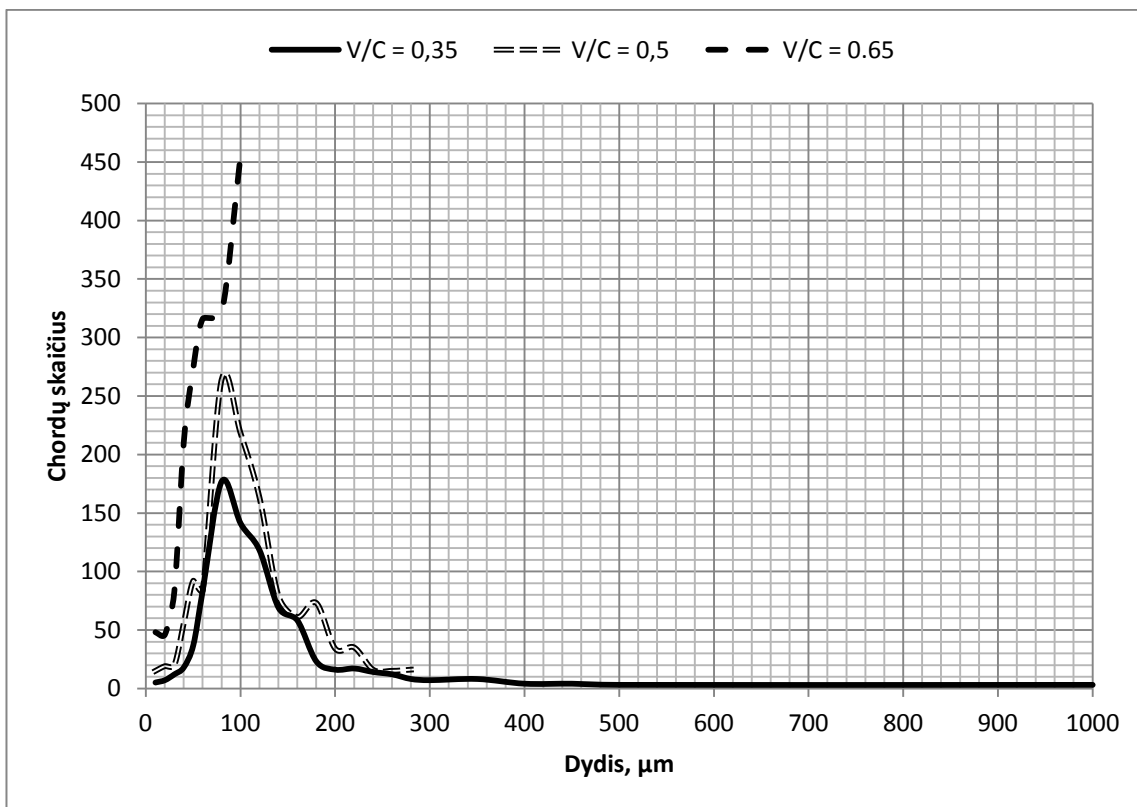
Stebėjimo linijos ilgis, T_{tot}		400 mm								
Stulpelis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rodiklis	Klasė	Klasės ribos	Chordų skaičius klasėje	Chordų dažnumas	Galimos poros	Bendras porų skaičius įskaitant chordus	Poros klasėje	Porų tūris	Oro tūris	Kumuliacinis oro tūris
Šaltinis		Žr. pastaba	Išmatuotas C_i	St. 3/ T_{tot}	Žr. pastaba	St. 4/St. 5	St. 6-St. 6 sekantis sk.	Žr. pastaba	St. 7xSt. 8x 100	Bendras St. 9
Matavimo vnt.		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	1	0 – 10	5	0,0125	0,0001178	106,112054	42,45254178	$5,24 \times 10^{-7}$	0,060	0,06
	2	15 – 20	7	0,0175	0,0002749	63,6595126	-5,78493189	$4,19 \times 10^{-6}$	-0,008	0,05
	3	25 – 30	12	0,03	0,000432	69,4444444	-6,95623467	$1,41 \times 10^{-5}$	-0,010	0,04
	4	35 – 40	18	0,045	0,000589	76,4006791	-47,5773399	$3,35 \times 10^{-5}$	-0,159	-0,12
	5	45 – 50	37	0,0925	0,0007461	123,978019	-108,528624	$6,54 \times 10^{-5}$	-0,710	-0,83
	6	55 – 60	84	0,21	0,0009032	232,506643	38,25730152	$1,13 \times 10^{-4}$	0,432	-0,39
	7	65 – 80	177	0,4425	0,002278	194,249342	72,94858447	$2,68 \times 10^{-4}$	1,955	1,56
	8	85 – 100	141	0,3525	0,002906	121,300757	37,82594098	$5,24 \times 10^{-4}$	1,982	3,54
	9	105 – 120	118	0,295	0,003534	83,4748161	42,03835198	$9,05 \times 10^{-4}$	2,203	5,75
	10	125 – 140	69	0,1725	0,004163	41,4364641	11,17138373	$1,44 \times 10^{-3}$	0,585	6,33
	11	145 – 160	58	0,145	0,004791	30,2650804	19,65426656	$2,14 \times 10^{-3}$	1,030	7,36
	12	165 – 180	23	0,0575	0,005419	10,6108138	3,996619743	$3,05 \times 10^{-3}$	0,209	7,57
	13	185 – 200	16	0,04	0,0060476	6,61419406	0,248106583	$4,19 \times 10^{-3}$	0,013	7,58
	14	205 – 220	17	0,0425	0,006676	6,36608748	1,574192625	$5,58 \times 10^{-3}$	0,082	7,67
	15	225 – 240	14	0,035	0,007304	4,79189485	1,010223353	$7,24 \times 10^{-3}$	0,053	7,72
	16	245 – 260	12	0,03	0,007933	3,7816715	1,445495818	$9,20 \times 10^{-3}$	0,076	7,79
	17	265 – 280	8	0,02	0,008561	2,33617568	0,431724706	$1,15 \times 10^{-2}$	0,023	7,82
	18	285 – 300	7	0,0175	0,009189	1,90445097	1,126845997	$1,41 \times 10^{-2}$	0,059	7,88
	19	305 – 350	8	0,02	0,02572	0,77760498	0,440336849	$2,24 \times 10^{-2}$	0,023	7,90
	20	355 – 400	4	0,01	0,02965	0,33726813	0,039471821	$3,35 \times 10^{-2}$	0,002	7,90
	21	405 – 450	4	0,01	0,03358	0,29779631	0,097796307	$4,77 \times 10^{-2}$	0,005	7,91
	22	455 – 500	3	0,0075	0,0375	0,2	0,187309645	$6,54 \times 10^{-2}$	0,010	7,92
	23	505 – 1000	3	0,0075	0,591	0,01269036	0,012690355	$5,24 \times 10^{-1}$	0,001	7,92
Pastaba: 1, 2, 5 ir 8 stulpelių dydžiai yra pastovūs.										

12 lentelė. Skaičiavimų lentelė, kai $V/C = 0,5$

Stebėjimo linijos ilgis, T_{tot}		400 mm								
Stulpelis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rodiklis	Klasė	Klasės ribos	Chordų skaičius klasėje	Chordų dažnumas	Galimos poros	Bendras porų skaičius įskaitant chordus	Poros klasėje	Porų tūris	Oro tūris	Kumuliacinis oro tūris
Šaltinis		Žr. pastaba	Išmatuotas C_i	St. 3/ T_{tot}	Žr. pastaba	St. 4/St. 5	St. 6-St. 6 sekantis sk.	Žr. pastaba	St. 7xSt. 8x 100	Bendras St. 9
Matavimo vnt.		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	1	0 – 10	15	0,0375	0,0001178	318,33616	145,546057	$5,24 \times 10^{-7}$	0,205	0,06
	2	15 – 20	19	0,0475	0,0002749	172,79011	57,0493648	$4,19 \times 10^{-6}$	0,080	0,14
	3	25 – 30	20	0,05	0,000432	115,74074	-121,950261	$1,41 \times 10^{-5}$	-0,172	-0,03
	4	35 – 40	56	0,14	0,000589	237,691	-70,5786672	$3,35 \times 10^{-5}$	-0,236	-0,26
	5	45 – 50	92	0,23	0,0007461	308,26967	75,7630259	$6,54 \times 10^{-5}$	0,254	-0,01
	6	55 – 60	84	0,21	0,0009032	232,50664	-57,2211884	$1,13 \times 10^{-4}$	-0,192	-0,20
	7	65 – 80	264	0,66	0,002278	289,72783	102,184817	$2,68 \times 10^{-4}$	0,342	0,14
	8	85 – 100	218	0,545	0,002906	187,54301	72,2345821	$5,24 \times 10^{-4}$	0,242	0,38
	9	105 – 120	163	0,4075	0,003534	115,30843	67,8666836	$9,05 \times 10^{-4}$	0,227	0,61
	10	125 – 140	79	0,1975	0,004163	47,441749	15,6112332	$1,44 \times 10^{-3}$	0,052	0,66
	11	145 – 160	61	0,1525	0,004791	31,830516	-1,84728478	$2,14 \times 10^{-3}$	-0,006	0,66
	12	165 – 180	73	0,1825	0,005419	33,6778	19,622638	$3,05 \times 10^{-3}$	0,066	0,72
	13	185 – 200	34	0,085	0,0060476	14,055162	0,94851169	$4,19 \times 10^{-3}$	0,003	0,72
	14	205 – 220	35	0,0875	0,006676	13,106651	7,63019943	$5,58 \times 10^{-3}$	0,026	0,75
	15	225 – 240	16	0,04	0,007304	5,4764513	0,74936189	$7,24 \times 10^{-3}$	0,003	0,75
	16	245 – 260	15	0,0375	0,007933	4,7270894	0,05473801	$9,20 \times 10^{-3}$	0,000	0,75
	17	265 – 280	16	0,04	0,008561	4,6723514	4,67235136	$1,15 \times 10^{-2}$	0,016	0,77
Pastaba: 1, 2, 5 ir 8 stulpelių dydžiai yra pastovūs.										

13 lentelė. Skaičiavimų lentelė, kai $V/C = 0,65$

Stebėjimo linijos ilgis, T_{tot}		400 mm								
Stulpelis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rodiklis	Klasė	Klasės ribos	Chordų skaičius klasėje	Chordų dažnumas	Galimos poros	Bendras porų skaičius įskaitant chordus	Poros klasėje	Porų tūris	Oro tūris	Kumuliacinis oro tūris
Šaltinis		Žr. pastaba	Išmatuotas C_i	St. 3/ T_{tot}	Žr. pastaba	St. 4/St. 5	St. 6-St. 6 sekantis sk.	Žr. pastaba	St. 7xSt. 8x100	Bendras St. 9
Matavimo vnt.		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	1	0 – 10	48	0,12	0,0001178	1018,6757	60034178	$5,24 \times 10^{-7}$	0,031	0,03
	2	15 – 20	46	0,115	0,0002749	418,33394	-61,990134	$4,19 \times 10^{-6}$	-0,026	0,01
	3	25 – 30	83	0,2075	0,000432	480,32407	-415,26166	$1,41 \times 10^{-5}$	-0,586	-0,58
	4	35 – 40	211	0,5275	0,000589	895,58574	-22,521754	$3,35 \times 10^{-5}$	-0,075	-0,66
	5	45 – 50	274	0,685	0,0007461	918,10749	43,439645	$6,54 \times 10^{-5}$	0,284	-0,37
	6	55 – 60	316	0,79	0,0009032	874,66785	522,38514	$1,13 \times 10^{-4}$	3,416	3,05
	7	65 – 80	321	0,8025	0,002278	352,2827	-40,009106	$2,68 \times 10^{-4}$	-0,262	2,78
	8	85 – 100	456	1,14	0,002906	392,29181	392,29181	$5,24 \times 10^{-4}$	2,566	5,35
	9	105 – 120			0,003534			$9,05 \times 10^{-4}$		
	10	125 – 140			0,004163			$1,44 \times 10^{-3}$		



24 pav. Chordų pasiskirstymas pagal dydį

Iš skaičiavimo lentelių matyti, kad skaičiavimai nėra tikslūs, nes septintame stulpelyje, poros klasėje, bei devintame ir dešimtame stulpeliuose, oro tūris, kai kur gaunamas neigiamas skaičius. Neigiamas porų klasėje skaičius ir neigiamas esamų ertmių tūris poringumo parametrų skaičiavimuose yra negalimas ir nepaaiškinamas. Dėl šios priežasties, galima išvada, kad skaičiavimo lentelėje pateiktas statistinės analizės metodas yra labai apribotas ir priklauso nuo to, kaip tolygiai yra fiksuojami chordai vis aukštesnėje klasėje. Taip pat neatmetamas ir matavimo netikslumas, kuris gali būti susijęs tiek su bandinio paviršiaus paruošimu, tiek su optinio mikroskopo geba išgauti ryškų vaizdą, tiek su kompiuterinių programų galimybėmis.

Iš 24 paveikslo matyti, kad cementinio akmens bandinių, kurių $V/C = 0,35$ ir $V/C = 0,5$, daugiausia ertmių buvo išmatuotų, kurių dydžiai nuo $65 \mu m$ iki $100 \mu m$. Nuo šio ertmių dydžių intervalo, ertmių skaičius palaipsniui mažėja. Plačiausiu chordų dydžio intervalu pasižymi cementinio akmens bandinėliai, kurių vandens ir cemento santykis mažiausias, o siauriausiu – kurių V/C yra didžiausias (nuo $10 \mu m$ iki $100 \mu m$). Nors didžiausio vandens ir cemento santykio bandinėlių chordų dydžio intervalas yra mažiausias tačiau į šį intervalą patekusių chordų skaičius yra didžiausias (1755 chordai).

2.3.3. Gyvsidabrio porometrija

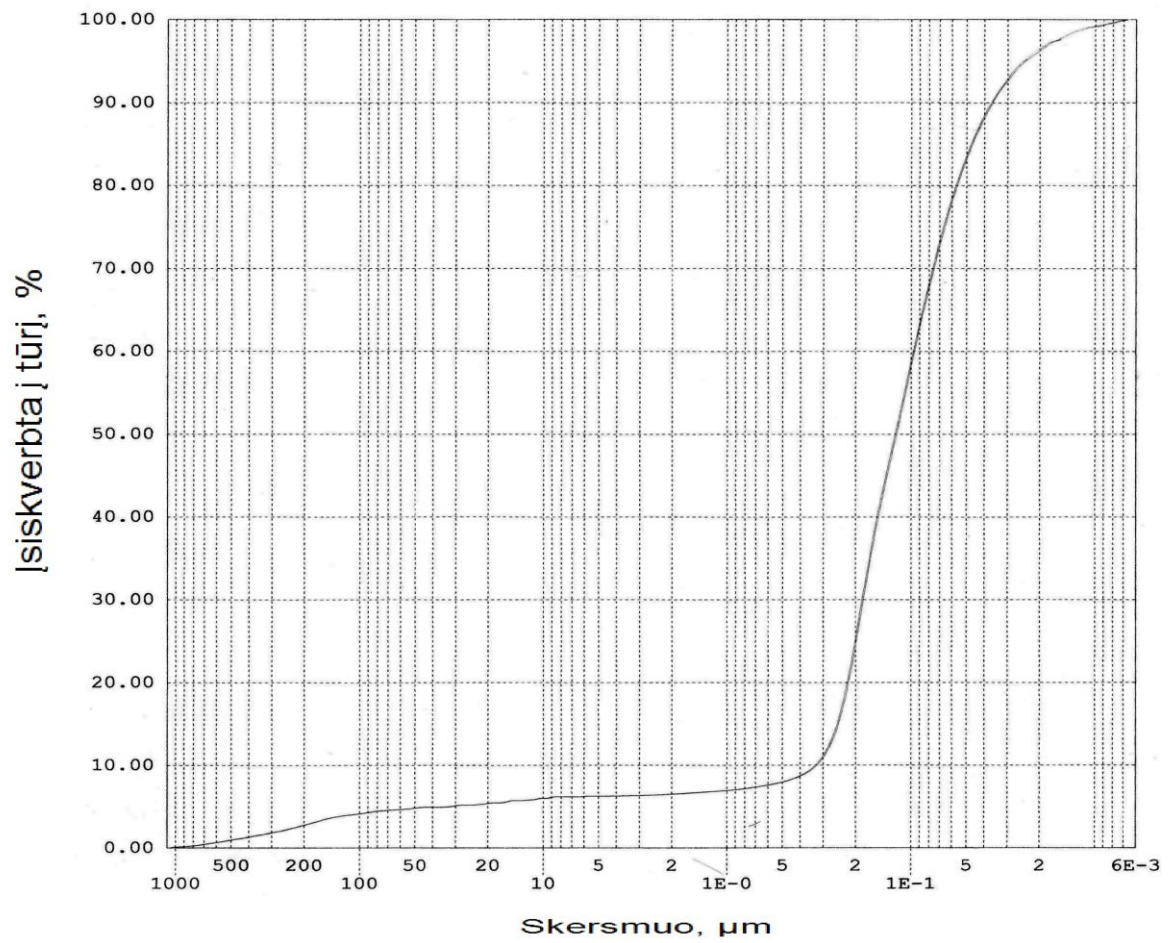
Šiame baigiamajame magistro darbe pristatomi rezultatai trijų gyvsidabrio porometrijos bandymų su skirtingo vandens ir cemento (V/C) santykio bandiniais.

Gyvsidabrio porometrijos rezultatai pateikti 14 lentelėje. Iš 14 lentelės matyti, kad esant gyvsidabrio paviršiaus įtempiams 480 erg/cm^2 , maksimaliam slėgiu 345 MPa ir gyvsidabrio drėkinimo kampui 140° , gyvsidabris gali įsiskverbti į poras, kurių skersmuo yra iki $0,004 \mu\text{m}$. Taip pat nustatytas poringumas bei suskaičiuotas teorinis poringumas, kuris gaunamas mažesnis už nustatytą. Poringumas aptinkamas didesnis, kur cementinio akmens bandinių vandens ir cemento santykis yra didesnis.

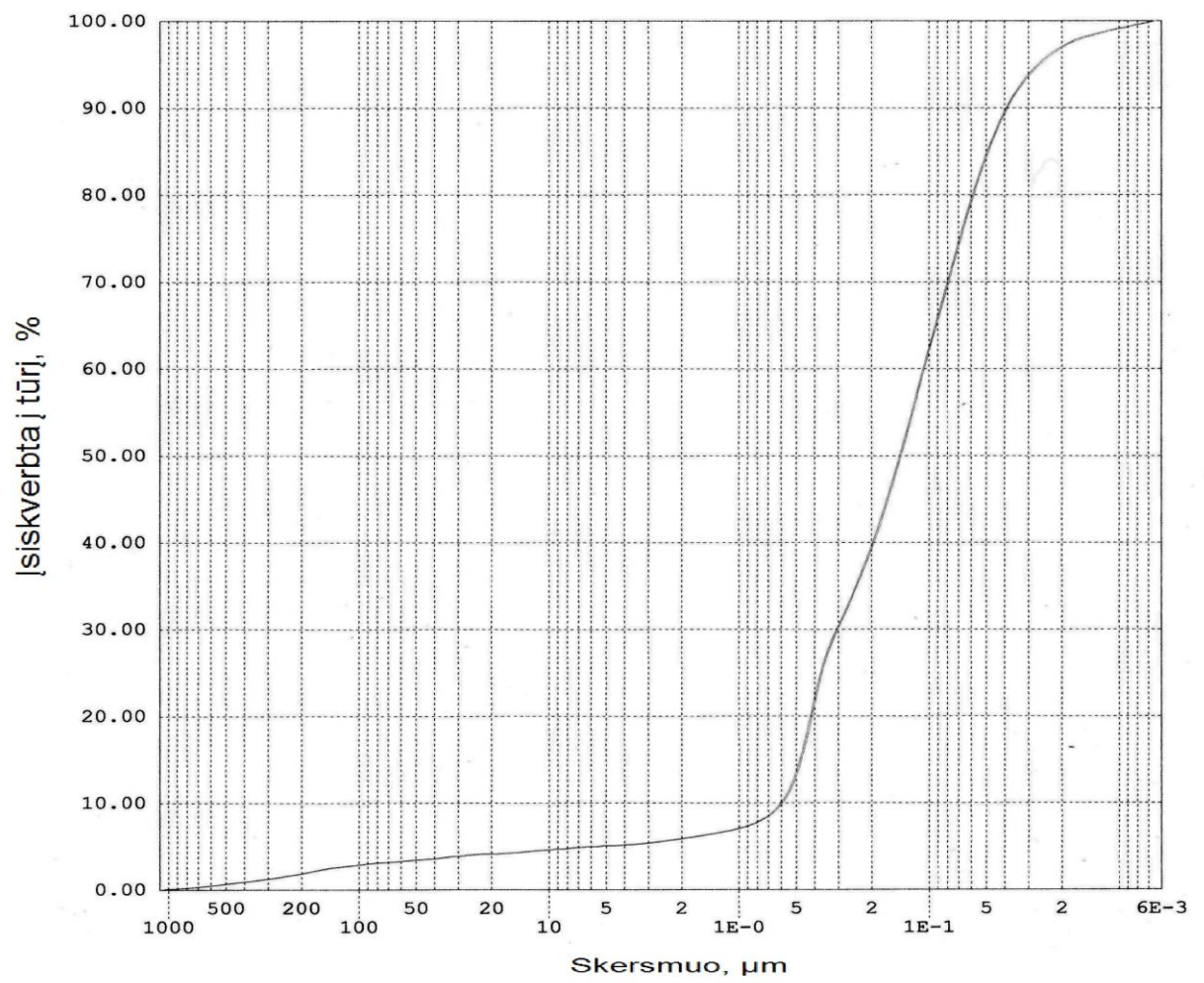
Gyvsidabrio porometrijos gautos gyvsidabrio įsiskverbto tūrio ir porų skersmens priklausomybės pavaizduotos 25, 26, 27 paveiksluose leidžia nustatyti kritinį porų plotį. Kritinis porų dydis yra žinomas kaip porų dydis atitinkantis didžiausią gyvsidabrio įsiskverbimo greitį didinant slėgį Pasiekus šį aukščiausią įsiskverbimo lygį, gyvsidabris ima skverbti į bandinio vidų (Winslow, Diamond 1970). Iš paveikslų matyti, kad didėjant cementinio akmens bandinių vandens ir cemento santykiui, didėja kritinis porų dydis. Tai reiškia, kad didesnio vandens ir cemento santykio bandiniai turi didesnio skersmens kapiliarus.

14 lentelė. Gyvsidabrio porometrijos rezultatai

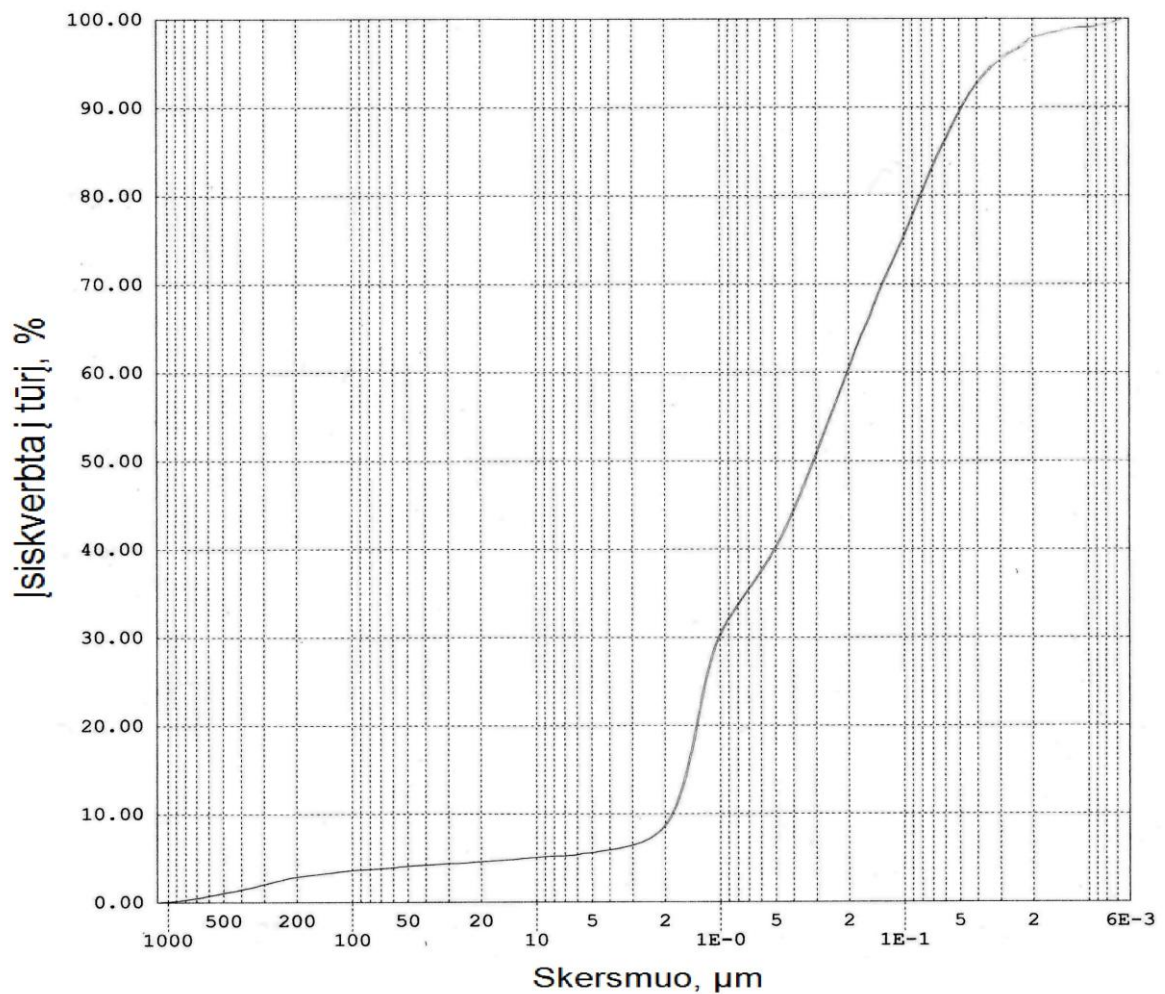
Pavadinimas	Matavimo vienetai	V/C		
		0,35	0,5	0,65
Bandinio svoris	g	1,155	1,05	1,115
Tūris	cm^3	0,6585	0,71	0,93
Hg paviršiaus įtempiai	erg/cm^2	480	480	480
Hg drėkinimo kampas	$^\circ$	140	140	140
Maksimalus slėgis	MPa	345	345	345
Mažiausias porų skersmuo, į kurį įsiskverbia Hg	μm	0,004	0,004	0,004
Įsiskverbęs tūris	cm^3	0,1686	0,2354	0,3874
Poringumas	%	25,6	33,42	41,65
Teorinis poringumas	%	12,3	25,47	40,05



25 pav. Gyvsidabrio išiskverbto tūrio ir porų skersmens priklausomybė ($V/C=0,35$)



26 pav. Gyvsidabrio įsiskverbto tūrio ir porų skersmens priklausomybė ($V/C=0,5$)



27 pav. Gyvsidabrio įsiskverbto tūrio ir porų skersmens priklausomybė ($V/C=0,65$)

2.4. Atliktų tyrimų pagal skirtingas metodikas rezultatų palyginimas

Apskaičiavus poringumo parametrus pagal tris skirtingas metodikas, tai yra vandens įgėrio kinetiką, optinę mikroskopiją ir gyvsidabrio porometriją, iš 15 lentelės matyti, kad tikslus rezultatų palyginimas yra įmanomas tik pagal vieną parametą – bendrąjį poringumą. Taip yra todėl, kad gyvsidabrio porometrijos ir optinės mikroskopijos metodais yra įvertinamas tik bendrasis poringumas. Bendrojo poringumo reikšmės nustatytos optinės mikroskopijos ir gyvsidabrio porometrijos metodais yra arčiausiai viena kitos (žr. 15 lentelėje P_{bendras} reikšmes), o gautos tiriant vandens įgėrio kinetiką jos yra truputį didesnės. Iš dalies, tai galima paaiškinti hidratacijos trukme. Vandens įgėrio kinetikos tyrimas buvo atliekamas anksčiau, o kiti du tyrimai buvo atliekami po

metų. Tuo tarpu vyko hidratacijos procesas, kurio metu galėjo pasikeisti cementinio akmens struktūra. Žinant, kad pasikeitimai vykstantys cementinio akmens struktūroje dėl hidratacijos proceso pasižymi sumažėjusiu bendru poringumu, galima teigti, jog šis procesas ir yra atspindėtas 15 lentelėje gautais rezultatais.

15 lentelė. Poringumo parametrų rezultatai gauti pagal skirtingas metodikas

Pavadinimas	V/C = 0,35			V/C = 0,5			V/C = 0,65		
	P _{bendras}	P _{atviras}	P _{uždaras}	P _{bendras}	P _{atviras}	P _{uždaras}	P _{bendras}	P _{atviras}	P _{uždaras}
Vandens įgėrio kinetika	29,38 ± 0,60	13,01 ± 1,16	16,37 ± 1,38	38,09 ± 0,51	19,76 ± 0,86	18,33 ± 0,49	47,85 ± 1,32	28,46 ± 1,94	19,38 ± 1,62
Optinės mikroskopijos metodas	26,54	-	-	34,67	-	-	38,73	-	-
Gyvsidabrio porometrija	25,6	-	-	33,42	-	-	41,65	-	-

Porų dydžio ir porų dydžio pasiskirstymo rezultatų, gautų pagal atliktas skirtingas tyrimo metodikas, palyginimas yra sudėtingas. Skirtingos tyrimų metodikos skirtingai įvertina šiuos parametrus, kaip matyti iš 16 lentelės. Vandens įgėrio kinetikos tyrimo, šie dydžiai įvertinami porų dydį apibūdinančiais santykiniais rodikliais: λ – vidutinio porų dydžio rodikliu ir α – porų vienodumo rodikliu. Optinės mikroskopijos metodo – klasėmis, kurios suskirstytos į tuštumų dydžio intervalus. Gyvsidabrio porometrijos metodo šie dydžiai yra įvertinami iš tarpinių įsiskverbto gyvsidabrio kiekio ir porų dydžio priklausomybės. Pagal Cook (1991) gyvsidabrio porometrija negalima nustatyti tikslaus porų dydžio pasiskirstymo, nes gyvsidabris turi patekti į porų tinklą per siauriausias poras. Šio gyvsidabrio porometrijos tyrimo metu buvo gautos suminio gyvsidabrio įsiskverbto kiekio ir porų dydžio priklausomybės, kurios leidžia nustatyti kritinį porų dydį. Porų dydžio ar porų dydžio pasiskirstymo iš šių priklausomybių neįmanoma nustatyti.

16 lentelė. Porų dydžio ir porų dydžio pasiskirstymo parametrai

V/C santykis	Vandens įgėrio kinetika		Optinės mikroskopijos metodas		Gyvsidabrio porometrija
	λ	α	Dydžio intervalas, μm	Porų kiekis intervale	Kritinis porų dydis, μm
0,35	0,62	0,37	80 – 160	563	0,2
0,5	2,69	0,52	80 – 120	645	0,3
0,65	4,68	0,66	60 – 100	1093	1,0

16 lentelėje pagal vandens įgėrio kinetikos rodiklį λ matyti, kad didėjant vandens ir cemento santykiui didėja vidutinis porų dydis, o iš optinės mikroskopijos tyrimo rezultatų matyti, kad stambesnės poros aptinkamos bandiniuose su mažesniu vandens ir cemento santykiu. Iš porų vienodumo rodiklių 16 lentelėje galima spręsti, kad didėjant vandens ir cemento santykiui porų dydžio intervalas bandiniuose yra platesnis. Tačiau analizuojant mikroskopinio tyrimo rezultatus matyti, kad didesnio vandens ir cemento santykio bandiniai pasižymi siauresniu porų dydžio intervalu ir didesniu tuštumų kiekiu jame. Kritinio porų dydžio reikšmės, gautos atlikus gyvsidabrio porometriją, yra artimesnės vandens įgėrio kinetikos tyrimo rezultatams, nes rodo, kad esant mažesniai vandens ir cemento santykiui gyvsidabrio įsiskverbimo greitis bus didžiausias prie mažesnio porų dydžio.

Atlikus tyrimus matyti, kad poringumo parametrų apskaičiuotų pagal vandens įgėrio kinetiką, optinės mikroskopijos metodą ir gyvsidabrio porometriją reikšmės skiriasi. Šie skirtumai atsiranda dėl to, kad skirtingas metodas, tiria skirtingus poringumo parametrus ar porų dydžio intervalus, o tik panaudojant formules ar statistinės analizės būdus yra randami kiti poringumo parametrai. Pavyzdžiui, vandens įgėrio metodu tiriamas tik atviras poringumas, o kiti poringumo parametrai apskaičiuojami formulėmis. Optinės mikroskopijos metodu geriausia tirti dideles, sferines, įtraukto oro poras, nes tada galima tikėtis tikslesnių rezultatų (Aligizaki 1995, Kalliopi, Aligizaki 2006).

2.5. Cementinio akmens poringumo prognozavimo skaičiavimai pagal vandens ir cemento santikį

Poringumo prognozavimo skaičiavimui atlikti pasirinkti pradiniai duomenys pagal tyrimui naudotus medžiagų kiekius bei pagal literatūroje nurodytus žinomus dydžius. Pradiniai duomenys cementinio akmens poringumo skaičiavimams atlikti yra pateikti 17 lentelėje.

17 lentelė. Pradiniai duomenys

Pavadinimas	Matavimo vienetai	Žymuo	Vandens ir cemento santykis		
			V/C=0,35	V/C=0,5	V/C=0,65
CEM I 42,5 R	kg	C	1486,8	1215,7	1028,8
Vanduo	l	V	520,4	607,8	668,3
Oro porų koncentracija	%	φ_o	3,0		
Hidratacijos laipsnis		α_h	Nuo 0 iki 1, žingsnis 0,1		
Cemento tankis	kg/m ³	ρ_c	3100		
Vandens tankis	kg/m ³	ρ_v	1000		
C-S-H gelio tankis	kg/m ³	ρ_{gel}	2200		
Gelio porų koncentracija C-S-H gelyje		φ_{gp}	0,28		

Skaiciavimas

Apskaičiuojama nehidratavusių klinkerio dalelių koncentracija cemento akmenyje:

$$\varphi_{kl} = \frac{1-\alpha_h}{1+\frac{V \cdot \rho_c}{C \cdot \rho_v}}; \quad (5.1)$$

čia α_h – hidratacijos laipsnis;

V – vandens kiekis cemento tešloje;

C – cemento kiekis cemento tešloje;

ρ_v – vandens tankis;

ρ_c – cemento tankis.

Apskaičiuojama naujų dalių koncentracija cemento akmenyje:

$$\varphi_n = 1 - \varphi_{kl} - \varphi_{oca}; \quad (5.2)$$

čia φ_{oca} – oro kiekis cemento akmenyje.

Apskaičiuojamas oro kiekis cemento akmenyje:

$$\varphi_{oca} = \frac{\varphi_o}{V_c}; \quad (5.3)$$

čia φ_o – oro porų koncentracija.

Apskaičiuojama cementinės tešlos koncentracija:

$$V_c = \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{V}{\rho_v} \right) \cdot 100. \quad (5.4)$$

Apskaičiuojamas naujadarų tankis:

$$\rho_n = \frac{\rho_v \cdot \rho_c \left(\frac{V}{C} + \alpha_h \right)}{\frac{V}{C} \cdot \rho_c + \alpha_h \cdot \rho_v}. \quad (5.5)$$

Žinant, kad C-S-H gelio vidutinis tankis lygus 2200 kg/m^3 , apskaičiuojamas naujadarų santykinis tankis d_n arba C-S-H gelio koncentracija naujadaruose φ_{gel} :

$$d_n = \varphi_{gel} = \frac{\rho_n}{\rho_{gel}}. \quad (5.6)$$

Apskaičiuojama kapiliarinių porų koncentracija naujadaruose:

$$\varphi_{kap} = 1 - d_n. \quad (5.7)$$

Žinoma, kad gelio porų koncentracija C-S-H gelyje $\varphi_{gp} = 0,28$. Žinant φ_{kap} ir φ_{gp} galima apskaičiuoti kapiliarinių ir gelio porų kiekius cemento akmenyje:

$$P_{kap} = (1 - d_n) \cdot \varphi_n \cdot 100. \quad (5.8)$$

Apskaičiuojamas gelio porų kiekis cemento akmenyje:

$$P_g = 0,28 \cdot \varphi_{gel} \cdot \varphi_n = 0,28 \cdot d_n \cdot \varphi_n \cdot 100. \quad (5.9)$$

Rezultatų suvestinės kintant hidratacijos laipsniui yra pateiktos 18, 19, 20 lentelėse. Kapiliarinių porų koncentracijos naujadaruose, kapiliarinių porų kiekio ir gelio porų kiekio cementiniame akmenyje priklausomybės nuo hidratacijos laipsnio yra pateiktos atitinkamai 28, 29, 30 paveiksluose.

18 lentelė. Rezultatų suvestinė kintatnt hydratacijos laipsniui, kai $V/C = 0,35$

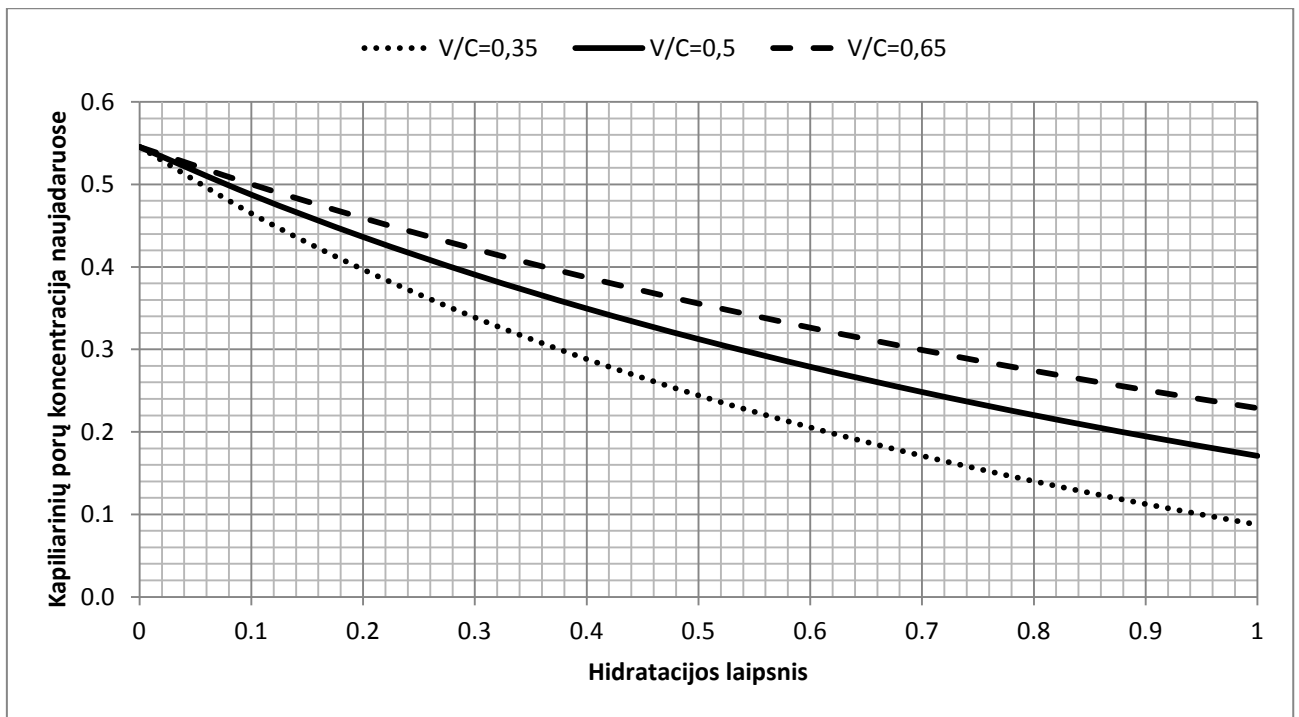
α_h	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
φ_{kl}	0.480	0.432	0.384	0.336	0.288	0.240	0.192	0.144	0.096	0.048	0.000
φ_n	0.490	0.538	0.586	0.634	0.682	0.730	0.778	0.826	0.874	0.922	0.970
ρ_n	1.000	1.177	1.327	1.455	1.566	1.662	1.748	1.824	1.891	1.952	2.007
d_n	0.455	0.535	0.603	0.661	0.712	0.756	0.794	0.829	0.860	0.887	0.912
φ_{kap}	0.545	0.465	0.397	0.339	0.288	0.244	0.206	0.171	0.140	0.113	0.088
P_{kap}	26.75	25.03	23.27	21.48	19.67	17.84	16.00	14.14	12.27	10.39	8.50
P_g	6.24	8.07	9.90	11.74	13.59	15.45	17.31	19.17	21.04	22.91	24.78

19 lentelė. Rezultatų suvestinė kintatnt hydratacijos laipsniui, kai $V/C = 0,5$

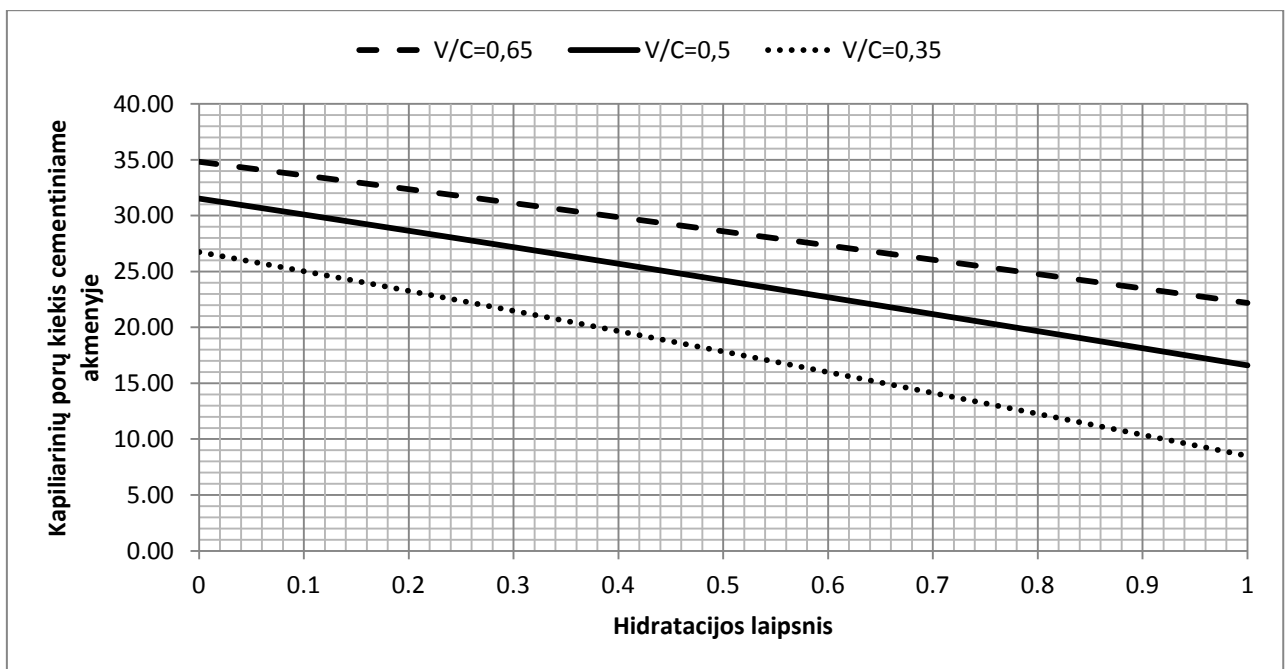
α_h	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
φ_{kl}	0.392	0.353	0.314	0.275	0.235	0.196	0.157	0.118	0.078	0.039	0.000
φ_n	0.578	0.617	0.656	0.695	0.735	0.774	0.813	0.852	0.892	0.931	0.970
ρ_n	1.000	1.127	1.240	1.341	1.431	1.512	1.586	1.653	1.715	1.771	1.824
d_n	0.455	0.512	0.564	0.609	0.650	0.687	0.721	0.752	0.779	0.805	0.829
φ_{kap}	0.545	0.488	0.436	0.391	0.350	0.313	0.279	0.248	0.221	0.195	0.171
P_{kap}	31.52	30.09	28.64	27.17	25.69	24.20	22.69	21.18	19.66	18.13	16.60
P_g	7.35	8.85	10.36	11.87	13.38	14.89	16.41	17.94	19.46	20.98	22.51

20 lentelė. Rezultatų suvestinė kintatnt hydratacijos laipsniui, kai $V/C = 0,65$

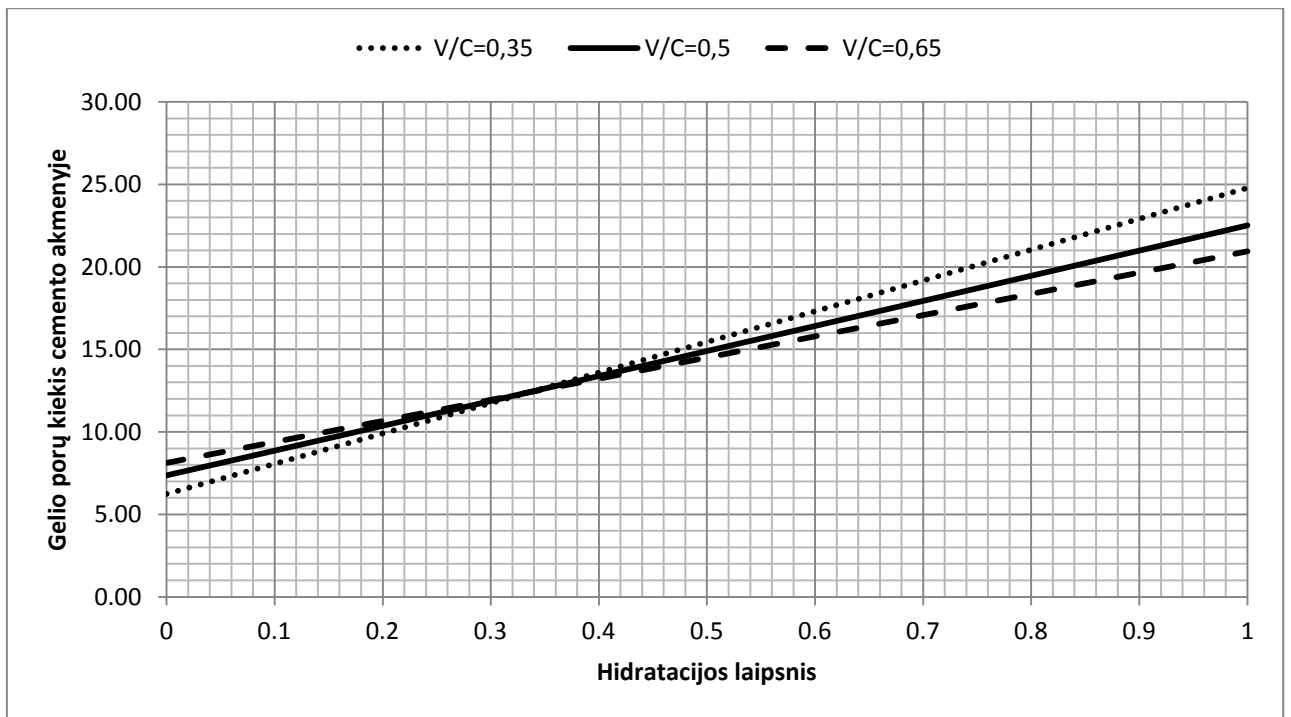
α_h	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
φ_{kl}	0.332	0.299	0.265	0.232	0.199	0.166	0.133	0.100	0.066	0.033	0.000
φ_n	0.638	0.671	0.705	0.738	0.771	0.804	0.837	0.870	0.904	0.937	0.970
ρ_n	1.000	1.099	1.190	1.272	1.348	1.417	1.482	1.541	1.597	1.648	1.697
d_n	0.455	0.500	0.541	0.578	0.613	0.644	0.674	0.701	0.726	0.749	0.771
φ_{kap}	0.545	0.500	0.459	0.422	0.387	0.356	0.326	0.299	0.274	0.251	0.229
P_{kap}	34.81	33.59	32.36	31.11	29.86	28.60	27.33	26.06	24.78	23.49	22.20
P_g	8.12	9.39	10.67	11.94	13.22	14.51	15.79	17.08	18.36	19.65	20.94



28 pav. Kapiliarinių porų koncentracija naujadaruose kintant hidratacijos laipsniui



29 pav. Kapiliarinių porų kiekio kitimas kintant hidratacijos laipsniui



30 pav. Gelio porų kitimas cemento akmenyje kintant hidratacijos laipsniui

Iš 28 paveikslo galime matyti, kad didėjant hidratacijos laipsniui kapilairinių porų koncentracija naujadaruose cemento mažėja. Didelę įtaką kapiliarinių porų koncentracijai turi vandens ir cemento santykis. Kuo V/C didesnis, tuo kapiliarinių porų koncentracija naujadaruose yra didesnė.

Kapiliarinių porų kiekis didėjant hidratacijos laipsniui mažėja (29 pav.), o gelinių porų kiekis didėjant hidratacijos laipsniui didėja (30 pav.).

Išvados

- Iš vandens įgėrio metodo rezultatų matyti, kad bandiniai su didesniu vandens ir cemento santykiu yra didesnio poringumo. Poringumui didėjant žymiai padidėja atviras poringumas, o uždaras – lieka beveik nepakitęs, tai sumažina cementinio akmens atsparumą šalčiui.
- Atlikus vandens įgėrio kinetiką matyti, kad kuo didesnis V/C santykis, tuo vidutinis porų dydis yra didesnis, o porų pasiskirstymas pagal dydį didėja nežymiai.
- Mikroskopiniu metodu nustatyta, kad didėjant vandens ir cemento santykiui didėja bendras porų tūris, specifinis porų paviršius. Išmatuotų tuštumų skaičius didesnis bandinių su didesniu V/C santykiu.
- Atlikus gyvsidabrio porometrijos tyrimus nustatyta, kad didėjant cementinio akmens bandinių vandens ir cemento santykiui, poringumas didėja, taip pat didėja kritinis porų dydis.
- Atlikus cementinio akmens poringumo prognozavimo skaičiavimus pagal vandens ir cemento santykį buvo nustatyta, kad didėjant hidratacijos laipsniui kapiliarinių porų koncentracija naujadaruose cemente mažėja. Kuo V/C santykis didesnis, tuo kapiliarinių porų koncentracija naujadaruose yra didesnė. Kapiliarinių porų kiekis didėjant hidratacijos laipsniui mažėja, o gelinių porų kiekis didėjant hidratacijos laipsniui didėja.
- Lyginant bandinių su skirtingais vandens ir cemento santykiais poringumo parametrus, nustatytus pagal tris poringumo parametrų nustatymo metodikas, galima daryti išvadą, kad palyginimas įmanomas tik pagal vieną parametą – bendrąjį poringumą. Bendrojo poringumo dydžių vertės yra panašios – vidutinis standartinis nuokrypis yra 3,01 %.

Literatūra

AB „Akemnės cementas“. Cemento tipai. [žiūrėta 2011-11-09]. Prieiga per internetą: <http://www.cementas.lt/lt/cemento-tipai>

Gurskis V. 2008. *Statybinės medžiagos*. Mokomoji knyga. Kaunas: Ardiva.

Kičaitė A., Mačiulaitis R. 2001. *Neorganinių rišamųjų medžiagų ir užpildų tyrimo metodai*. Laboratoriniai darbai. Vilnius: Technika.

LST EN 197-1. 2001. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai. Vilnius. 26 p.

LST EN 1008:2003. 2003. Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant grąžinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti. Vilnius. 17 p.

Skipkiūnas G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Kaunas: Vitae Litera, 2007.

Vektaris B., V. Vilkas V. 2006. *BETONO TVARUMAS*. Betono sulfatinė ir šarminė korozija, atsparumas šalčiui ir karbonizacijai. Tyrimai ir prevencinės priemonės. Monografija. Kaunas: Technologija.

Alford N.McN., Rahman A.A. 1981. *An assessment of porosity and pore sizes in hardened cement pastes*. J Materials Science 16

Aligizaki K.K. 1995. *Determination of pore structure parameters in hardened cementitious materials*. MS Thesis, The Pennsylvania State University, p. 265

Beaudoin J.J. 1979. *Porosity measurement of some hydrated cementitious systems by high pressure mercury intrusion: Microstructural limitations*. Cem Concr Res 9

Beaudoin, J.J., Feldman, R.F. and Tumidajski, P.J. 1994. *Pore Structure of Hardened Portland Cement Pastes and Its Influence on Properties*. Advn. Cem. Bas. Mat., Vol. 1, pp. 224-236

Brown, P. W., and Shi, D., and Skalny, J. 1991. “Porosity/Permeability Relationships,” Material Science of Concrete II, ed. Skalny, J., and Mindess, S. pp. 83-110

Cai, H.; Liu, X. 1998. *Freeze – thaw durability of concrete: ice formation process in pores*. Cement and Concrete Research 28(9): 1281–1287

Cook R.A. 1991. *Fundamentals of mercury intrusion porosimetry and its application to concrete materials science*. Master of Science Thesis, Cornell University

Coussy, O.; Monteiro, P J. M. 2008. *Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures*. Cement and Concrete Research 38: 40–48

Dodson, V. 1990. *Air-Entraining Admixtures. Concrete Admixtures*. Chapter 6, Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 129-158

- Dubinin M. M. 1960. *The potential theory of adsorption of gases and vapors for adsorbents with energetically nonuniform surfaces*. Chemical Reviews, Vol. 60, No. 2. pp. 235-241
- Dubinin M. M. 1979. *Microporous structures of carbonaceous adsorbents*, in *Characterisation of Porous Solids*. Proceedings of International Symposium, Neuchatel, Switzerland, 9-12 July 1978., S. J. Gregg, K. S. W. Sing, H. F. Stoeckli (eds), Society of Chemical Industry, London.
- prEN 480-11:2005 (E). *Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods – Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete*. ICS 91.100.1 0; 91.100.30.
- Han Young Moon, Hong Sam Kim, Doo Sun Choi. 2006. *Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes*. Construction and Building Materials. Volume 20, Issue 9. Pages 725–732
- Hearn N, Hooton RD, Mills RH. 1994. Pore structure and permeability. In: *Significance of tests and properties of concrete and concrete making materials*. In: Klieger P, Lamond JF, editors. ASTM STP 169C, 4th ed.. West Conshohochen (PA): American Society for Testing and Materials.
- Hulshizer, A.J. 1997. *Air-Entrainment Control or Consequences*. Concrete International. 19(7)
- International Union of Pure and Applied Chemistry. 1994. Physical Chemistry Division Commission on Colloid and Surface Chemistry, Subcommittee on Characterization of Porous Solids. *Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)*. Pure Appl. Chem., Vol. 66(8), pp. 1739–1758
- Kalliopi K. Aligizaki. 2006. *Pore structure of cement-based materials*. Testing, interpretation and requirements. Taylor & Francis. p. 440
- Ludwig U., Schwiete H.E. 1966. *Porosity measurements of cement pastes, cement mortars, and concretes*. Proc. 8th Conf. Silicate Industry, F. Tamas (ed.), Budapest, pp. 235–251
- Mehta P. K., Manmohan D. 1980. *Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes*. Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, Vol. III, pp. VII-1-VII-5
- Oberholster R. E. 1986. *Pore structure, permeability and diffusivity of hardened cement paste and concrete in relation to durability: status and prospects*. Proceedings of the Eight International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. I, pp. 323-335
- Povindar K. Mehta, Paulo J. M. Monteiro. 1993 *Concrete– structure, properties, and materials*. Prentice Hall. p. 548
- Setzer M. J. 1991. *Interaction of water with hardened cement paste*. Ceramic Transactions Vol. 16: *Advances in Cementitious Materials*, S. Mindess (ed.), The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 415-439
- Shang, H.; Song, Y. 2008. *Behavior of air – entrained concrete under the compression with constant confined stress after freeze – thaw cycles*. Cement and Concrete Research 30: 854–860
- Quantachrome Corporation. Quantachrome Instruments. [žiūrėta 2012-05-30]. Prieiga per internetą: http://www.quantachrome.com/pdf_brochures/07128.pdf

- Whiting, D.A. and Nagi, M.A. 1998. *Manual on Control of Air Content in Concrete*. EB116. Portland Cement Association, Skokie, Illinois
- Winslow D.N., Diamond S. 1970. *A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in cement*. ASTM J. Materials 5 (3)
- Young J. F., Mindeis S., Bentur A., Gray R. J. 1998. *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, NJ.
- Zuber, B.; Marchand, J. 2000. *Modeling the deterioration of hydrated cement systems exposed to frost action*. Part 1: description of the mathematical model, Cement and Concrete Research 30: 1929–1939.
- ГОСТ 12730.4-78. 1980. *БЕТОНЫ*. Методы определения показателей пористости. СССР.
- Лыков А.В. 1968. *Теория сушки*. М. : Стройиздат
- Невиль А.М. 1972. *Свойства бетона*. Изд.Лит-ры по строительству
- Соломатов, В.И. 1989. *Интенсивная технология бетонов* / В.И. Соломатов, М.К. Тахиров, Мд Тахер Шах. – Совм. Изд-во СССР – Бангладеш. – М. :Стройиздат
- Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. 1989. *Цементные бетоны высокой морозостойкости*. Стройиздат, Лен. Отд, Л.