



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# Monolitinio betono kupolų statybos technologijų tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

---

**Manfredas Labanauskas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Mindaugas Daukšys**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

## Monolitinio betono kupolų statybos technologijų tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybų valdymas (6211EX007)

---

**Manfredas Labanauskas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Mindaugas Daukšys**

Vadovas

**Doc. dr. Ernestas Ivanauskas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis  
Studijų programa: STATYBOS VALDYMAS

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):  
MONOLITINIO BETONO KUPOLŲ STATYBOS TECHNOLOGIJŲ TYRIMAI

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: \_\_\_\_\_

(lietuvių k.):  
MONOLITINIO BETONO KUPOLŲ STATYBOS TECHNOLOGIJŲ TYRIMAI

(anglų k.):  
RESEARCH INTO THE CONSTRUCTION TECHNOLOGIES OF MONOLITIC  
CONCRETE DOMES

**Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):**

Tyrimo objektas – monolitinio betono kupolų statybos technologijos.  
Tyrimo tikslas – atlikti monolitinio betono kupolų statybos technologijų analizę

**Baigiamojo projekto dalys:**

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

**Kita informacija (pagal poreikį):**

Konsultacinių užsiėmimų laikas – antradieniais 14-15 val.

**Vadovas:**  
(indėlis 100 %)

Prof. Mindaugas Daukšys

*pareigos, vardas, pavardė*

*parašas*

**Konsultantas:**  
(indėlis \_\_\_\_\_ %)

*pareigos, vardas, pavardė*

*parašas*

**Konsultantas:**  
(indėlis \_\_\_\_\_ %)

*pareigos, vardas, pavardė*

*parašas*

**Studentas:**

Manfredas Labanauskas

*vardas, pavardė*

*parašas*



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros

Manfredas Labanauskas

**Monolitinio betono kupolų statybos technologijų tyrimai**  
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Manfredo Labausko, baigiamasis projektas tema „Monolitinio betono kupolų statybos technologijų tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Labanauskas Manfredas. Monolitinio betono kupolų statybos technologijų tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas / vadovė profesorius Mindaugas Daukšys; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: betono kupolai, statyba, torkretavimas.

Kaunas, 2021. 68 p.

## Santrauka

Baigiamajame magistro projekte analizuojama monolitinių betono kupolų statybos technologija. Apžvelgtos monolitinių betono kupolų statybos technologijos išskiriant skirtingas klojinių sistemas, lyginamos alternatyvos torkretuojant skirtingas kupolo puses iš vidaus ir lauko. Apžvelgiama betoninių kupolų formavimo įdėjų raida.

Tiriamosiose dalyje nagrinėta torkretavimo technologijos įtaka betono bandinių fizikinėms ir mechaninėms savybėms nustatyti bei betono ilgaamžiškumui, lyginant betono mišinio ruošimo ceche bei statybos aikštelėje suformuotiems bandiniams. Nustatytos ir palygintos betono mišinio technologinės savybės, gniuždymo stiprio nustatymas, atsparumo šalčiui nustatymas, nepralaidumo vandeniui nustatymas, vandens įsiskverbimo gylis į betono bandinius ir dilumo nustatymas. Visi bandymai atlikti KTU laboratorijoje.

Gauti tyrimo rezultatai: tankio rezultatų vidurkis: betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių,  $T - 2413 \text{ kg/m}^3$ ; statybos aikštelėje suformuotų bandinių,  $TO - 2301 \text{ kg/m}^3$ . Gniuždymo stiprio rezultatų vidurkis: betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių,  $T - 46,2 \text{ MPa}$ ; statybos aikštelėje suformuotų bandinių,  $TO - 45,8 \text{ MPa}$ . Gniuždymo stiprio vidurkis po 200 užšaldymo ciklų:  $T - 4,6 \%$ ;  $TO - 10\%$ . Masės pokytis po 200 užšaldymo ciklų:  $T - 0,6\%$ ;  $TO - (-2\%)$ . Nelaidumo vandeniui rezultatai:  $T$  ir  $TO$  bandiniai atitinka W8 markę. Vandens įsiskverbimo gylis rezultatai: betono mišinio ruošimo ceche suformuoti  $T$  ir statybos aikštelėje suformuoti  $TO$  bandiniai nelaidūs vandeniui. Dilumo rezultatai: betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių,  $T - 10,01 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ ; statybos aikštelėje suformuotų bandinių,  $TO - 9,74 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ .

Skirtingu būdu suformuotų bandinių gauti rezultatai ir savybės skiriasi dėl skirtingų formavimo ir laikymo sąlygų. Betono ruošimo ceche suformuoti bandiniai buvo idealiai sutankinami ant vibro stalo ir palikti kietėti laboratorijoje apsemti vandeniui. Statybos aikštelėje suformuoti bandiniai buvo torkretuoti į formą be papildomo sutankinimo ir palikti kietėti lauko sąlygomis statybvietyje. Dėl šių sąlygų buvo prognozuojamas betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių geresnės savybės, kurias įrodė gauti rezultatai atlikus bandymus.

Darbas susideda iš įvado, 4 skyrių, išvadų, literatūros sąrašo. Darbo apimtis - 68 puslapiai, 49 paveikslų, 14 lentelių, 8 formulių, 45 literatūros šaltinių.

Labanauskas Manfredas. Research into the Construction Technologies of Monolithic Concrete Domes. Master's Final Degree Project/ supervisor professor Mindaugas Daukšys; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: concrete domes, construction, shotcrete.

Kaunas, 2021. 68 pages.

### **Summary**

The final master's project analyzes the construction technology of monolithic concrete domes. The project includes the analysis of monolithic concrete domes' construction technologies by distinguishing different formwork systems, and the comparison of the alternatives for torching different sides of the dome from inside and outside. Moreover, the project covers the revision of concrete dome-forming ideas' development.

The research part of the project includes the analysis of the coating technology influence on the determination of physical and mechanical properties of concrete samples as well as concrete durability, comparing the samples that were formed in the concrete mix production factory and on the construction site. Moreover, technological properties of concrete mix, determination of compressive strength, frost resistance, water impermeability, depth of water penetration into concrete samples, and determination of wear were determined and compared. All tests were performed in the KTU laboratory.

The obtained research results show that the average density of the samples formed in the concrete mix production factory (further - T) is 2413kg/m<sup>3</sup>; the average density of samples formed on the construction site (further - TO) - 2301kg/m<sup>3</sup>. The average of the compressive strength results of the samples formed in the concrete mix production factory, T - 46.2 MPa; samples formed on the construction site, TO - 45.8 MPa. Average compressive strength after 200 freezing cycles: T - 4.6%; TO - 10%. Mass change after 200 freezing cycles: T - 0.6%; TO - (-2%). Water-resistance results: T and TO specimens correspond to the W8 mark. The water penetration depth results showed that both T and TO samples are waterproof. Abrasion results: samples formed in the concrete mix production factory, T - 10,01 cm<sup>3</sup>/50cm<sup>2</sup>; samples formed on the construction site, TO – 9,74 cm<sup>3</sup>/50cm<sup>2</sup>.

The obtained results and the properties of the samples formed in different ways differ due to different formation and storage conditions. The specimens formed in the concrete mix production factory were compacted on a vibrating table perfectly and left to solidify in a laboratory immersed in water. The specimens formed on the construction site were spread into the mold without additional compaction and left to solidify under field conditions on the construction site. Due to these conditions, it was predicted that the properties of the samples formed in the concrete mix production factory should be better. It was proved by the results that were obtained after the tests.

The project consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, and references. The volume of the project is 68 pages, 49 figures, 14 tables, 8 formulas, and 45 references.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas.....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas.....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas.....</b>	<b>11</b>
<b>Įvadas .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Monolitinio betono kupolų statybos technologijos.....</b>	<b>13</b>
1.1. Pneumatinės klojinių sistemų .....	13
1.2. Kupolų klojinių sistemų.....	19
1.3. Betono lengvų konstrukcijų dizainas pagal kvalifikacija .....	22
1.4. Šiuolaikinės technologijos monolitinių kupolų statyboje .....	26
1.5. Torkretavimas .....	30
1.6. Betoninių kupolų formavimo idėjų raida .....	31
1.7. Literatūros apžvalgos santrauka .....	32
<b>2. Praktikoje taikomų monolitinio betono kupolų statybos technologijų privalumai ir trūkumai.....</b>	<b>33</b>
2.1. Praktikoje taikomos monolitinio betono kupolų statybos technologijos išskiriant skirtingas klojinių sistemas .....	34
2.2. Monolitinių kupolų statymas torkretuojant vidinę kupolo pusę, torkretuojant išorinę kupolo pusę, torkretavimui naudojant skirtingas medžiagas .....	35
<b>3. Tyrimų metodika.....</b>	<b>37</b>
3.1. Torkretavimo įranga .....	37
3.2. Betono mišinio technologinių savybių nustatymas .....	40
3.3. Bandinių formavimas ir kietinimas .....	41
3.4. Betono bandinių fizikinių ir mechaninių savybių nustatymas .....	41
3.5. Betono ilgaamžiškumo nustatymas .....	44
<b>4. Tyrimų rezultatai. ....</b>	<b>46</b>
4.1. Torkretavimui paruošto mišinio technologinės savybės .....	46
4.2. Torkretavimo technologijos įtaka betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms .....	47
4.3. Tokretavimo technologijos ilgaamžiškumo įtaka.....	57
<b>Išvados.....</b>	<b>61</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas.....</b>	<b>62</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>65</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> kupolų statybos technologijų privalumai ir trūkumai.....	33
<b>2 lentelė.</b> kupolų statybos technologijos išskiriant skirtingas klojinių sistemas.....	34
<b>3 lentelė.</b> lyginamos alternatyvos torkretuojant vidinę kupolo pusę, torkretuojant išorinę kupolo pusę.....	35
<b>4 lentelė.</b> Betono mišinio sudedamosios dalys.....	46
<b>5 lentelė.</b> Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) nelaidumo vandeniui bandymo rezultatai.....	49
<b>6 lentelė.</b> Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) nelaidumo vandeniui bandymo rezultatai.....	50
<b>7 lentelė.</b> Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui bandymo rezultatai.....	50
<b>8 lentelė.</b> Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui bandymo rezultatai.....	51
<b>9 lentelė.</b> T bandinių vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui bandymo fotofiksacija.....	52
<b>10 lentelė.</b> TO bandinių vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui bandymo fotofiksacija.....	53
<b>11 lentelė.</b> Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) dilumo bandymo duomenys.....	53
<b>12 lentelė.</b> Tokretbetonio dilumo bandymo duomenys (bandiniai formuoti statybos aikštelėje).....	54
<b>13 lentelė.</b> T betono bandymo fotofiksacija.....	54
<b>14 lentelė.</b> TO betono bandymo fotofiksacija.....	55



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b>	Neffo betono kupolo konstrukcijos.....	14
<b>2 pav.</b>	Neffo patobulinto betono kupolo konstrukcijos schema.....	14
<b>3 pav.</b>	Tuščiaavidūrių lengvųjų sienų elementų konstrukcijos metodas, išrado Mathewsas.....	14
<b>4 pav.</b>	Mathewso schema, kaip naudoti pripūstus guminės žarnos vamzdelius.....	15
<b>5 pav.</b>	Bini membranos fiksacija laikančiame elemente (a) ir speciali statmena armatūra (b).....	15
<b>6 pav.</b>	Heifetzo išrastas „Domecrete“ konstrukcijos metodas.....	16
<b>7 pav.</b>	MacCracken sukurtas sustiprinto pastato metodas iš plastikinio apvalkalo, pripučiant klotinius ir sukietinant apvalkalą kaitinant.....	16
<b>8 pav.</b>	Thonny pasiūlytas apvalkalo konstrukcijos metodas naudojant papildomas konstrukcijas prieš dengiant membraną.....	17
<b>9 pav.</b>	2014/15 m. ICD / ITKE tyrimų paviljono statybos metodas, Štutgarto universitetas.....	17
<b>10 pav.</b>	Pripūstas paviljonas, sustiprintas anglies pluoštais, kurie užpurškiami roboto pagalba.....	17
<b>11 pav.</b>	Monolitinio audinio surinkimo maketas.....	18
<b>12 pav.</b>	Monolitinio kupolo konstrukcija paliekant membraną išorėje.....	18
<b>13 pav.</b>	kupolų klotinių sistemų klasifikacija.....	20
<b>14 pav.</b>	Sukietinto betono (PFHC) konstrukcijos metodo pneumatinis formavimas.....	21
<b>15 pav.</b>	Eksperimentas Austrijoje: sferinio apvalkalo pastatymas naudojant PFHC metodą.....	21
<b>16 pav.</b>	pavyzdys laisvos formos apvalkalo pastatymui.....	22
<b>17 pav.</b>	Felix Candela suprojektuotas restoranas Les Manantiales.....	22
<b>18 pav.</b>	Analitinės formos: horizontalus paviršius (a), vertikalus paviršius (b) ir sukamasis paviršius (c).....	23
<b>19 pav.</b>	Felix Candela klotinių konstrukcija.....	23
<b>20 pav.</b>	Islerio eksperimentinės formos, pagrįstos oro slėgiu, sunkio jėga ir medžiagos.....	24
<b>21 pav.</b>	Heinzo Islerio klotinių sistema.....	24
<b>22 pav.</b>	Toyo Ito ir Mutsuro Sasaki, Krematoriumas Kakamigahara Gifu mieste, Japonija, 2006 m. ....	24
<b>23 pav.</b>	Manheimo tinklelių dizainas, pagrįstas pakabinamu modeliu.....	25
<b>24 pav.</b>	Manheimo tinklelio konstrukcija.....	25
<b>25 pav.</b>	Grotelių konstrukcijos kėlimo būdas.....	25
<b>26 pav.</b>	Džeimso Wallerio pagamintas Ctesiphon apvalkalas.....	27
<b>27 pav.</b>	Monolitinio kupolo korpuso namas.....	28
<b>28 pav.</b>	lengvai gabenamas lankstus klotinys.....	28
<b>29 pav.</b>	Užbaigtas betono paviršius be defektų.....	29
<b>30 pav.</b>	Audinių klotinių ir jų chronologinė schema. Andreoli, 2004.....	32
<b>31 pav.</b>	statybos aikštelėje suformuoti bandiniai.....	37
<b>32 pav.</b>	Rišimasi greitinančios įmaišos padavimo į tūtą siurblys.....	38
<b>33 pav.</b>	Betono mišinio purkštuvas – su hidrauliniu valdymo mechanizmu.....	38
<b>34 pav.</b>	Oro kompresorius.....	38
<b>35 pav.</b>	Betono mišinio padavimo į tūtą siurblys.....	39
<b>36 pav.</b>	„Šlapiojo tokretavimo būdas“, tūtoje sumaišomas betono mišinys su rišimasi greitinančia įmaiša.....	39
<b>37 pav.</b>	Tokretavimo įranga sumontuota ant savaeigės statybos mašinos.....	39
<b>38 pav.</b>	Betono mišinio ruošimo ceche suformuoti bandiniai.....	41
<b>39 pav.</b>	Bandiniai palikti kietėti vandenyje.....	41

<b>40 pav.</b> Betono mišinio slankumo nustatymas.....	46
<b>41 pav.</b> Sukietėjusio betono bandinių tankis: TO - betono tankis, taikant torkretavimo technologiją.....	47
<b>42 pav.</b> Betono tankio, taikant torkretavimo technologiją, prognozavimas, kai žinomas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, sutankinto betono tankis.....	48
<b>43 pav.</b> Betono bandinių gniuždymo stipris.....	48
<b>44 pav.</b> Betono gniuždymo stiprio, taikant torkretavimo technologiją, prognozavimas, kai žinomas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, betono gniuždymo stipris.....	49
<b>45 pav.</b> Torkretavimo technologijos įtaka vandens įsiskverbimo gyliui betone.....	51
<b>46 pav.</b> Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) ilgaamžiškumas.....	58
<b>47 pav.</b> Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) ilgaamžiškumas.....	57
<b>48 pav.</b> Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) bandinių vaizdas.....	59
<b>49 pav.</b> Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) bandinių vaizdas.....	60

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

cm – centimetras;

mm – milimetras;

proc., % – procentai;

kg – kilogramas;

g – gramas;

°C – Celsijaus laipsnis;

MPa – megapaskaliai;

val. – valanda;

m - metras;

m<sup>3</sup> – kubinis metras;

PFHC – pneumatinis sukietėjusio betono formavimas. (išbetonuotos plokštės sutvirtinamos ir iškeliamos pripučiant pneumatinius klojinius);

ICD – kompiuterinio skaičiavimo institutas;

ITKE – statybinių konstrukcijų ir skaičiavimo institutas;

### Terminai:

Torkretavimas – betonavimo būdas, kurio metu betonas yra purškiamas į formą arba paviršių. Sausas betono mišinys torkretavimo įrenginyje yra sumaišomas su vandeniu ir suslėgtu oru 50-170 m/s greičiu išpurškiamas. Betonuojamas storis 25-75 mm kas 7-15 min. Tokio betono nereikia papildomai sutankinti, sukietėjęs yra stiprus, atsparus šalčiui ir nepraleidžia vandens. Šiuo būdu betonuojamas kupolinės konstrukcijos, užtaisomos siūlės, remontuojami tuneliai, stiprinamos konstrukcijos.

## Ivadas

Monolitinė statyba – tai įvairios paskirties statinių statyba naudojant betoną, armavimo elementus ir klojinius. Monolitinė statyba yra viena iš sparčiausiai besivystančių ir labiausiai perspektyvių statinių statybos technologijų. Naujausios technologijos ir medžiagos leidžia taupyti darbo sąnaudas, tuo pačiu mažindamos projektų išlaidas.

Didėjant klojinių įrengimo sąnaudoms, pradėta klojinių sistemas tobulinti. Tobulėjant monolitinei statybai atsirado betono purškimo technologija, kuri leidžia statyti įvairiausių architektūrinių formų konstrukcijas ir statinius. Tai padidino statybos objektų įvairovę. Tinkamai organizavus darbus, monolitinė statyba daugeliu atvejų yra pranašesnė už taikomas tradicines statybas. Statyboms didėjant, statybų kompanijos turi planuoti savo statybinių medžiagų sąnaudas, atliekamų darbų tempą, naujų technologijų pritaikymą. Vieni iš pagrindinių dalykų lemiančių pelną: konstrukciniai ir technologiniai metodai, laikas, medžiagos, investicijos ir kt.

Monolitinio betono kupolai gali būti suprojektuoti taip, kad atitiktų bet kokius architektūrinius poreikius. Pagal savo paskirtį jie gali būti naudojami kaip gyvenamieji pastatai, kajutės, bažnyčios, mokyklos, gimnazijos, arenos ir stadionai arba atitikti kitą paskirtį. Lietuvoje šie kupolai dažniausiai statomi birioms medžiagoms sandėliuoti. Monolitinio betono kupolai gali būti eksploatuojami neapsiribojant nei klimatinių sąlygų kaita, nei vietovės lokacija. Kalbant apie energijos suvartojimą, ilgaamžiškumą, atsparumą stichinėms nelaimėms ir techninę priežiūrą, monolitinio betono kupolai puikiai tinka bet kokiam klimato, net esant dideliems karščiams arba šalčiams. Jie gali būti pastatyti kalnuose, paplūdimiuose, po žeme ar net po vandeniu.

Monolitinės statybos privalumai:

- ❖ pigesnė pastato konstrukcija;
- ❖ sparti statyba;
- ❖ pastatų ir patalpų įvairūs projektavimo variantai;
- ❖ aukštas konstrukcijų standumas;
- ❖ patikimumas;
- ❖ atsparumas ugniai;
- ❖ pastato ilgaamžiškumas.

**Tyrimo objektas** – monolitinio betono kupolų statybos technologijos.

**Tikslas atlikti** – monolitinio betono kupolų statybos technologijų analizę.

**Darbo uždaviniai:**

1. Apžvelgti praktikoje taikomas monolitinio betono kupolų statybos technologijas (išskiriant atskirų statybos būdų privalumus ir trūkumus);
2. Parinkti nagrinėjamas alternatyvas (torkretuojant vidinę kupolo pusę, torkretuojant išorinę kupolo pusę, torkretavimui naudojant skirtingas medžiagas) ir jas palyginti;
3. Nustatyti torkretavimo technologijos įtaką betono bandinių fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei betono ilgaamžiškumui, lyginant betono mišinio ruošimo ceche bei statybos aikštelėje suformuotų bandinių savybes.

## 1. Monolitinio betono kupolų statybos technologijos

### 1.1. Pneumatinės klojinių sistemos

Betonas kaip statybinė medžiaga pasižymi dideliu atsparumu gniuždymui, mažu tempiamuoju įtempiu ir geru klojimu. Norint visiškai panaudoti šios medžiagos galimybes, laikančiųjų konstrukcijų forma turi būti suprojektuota taip, kad pilnai išnaidotų betono laikančiąsias savybes.

Tuščiaidurėse konstrukcijose medžiagų taupymas pasiekiamas mažinant elementų matmenis, šiuo atveju kupolų sienelės storį. Tinkamai suprojektuoti betoniniai kupolai gali apimti didelius plotus, perduodant apkrovas ir įtempius per sienelę. Tačiau pagrindinė šių konstrukcijų problema yra didžiulės pastangos (žmogaus darbo sąnaudos), reikalingos surenkant sudėtingas klojinių sistemas. Viena iš galimybių sumažinti šias pastangas yra naudoti pneumatinius klojinius.

Šiame darbe aprašomos išrastos skirtingos pneumatinių klojinių sistemos ir pateikiami naujausi pokyčiai šioje srityje. Sistemas galima suskirstyti į tris kategorijas (oro erdvė pneumatiniai klojiniai, klasikiniai pneumatiniai klojiniai, kėlimo pneumatiniai klojiniai), taip pat naują statybos būdą, vadinamą pneumatiniis sukietėjusio betono (PFHC) formavimas (išbetonuotos plokštės sutvirtinamos ir iškeliamos pripučiant pneumatinius klojinius). [43] Šis metodas buvo išrastas Vienos inžineriniame institute ir naudojamas kaip pneumatinė klojinių sistema.

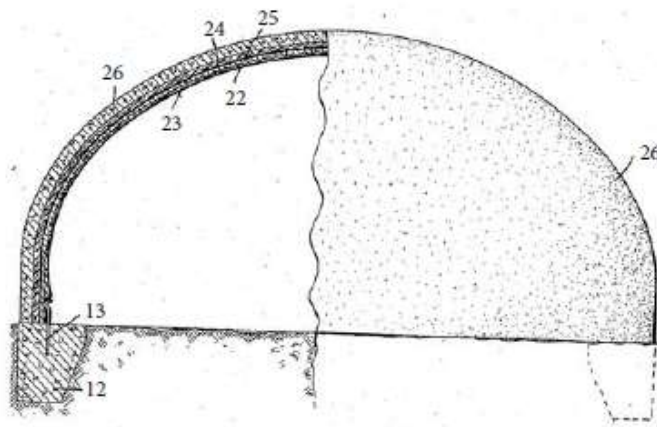
Betonas turi aukštą gniuždymo stiprumą ir mažą tempiamąjį stiprį. Deja, dauguma betoninių konstrukcijų stengiamasi išvengti tempimo jėgų. Daugelyje konstrukcijų dideli įtempiai, kuriuos sukelia lenkimo momentai, šlyties jėgos, sukimo momentai lemia ribotą medžiagos (betono) panaudojimą ir reikalauja daug papildomo sustiprinimo armatūra. Tinkamai suprojektuotos tuščiaidurės struktūros arba dvigubai lenktos konstrukcijos, tokios kaip kupolai, pasižymi geru apkrovos perdavimu. Tai leidžia platesnį medžiagos panaudojimą ir sumažina konstrukcijos storį. Nepaisant to, šių konstrukcijų statyba nėra pati populiariausia šiuo metu. Pagrindinė priežastis sudėtingas klojinių įrengimas bei kvalifikacijos trūkumas surinkinėjant tokio tipo klojinių sistemas. Tačiau yra pneumatinių klojinių sistemos, kurios padeda išvengti nuokrypių ir netikslumų surenkant paprasto tipo klojinius. Plona membrana užpildyta oru yra naudojama kaip atraminė struktūra betono kevalui suformuoti. Daugybė esamų pneumatinių klojinių sistemų susiduria su betonavimo metu atsirandančiomis apkrovomis, kurios veikia galutinės konstrukcijos storio nukrypimus. Kadangi betonas yra sunkus, pneumatinių klojinių sistema gali lengvai deformuotis. Tai lemia nukrypimus nuo suprojektuotos struktūros.

Toliau pateikiama išsami apžvalga, taikymo sritys ir skirtingi požiūriai. Analizuojamos esamų įvairių sistemų problemos ir rezultatai bus naudojami naujiems būdams ir kuriant naujas sistemas. Vienas iš pirmųjų pneumatinių klojinių pritaikymų buvo užpatentuotas 1926 m. [1, 2].

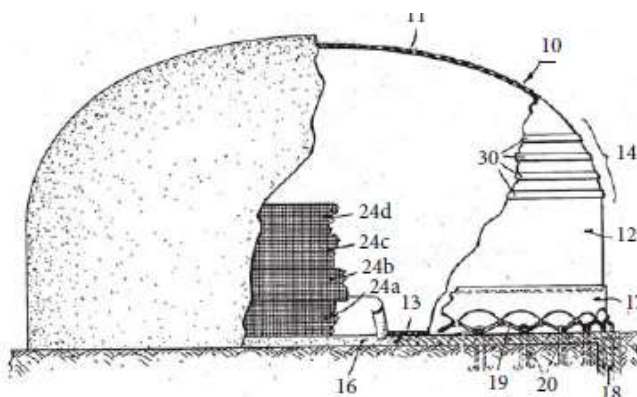
#### Neff pneumatinių klojinių sistema

Neff pneumatinių klojinių sistemoje naudojama vamzdinė pripučiamą konstrukcija, sumontuota ant išorės rėmų, o tuščia likusi erdvė užpildoma betonu. Sukietėjus betonui pašalinama membrana. Po kelerių metų, 1941 m., Neff pirmasis išrado ekonomiškai efektyvių namų statybą, naudodamas pneumatinius klojinius. Taikant šį metodą pirmiausia, yra pagaminama membrana, kuri – atitinka reikiamą kupolo forma. Ši membrana yra pritvirtinama prie pagrindo kraštuose, kad būtų išvengta pakilimo nuo žemės. Kitame etape yra rišamas armatūros karkasas ir purškiamas betonas ant

membranos keliais sluoksniais, kol gaunamas reikiamas sienos storis. Vėliau membrana pašalinama. Paskutiniame etape yra išpjaunamos langų ir durų ertmės. Tačiau šio tipo sistema turi problemą, kurią sukelia tempimo jėgos. Kupolo apačioje atsiranda įtrūkimai. Norint išvengti šios problemos reikalingas geras armatūros karkaso surišimas su pamato konstrukcijos dalimi, kad absorbuotų (perimtų) tempimo jėgą [2].

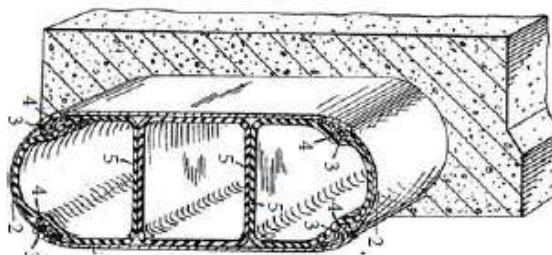


**1 pav.** Neffo betono kupolo konstrukcijos [2].



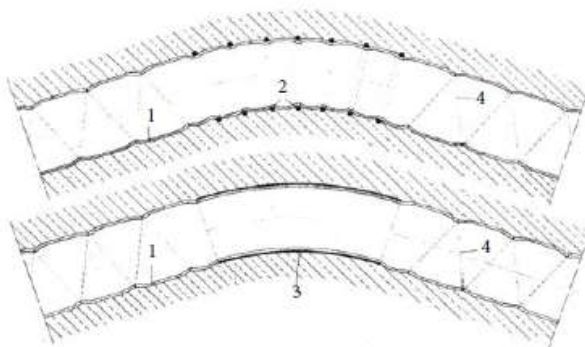
**2 pav.** Neffo patobulinto betono kupolo konstrukcijos schema [2].

1949 m. Mathews užpatentavo tuščiavidurių betoninių elementų gamybos metodą. Pripučiamą šerdį pastatyta tarp dugno ir viršutinės plokštės, pagamintos iš plieno. Naudojamas palikti norimą tarpą tarp plokštelių, kaip parodyta 3 paveiksle. Pagrindinis šio gamybos metodo tikslas sumažinti reikiamo betono kiekio masę, taip pat elementų svorį [3].



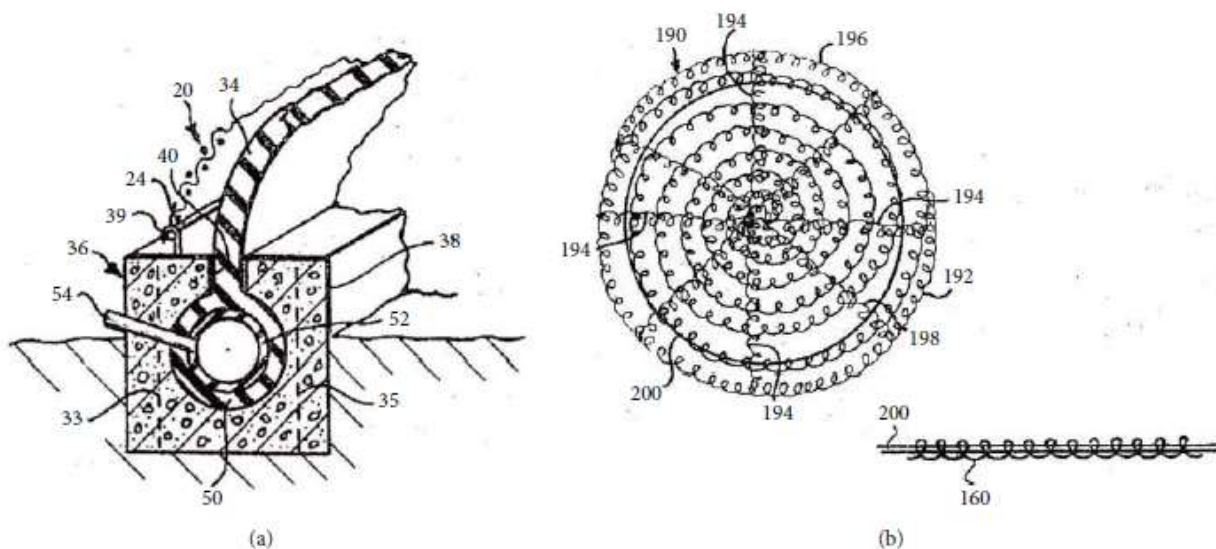
**3 pav.** Tuščiavidurių lengvųjų sienų elementų konstrukcijos metodas, išrado Mathewsas [2].

Leonhardtas taip pat dirbo su tam tikro tipo pneumatiniiais klojiniais. Kaip membraną jis naudojo pripūstas guminės žarnos vamzdelius. Jis taip pat panaudojo papildomus plieninius žiedus ties lanko žarnos posūkiu, o po to pripūtė vamzdelius. Taip darant buvo pasiektas, briaunuoto vidinio kanalo paviršiaus įtempimo sumažinimas. 4 paveiksle parodyta principinė elemento schema.



**4 pav.** Mathewso schema, kaip naudoti pripūstus guminės žarnos vamzdelius [2].

Mora užpatentavo kitą lengvų sienų elementų konstrukcijos metodą. Pripučiami elipsės formos vamzdeliai dedami tarp tinkamų medžiagos apvalkalų (pvz., plastiko, tekstilės, gumos, stiklo pluošto ar jų derinių). Skirtingai nei Mathews, jis suko pneumatines konstrukcijas 90 ° kampu ir sumontavo vertikaliai. Bini išrado alternatyvų apvalkalo konstrukcijos metodą 1969 m. [2]. Kaip priešingai visais anksčiau aprašytais metodais pirma jis liejo betoninę plokštę ir į nesukietėjusį betoną įtvirtino membraną. Jis pritvirtino membraną griovelio viduje, kaip parodyta 5 pav.



**5 pav.** Bini membranos fiksacija laikančiame elemente (a) ir speciali statmena armatūra (b) [3].

Apskritimo kryptimi pripučiamas jo viduje esantis papildomas pneumatinis vamzdis. Membrana naudojama kaip klojinys, yra sulankstyta taip, kad deformacijos kiltų apskritimo kryptimi. Kitame etape yra montuojama armatūra. Siekiant sugerti periferinės armatūros įtempimus, strypai yra suformuoti į spyruokles, kaip parodyta 5 paveiksle (b).

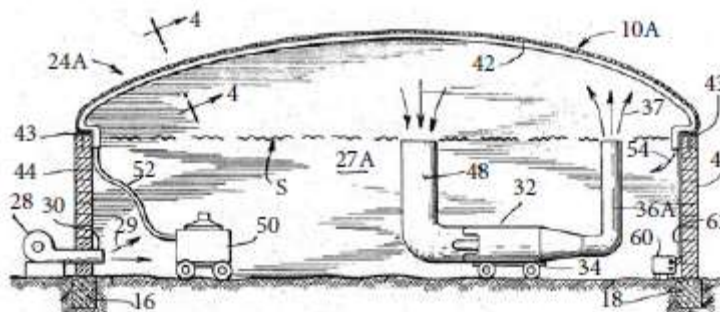
Kitas ekonomišką efektyvių namų gamybos būdas buvo užpatentuotas Heifetz, Izraelyje. Panašiai kaip Neff metodu, pripučiamas pneumatinis klojinys, armatūra sumontuojama membranos išorėje,

ir padengiama betonu [4]. Skirtumas tas, kad Neff pneumatiniuose klojiniuose naudojo 0,5–2,0 kN/m<sup>2</sup> slėgį, o Heifetzas purškiant betoną naudojo aukštesnį slėgį (4,0–10,0 kN/m<sup>2</sup>), kad būtų kuo mažiau deformacijų. Skirtingi gamybos etapai parodyti 6 paveiksle.



6 pav. Heifetzo išrastas „Domecrete“ konstrukcijos metodas [2].

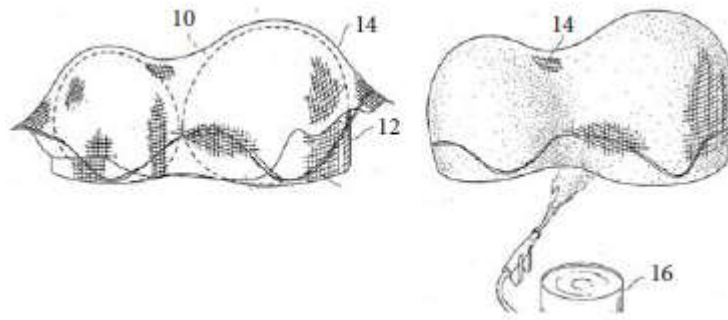
1971 m. MacCracken užpatentavo savarankiško palaikymo metodą korpusiniams stogams pagaminti iš lanksčios šildomo plastiko medžiagos. Kaip parodyta 7 paveiksle, lanksti struktūra yra pripučiama ir palaikoma oro slėgiu. Struktūra yra grūdinama karščiu, naudojant karštas dujas arba karštais skysčiais per ortakius, kad būtų užtikrinti šilumos mainai su stogu.



7 pav. MacCracken sukurtas sustiprinto pastato metodas iš plastikinio apvalkalo, pripučiant klojinius ir sukietinant apvalkalą kaitinant [2].

Išrastus Neffo ir Heifetzo statybos metodus 2005 m. išstobulino Thonny. Pagrindinis principas, parodytas 8 paveiksle. Šiame principo naudojama daugiau konstrukcijų, kurios padengiamos membrana ir dengiamos purškiant betoną. Vėliau pneumatinius klojinius galima pašalinti.





**8 pav.** Thonny pasiūlytas apvalkalo konstrukcijos metodas naudojant papildomas konstrukcijas prieš dengiant membraną [2].

#### Anglies pluošto statybos kupolų technologija

Štutgarto universiteto komanda 2014 m. sukūrė naują kupolų statybos metodą. Šis projektas yra inžinerijos ir gamtos mokslų sukurtas statinys. Išnagrinėjus vandens vorų tinklų konstravimo procesą ir išanalizavus pagrindinius modelius buvo pritaikytas ir perkeltas į skaitmeninį technologinį gamybos procesą. Pirmiausia membrana pripučiama, vėliau sutvirtinama anglies pluoštu impregnuotu epoksidine derva. Šešių ašių robotas pastatomas į konstrukcijos vidurį ir nuosekliai purškia anglies pluošto siūlelius impregnuotus epoksidine derva, kol sudaro laikinąją konstrukciją. 9 pav. parodo konstrukcijos principą.



**9 pav.** 2014/15 m. ICD / ITKE tyrimų paviljono statybos metodas, Štutgarto universitetas [5].

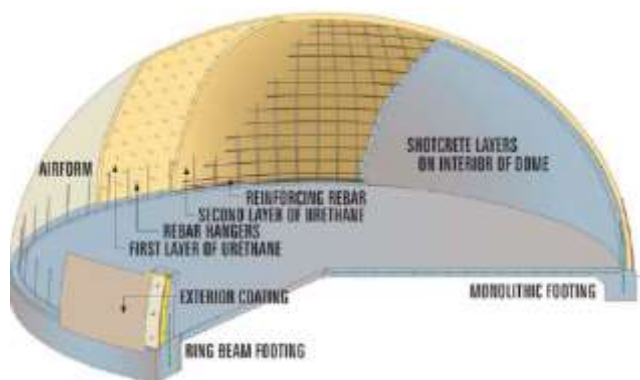
Išdžiuvus suformuotam kupolui galima išpjaustyti angas. Impregnuoti pluoštai tarnauja kaip atraminė konstrukcija ir membrana bei nepralaidi apsauginė danga. Pvz. 10 pav. konstrukcijos plotas yra  $40\text{m}^2$ , tūris -  $125\text{m}^3$ . Bendras prototipo korpuso svoris yra tik apie 260 kg [5].



**10 pav.** Pripūstas paviljonas, sustiprintas anglies pluoštais, kurie užpurškiami roboto pagalba [5, 43].

## Monolitinio audinio surinkimo technologija

Naudojamos betoninio audinio plokštės, kurios pagamintos iš sauso betono ir sujungiamos tarpusavyje. Tai leidžia lengvai pristatyti medžiagas į statybos aikštelę ir surinkti kupolą. Šis statybos būdas tinka mažesniems pastatams su žemais statinio reikalavimais. Pirmiausia juos lengva surinkti ant pripustų klojinių ir purškiant vandenį surišti sauso betono plokštės tarpusavyje. Monolitinio statymo principas parodytas 11 paveiksle.



11. pav. Monolitinio audinio surinkimo maketas [44].

## Monolitinio kupolo konstrukcija

Monolitinio kupolo statyba iš esmės yra trijų etapų procesas:

1. Pripūsta membrana yra atspari vandeniui, paprastai stabilizuota UV spinduliais, tvirtai pritvirtinta prie žiedo pagrindo.
2. Poliuretano izoliacija purškama ant kupolo vidinės pusės, armatūros strypai įspaudžiami į poliuretaną, paruoštą paskutiniam etapui.
3. Ant armatūros ir poliuretano purškama betono forma, vadinama šratbetonių, ir tai sudaro konstrukcinį kupolo elementą.



12 pav. Monolitinio kupolo konstrukcija paliekant membraną išorėje

## Monolitinių kupolų pranašumai

Monolitiniai kupolai yra veiksmingos, ir neįtikėtina stiprios konstrukcijos; jų nesugriauna uraganų vėjai ir žemės drebėjimai. Pagrindinės savybės yra konstrukcijos pastatymo greitis ir lankstumas. Naudojant šią sistemą, gali būti pastatytos birios saugyklos, mokyklos, bažnyčios ir namai. Pakeitus formą, gali būti statomi žemo profilio statiniai, elipsės formos, pusrutuliai ir net keli kupolai vienu metu, iš tikrųjų gali būti pastatyta bet kokia forma. Į konstrukciją galima lengvai įtraukti bet kokios formos duris ir langus. Būdamas gerai izoliuotas ir turėdamas didžiulę vidinę masę, monolitinis kupolas tampa vienu efektyviausiai šilumą naudojančių pastatų.

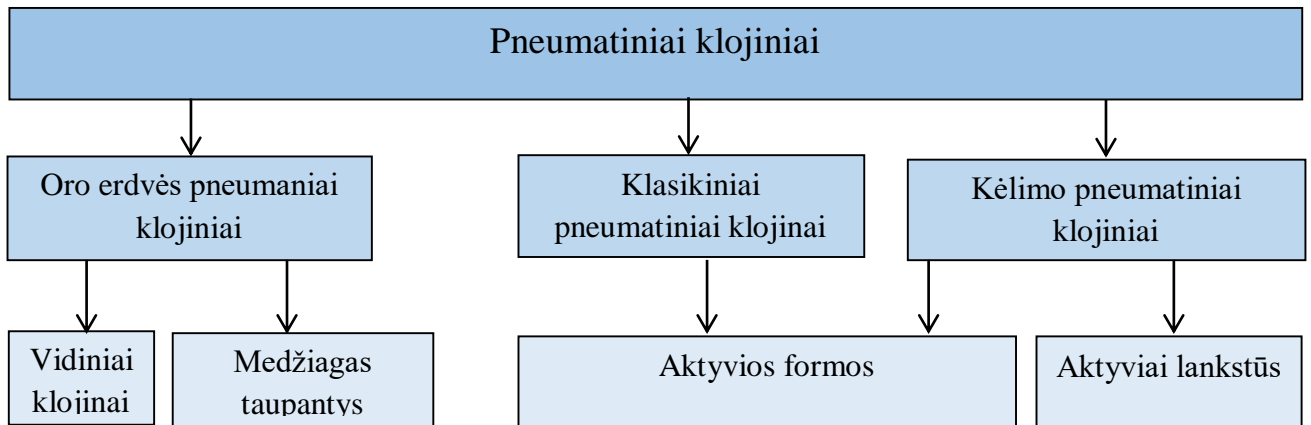
## Monolitinių kupolų trūkumai

Yra trys pagrindinės monolitinių kupolų problemos:

1. Poliuretano putos, vinilas ir betonas nėra pačios tvariausios medžiagos. Poliuretano putos yra gaminamos naftos pagrindu, jų negalima lengvai perdirbti ir jos sudegus išskiria toksiškus dūmus. Vėlgi vinilo membranos forma yra pagaminta iš naftos produktų ir turi keletą problemų, susijusių su formos išgavimu.
2. Jei vinilo membrana yra kokiu nors būdu pažeista, vanduo gali patekti į izoliaciją, kuri prisigers drėgmės ir pasidarys kaip kempinė. Gaisras, vandalizmas net krentančios medžių šakos kelia nerimą monolitinio kupolo savininkui. Viskas, ko reikia, kad kažkas su peiliu sugadintų membraną; vaikai, turintys pneumatinius šautuvus ar lankus, gali lengvai padaryti skilutes. Oro formas galima taisyti arba padengti aliuminiu, kad jos būtų apsaugotos, tačiau tai žymiai padidina sąnaudas.
3. Monolitiniai kupolai yra praktiškai hermetiški, todėl jie puikiai tinka laikyti medžiagas, kurioms reikalinga nuolatinė drėgmė, tačiau kai skirta gyvenamajai paskirčiai, plaunant, gaminant maistą ir maudantis susidaro vandens garai, kuriuos iš pastato reikia pašalinti sausintuvais arba priverstine oro ventiliacija, nes tokio tipo kupolo struktūroje nėra pakankamai natūralios ventiliacijos. Vienintelis būdas pasiekti oro judėjimą per kupolo struktūrą yra skylė, uždengta gaubtu.

### **1.2. Kupolų klojinių sistemos**

Analizuojant esamas sistemas, klojinių sistemos yra suskirstyti į tris pagrindines grupes, kurios yra suskirstytos į keturis pogrupius, kaip parodyta 13 paveiksle. Pirmoji pagrindinė grupė žymi sistemas, kurios naudoja pneumatinius klojinius tuščiaviduriams elementams statyti. Ši grupė yra vadinama „oro erdvės pneumatiniiais klojiniais“ ir apima sistemas, kurias pasiūlė Nose, Mathews, Loenhardt, ir Mora. Antroji pagrindinė grupė vadinama „klasikiniais pneumatiniiais klojiniais“. Joje yra sistemos, kuriose pirmiausia išpučia membraną, o betoną ar kitas medžiagas naudoja vėliau, pavyzdžiui, sukurtas sistemos pateikė Neff, Heifetz, South Prouvost, Schlaich ir Bergermann, Thoeny, Verwimpet ir Doerstelmannet. Paskutinė grupė vadinama „kėlimo pneumatiniiais klojiniais“, apima sistemas, kuriose yra betono ar cemento iš anksto, o vėliau transformuojama į dvigubai išlenktą apvalkalą. Šias sistemas pateikė Bini ir Nicholls [7].



13 pav. kupolų klojinių sistemų klasifikacija.

### Oro erdvės pneumatiniai klojiniai

Oro erdvės pneumatiniai klojiniai yra seniausios žinomos pripučiamų klojinių rūšys. Jie naudojami dviem skirtingais tikslais: monolitiniais kupolams arba specialioje paskirtyje suformuoti tuščiavidurę erdvę. Ypatingas dėmesys turi būti skiriamas tvirtinant pneumatinės konstrukcijas tinkamoje padėtyje ir užtikrinti jų stabilumą kilimo metu. Jei visa pneumatinė konstrukcija yra visiškai uždengta betonu, reikia atsižvelgti į tai, kad membrana lieka įterpta į struktūrą. Jei klojiniai naudojami cilindro formai sukurti, membraną galima pašalinti ir pakartotinai panaudoti. Naudojant šį principą dažniausiai naudojami lengvų konstrukcijų elementai [7].

### Klasikiniai pneumatiniai klojiniai

Klasikiniai pneumatiniai klojiniai yra tinkami plonomis korpusinėms konstrukcijoms statyti. Čia aktyviai formuojama pneumatinių klojinių struktūra. Tai reiškia, kad pneumatinis klojinys turi baigtos struktūros formą. Jei naudojama vienos kameros sistema, oro slėgis bet kuriame taške yra vienodas ir veikia statmenai membranai. Formą galima įtakoti naudojant megztas arba klijuotas pneumatinės konstrukcijas, pritaikytų membranų juosteles arba įtempiant membraną su įvyniojimais ar virvėmis. Tačiau tempimo jėga membranoje visada tiesiogiai priklauso nuo vidinių pneumatinių klojinių slėgio ir kreivio spindulio. Pneumatinės struktūros paprastai turi mažą kreivio spindulį ir nereikia atlaikyti didelių apkrovų. Be to, daugeliu atvejų leidžiamos didelės deformacijos.

Taigi dauguma kreivių skirtumų neturi jokios įtakos dėl tinkamumo naudoti. Priešingai, betoninėms konstrukcijoms naudojamuose pneumatiniuose klojiniuose naudojamas slėgis yra didelis, lyginant su vidiniu slėgiu ir kreivio spinduliu, kuris yra taip pat palyginti didelis. Neigiamų deformacijų įtaka betono savybėms gali pagerinti naudojant specialų betono mišinį. Vis dėlto tai nėra problema tol, kol membranos dydis yra mažas, o betono panaudojimo koeficientas yra žemas. Naudojant klasikinius pneumatinis klojinius, galima sukurti daugybę skirtingų formų [7].

### Kėlimo pneumatiniai klojiniai

Pripučiamos konstrukcijos yra dažnai naudojamos kaip kėlimo įtaisai. Jie pasižymi nedideliu svoriu, ir maža įsigijimo kaina. Priklausomai nuo membranos, siūlių tvirtumo ir slėgio veikimo sukuriama įrenginio (pvz., kompresoriaus arba ventiliatoriaus), galima pakelti dideles apkrovas, pvz. su kėlimo plokštelėmis. Medžiaga dedama ant ištuštintų pneumatinių klojinių ir paverčiama norima forma, kai klojinys yra pripūstas. Jei pripūtimo metu pridėtinė medžiaga vis dar minkšta,

sakoma, kad kėlimo pneumatiniai klojiniai yra aktyvios formos (tas pats, kaip klasikiniai pneumatiniai klojiniai). Jei klojiniai nukrypsta nuo planuojamos formos, galutinės formos struktūra taip pat nukryps. Transformacijos proceso metu minkšta medžiaga turi sugebėti absorbuoti jėgas, kurios atsiranda keičiant plokščią plokštę į dvigubai lenktus apvalkalus.

Pavyzdžiui, jei kaip statybinė medžiaga naudojamas betonas, reikia atsižvelgti į betono rišimosi laiką. Rišimosi laikas paviršiuje gali sukelti nukrypimą nuo norimos figūros. Tai gali būti problema, nes gali atsirasti dideli įtempiai. Kadangi apvalkalo struktūros turi mažą storio ir ilgio santykį, reikalingas nedidelis slėgis formai palaikyti. Pavyzdžiui, betono 100 mm storio kėlimui pakanka tik 25mbar [7].

Kupolų statyba iš surenkamojo betono elementų, naudojant pneumatinius klojinius

Plokščia grūdinta betono plokštė yra paverčiama į dvigubai išlenktus apvalkalus (pneumatinius klojinius). Transformacijos proceso metu plokštė pakeliama ir iškraipoma - pripučiant pneumatinį kėlimo klojinį. 13 paveiksle. Pneumatiniai klojiniai naudojami kėlimui yra tokio pat skersmens kaip betoninis apvalkalas. Papildomai tarp betoninių elementų tvirtinami pneumatiniai pleištai, kurie apsaugo balioną pleišto formos vietose kilimo metu. Plieniniai lynai arba stiklo pluoštu sustiprinti plastikiniai strypai, užtikrina, kad betoniniai elementai atlaikytų didelius įtempius. Šis naujas metodas gali būti naudojamas daugybei skirtingų dvigubai išlenktų formų kurimui [7].



**14 pav.** Sukietinto betono (PFHC) konstrukcijos metodo pneumatinis formavimas [7].

Aktyvaus lenkimo kėlimo pneumatiniai klojiniai.

Naudojant PFHC keičia pneumatinių klojinių pritaikymą nuo aktyvios formos iki lenkimui aktyvios. Šie pneumatiniai klojiniai neturi įtakos galutinei formai.

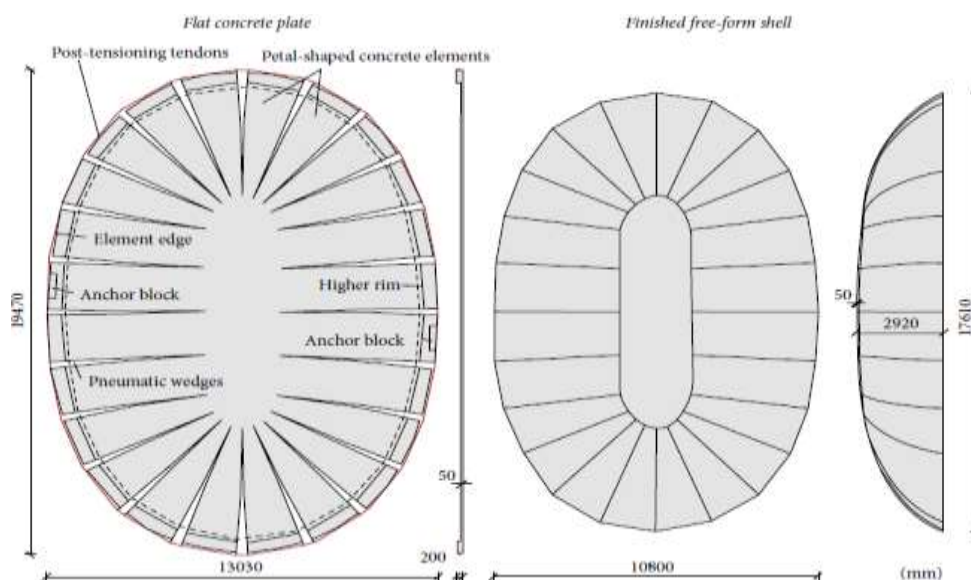
Taigi, jei plokščia plokštė gaminama tiksliai ir visi formos netikslumai yra uždaromi, tada gauta galutinė struktūra gali būti pastatytas tik su nedideliais nukrypimais nuo geometrinės optimalios formos. Galutinė forma gaunama kai pleišto formos tarpai uždaromi ir užsandarinami [7].



**15 pav.** Eksperimentas Austrijoje: sferinio apvalkalo pastatymas naudojant PFHC metodą [7].

Betono savybės. Pirmiausia plokščia plokštė liejama naudojant įprastą betoną

Sukietėjusi plokštė yra transformuojama į dvigubai išlenktą apvaskalą. Tai leidžia naudoti patikrintą gaminimo techniką ir užtikrina aukštą betono kokybę, taip pat tikslus plokštės matmenis. Kaip paaikškinta, daugelio tempimo ir lenkimo bandymų rezultatai ant bandinių, turinčių skirtingas betono savybes ir skirtingo betono rišimosi laiką parodė, kad: armatūra turi didžiausią poveikį, o betoniniai parametrai yra mažai įtakojantis poveikis betoninių plokščių lenkimo savybėms [8].



16 pav. pavyzdys laisvos formos apvaskalo pastatymui [8].

### 1.3. Betono lengvų konstrukcijų dizainas pagal kvalifikacija

Heinzas Isleris 1980 m. nustatė tris monolitinių paviršių tipus. Vadinamus: „geometrinius“, „struktūrinius“ ir „Skulptūrinis“.

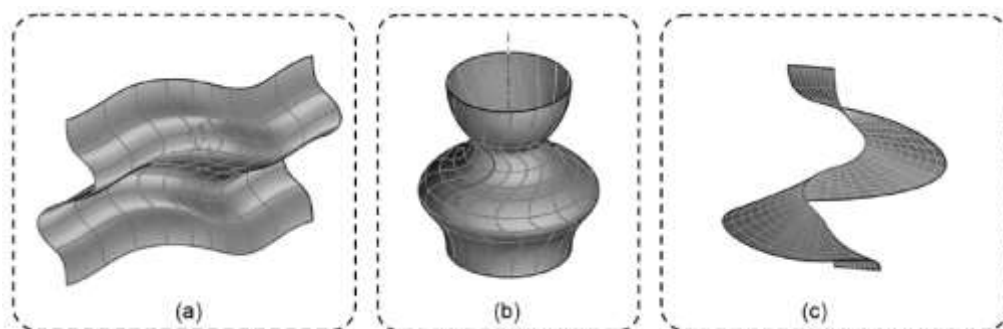
Analitinės formos (geometrinės)

Plačiai paplitusios betoninių stogų konstrukcijos „sužydėjo“ šeštajame dešimtmetyje, kur tokie inžinieriai kaip Feliksas Candela, Eduardo Torroja, Antonas Tedesco ir Pier Luigi Nervi geriausiai suprojektavo, apskaičiavo ir išplatino elegantiškų formų betoninių stogų paviršius. (17 pav.).



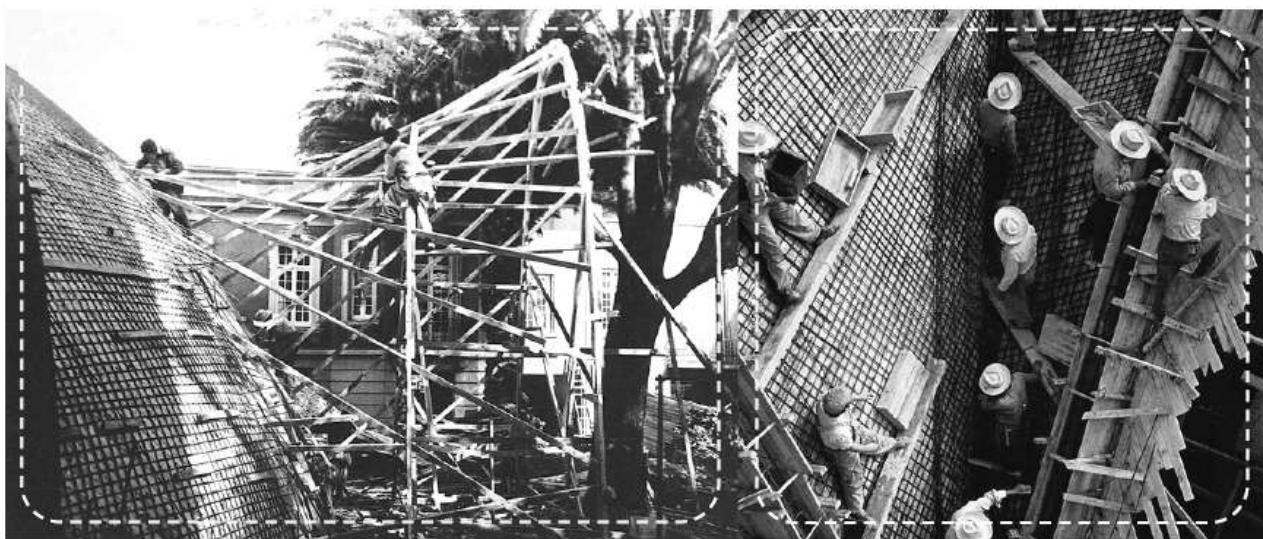
17 pav. Felix Candela suprojektuotas restoranas „Les Manantiales“, Meksikoje [11].

Kadangi 1930–1950 m. Projektai daugiausia buvo paremti matematiniais geometrijos apibrėžimais, šios apvalkalo formos yra vadinamos „analitinėmis formomis“. Įprastai tradiciniai analitiniai paviršiai yra vadinami: „horizontaliais paviršiais“, „vertikaliais paviršiais“ ir „sukamaisiais paviršiais“ (18 paveikslas).



**18 pav.** Analitinės formos: horizontalus paviršius (a), vertikalus paviršius (b) ir sukamasis paviršius (c) [11].

Kadangi tuo laikotarpiu nebuvo skaitmeninio projektavimo ir skaičiavimo įrangos, matematinės formulės buvo ne tik būtinos piešiant ir apskaičiuojant šias struktūras, bet ir padėjo realiam statybos procesui. Didžioji dalis plono betono „apvalkalo“ konstrukcijos buvo statomos pilant šlapią betoną ant tvirtų iš medienos surinktų klojinių. Šis statybos procesas reikalauja daug kvalifikuotų amatininkų (19 paveikslas) [9].



**19 pav.** Felix Candela klojinių konstrukcija [11].

Eksperimentinės formos (struktūrinės)

Šeštajame dešimtmetyje inžinierius Heinzas Isleris pristatė šiek tiek kitokį požiūrį į dizainą. Jis sėkmingai pritaikė keletą naujų fizikinių reiškinių, tokių kaip oro slėgis, sunkis ir medžiagų srautas, kad būtų išgaunamas kuo plonesnis „apvalkalo“ paviršius (20 paveikslas). Dėl eksperimentinio jo požiūrio pobūdžio šios figūros vadinamos „eksperimentinėmis formomis“. Konstrukciniai skaičiavimai buvo atlikti atliekant apkrovos bandymus su mažais modeliais, kurie buvo naudojami projektuojant betono konstrukcijas.



**20 pav.** Islerio eksperimentinės formos, pagrįstos oro slėgiu, sunkio jėga ir medžiagos srautu [11].

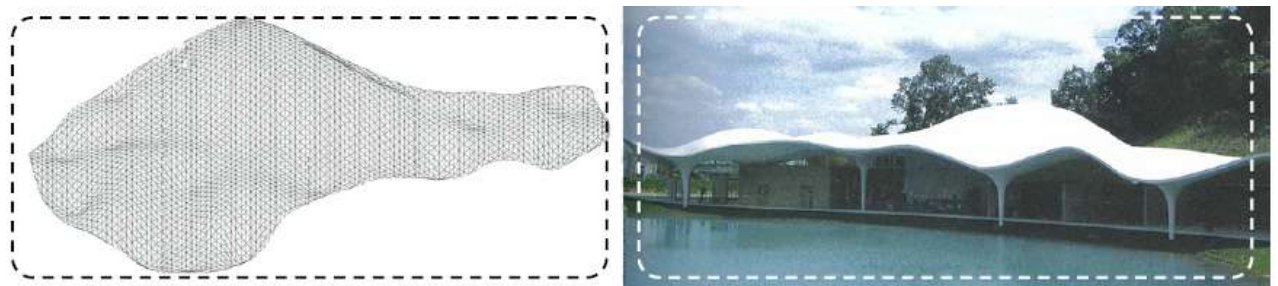
Kadangi Islerio projektai nebuvo lengvai aprašomi analitiškai, toks statybos procesas buvo laikomas sudėtingesniu už „analitinių formų“. Nepaisant to, Heinz Isler sugebėjo suprojektuoti savo sistemos klojinius. Jo klojinių sistema susidėjo iš surenkamų išlenktų medinių segmentų. Didžiausias šios sistemos privalumas, kad šiuos klojinius galima pakartotinai naudoti daugybę kartų. (21 paveikslas) [10].



**21 pav.** Heinzo Islerio klojinių sistema [11].

Skaitmeninės formos (skulptūrinės)

Padidėjęs monolitinių stogų susidomėjimas kilo 1990 m., kai sparčiai vystėsi skaitmeninio modeliavimo technologijos. Skaitmeninės technologijos pasiūlė naujų galimybių architektams ir inžinieriams. Šių laikų technologijos sugeba suprojektuoti ir apskaičiuoti beveik, bet kokią įsivaizduojamą formą. Terminas „laisva forma“ tapo neatsiejama modernaus dizaino dalimi, efektyviai panaudojant CAD, FEM ir net CAM technologiją. (22 paveikslas).

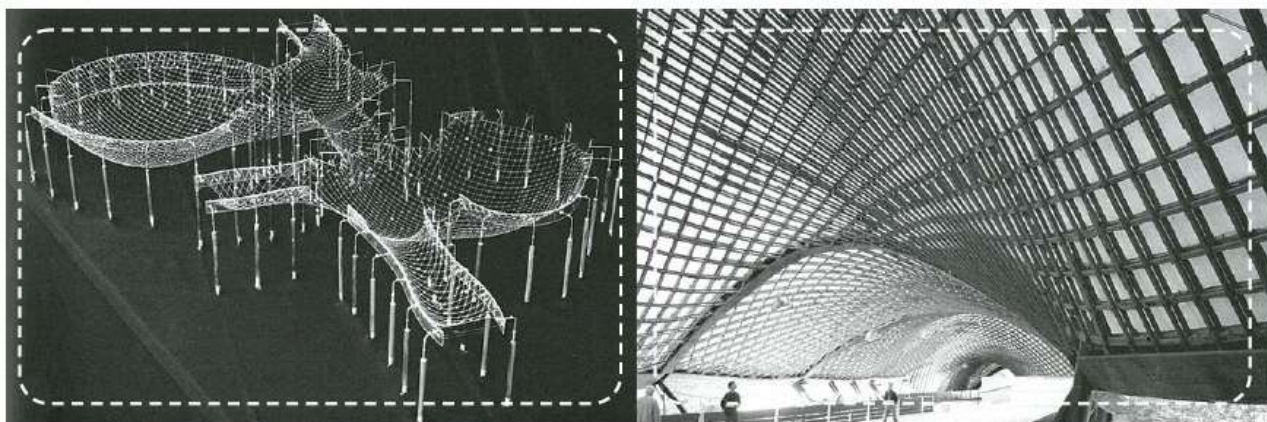


**22 pav.** Toyo Ito ir Mutsuro Sasaki, Krematoriumas Kakamigahara Gifu mieste, Japonija, 2006 m. [11].



## Grotelių karkaso sistema

Frei Otto aštuntajame dešimtmetyje pristatė naują monolitinių stogų karkaso konstrukciją panaudodamas Vladimiro Manheimo tinkelių principą. (23 paveikslas).



**23 pav.** Manheimo tinkelių dizainas, pagrįstas pakabinamu modeliu [11].

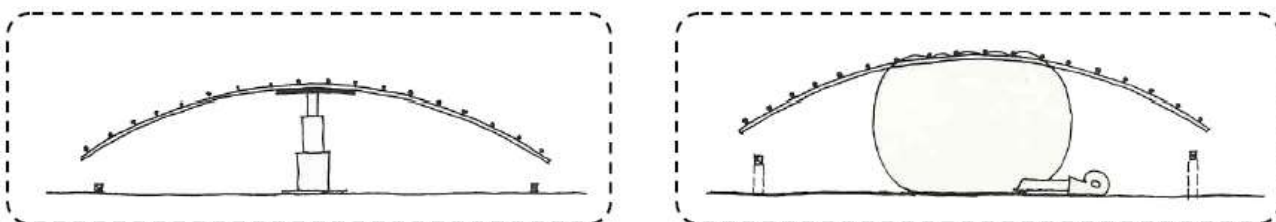
Grotelių statyba prasideda nuo lygaus paviršiaus. Tiesūs elementai yra surenkami ant žemės kaip plokščias tinkelis. Galutinė konstrukcijos forma gaunama lokaliai deformuojant stumiant ir traukiant elementus statmenai paviršiui kol pasiekiami norima forma. (24 paveikslas). Tuomet tinkelis yra sutvirtinamas, bet tinklo jungtys iš pradžių turi būti lanksčios.



**24 pav.** Manheimo tinkelio konstrukcija [11].

## Grotelių konstrukcijos kėlimo būdai.

Konstrukcija pakeliama į galutinę formą pakeliant vidines atramas ar net naudojant pripučiamus pneumatinius įtaisus (25 paveikslas).



**25 pav.** Grotelių konstrukcijos kėlimo būdas [11].

#### 1.4. Šiuolaikinės technologijos monolitinių kupolų statyboje

Santykinai nauja sintetinio pluošto tekstilė ir nauji, greitai besivystantys skaitmeninio modeliavimo metodai sukūrė daugybę naujų galimybių ir paskatino naujausią betoninių kupolų susidomėjimą.

##### Energiją taupanti betono konstrukcija

Klimato pokyčiai yra didžiulė ir vis didėjanti grėsmė žmogaus klestėjimui ir stabilumui, kaip kraštutinumas gamtinės stichijos tampa vis dažnesnės, o natūralios Žemės sistemos stengiasi prisitaikyti prie didėjančios vidutinės temperatūros. Žmogaus sukeltas šiltnamio efektas, kurį sukelia dujų išmetimas yra pagrindinė klimato kaitos priežastis, kuri turi būti sumažinta [12, 13]. Europos sąjungos šalys reaguodamos į tai susitarė dėl privalomo tikslo, sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį - 40 proc. nuo 1990 m. iki 2030 m., ir 80% iki 2050 m. [14].

Pasaulyje betonas yra plačiausiai naudojama statybinė medžiaga. Pagrindinis CO<sup>2</sup> šaltinis betone gaunamas iš portlandcemenčio, kurio gamyba buvo įvertinta 5,2% viso 2014 m. išmetamo CO<sup>2</sup> kiekio [2]. Per pastarąjį dešimtmetį cemento gamyba pasaulyje išaugo nuo 2,22 Gt iki 4,10 Gt, o didžioji dalis šio augimo įvyko Kinijoje [1]. Yra du būdai, kaip sumažinti betono gamybos metu išskiriamas emisijas: 1) sumažinti išskiriamo CO<sup>2</sup> kiekį pagerinant gamybos efektyvumą, sumažinant cemento kiekį arba naudojant alternatyvius rišiklius. 2) suprojektuodami efektyvesnes struktūras, kurios sunaudoja mažiau medžiagų, armatūros išdėstymą ir gamybos procesą. Net paprasčiausiose struktūrose jėgų pasiskirstymas vyrauja nevienodai. Lenktos geometrijos, sukurtos naudojant lanksčias formas suteikia galimybę ne tik architektūrinei raiškai, bet ir sutaupo nemažai medžiagų.

##### Lankstūs klojiniai

Lanksčių klojinių atgimimas prasidėjo nuo XXI amžiaus pradžios, kuri iš dalies lėmė plačiai prieinami aukšto stiprumo audiniai ir šiuolaikinės skaičiavimo analizės metodikos. Tai paskatino įkurti tarptautinę audinių klojinių draugiją (ISOFF) 2008 m., kurios tikslas – puoselėti komunikaciją tarp tyrėjų, rangovų, gamintojų, inžinerijos ir architektūros, perduodant žinias plačiai visuomenei ir padedant tobulėti novatoriškiems audinių formavimo sprendimams.

##### Užpildytos formos

Užpildytoje formoje betonas kelia hidrostatinį spaudimą klojiniams. Lankstus klojiniai daro prielaidą, kad geometrija reikalinga tam, kad būtų atsparūs šiai apkrovai, kurią lemia abu šie faktoriai: klojinių medžiagos slėgis ir vidiniai įtempiai. Tokiu būdu galutinė liejama forma turi būti kontroliuojama iš anksto įtempiant klojinius arba pasirenkant norimą klojinio standumą pagal charakteristikas (nustatant audinio formos matmenų ir ataudų kryptis) [15].

##### Paviršiaus formos

Paviršiaus formos dažniausiai naudojamos apvalkalo struktūroms formuoti. Paprastai tik vienas formavimas reikalingas paviršiui, ant kurio dedamas betonas. Jei paviršius yra pasviręs, betonas turi būti neslankus, kad būtų išvengta tekėjimo. Geometriją nurodo santykinai panaudotas jėgas ir vidinius įtempius klojinyje. Liejant betoninius apvalkalus, klojiniai yra po betonu mechaniškai įtempti palaikomo oro slėgiu (pneumatinių klojinių atveju) arba hidraulinių pavarų (adaptyvaus klojinio atveju) [16].

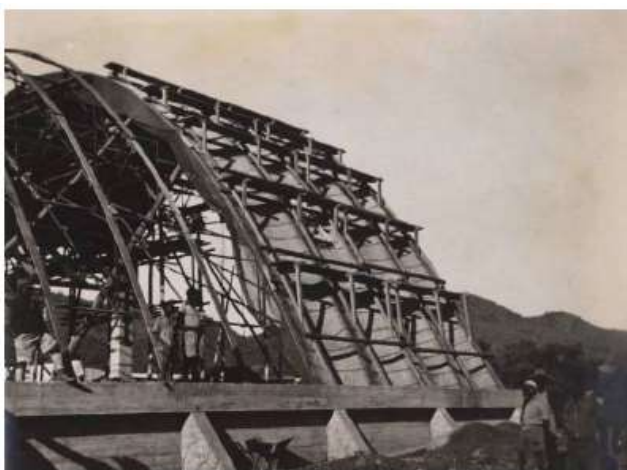
## Atsparumas per formą

Efektyvus apvalkalas daugiausia jėgas perduoda per membraną [17]. Nedidelio lenkimo jėgos išlaiko mažus įtempius, mažindamos medžiagų poreikį. Taigi apvalkalo struktūrinės savybės turi atitikti pagal savo formą, ypač pagal kreivumą. Betono takumas leidžia realizuoti norimas geometrines formas. Pirmą kartą tai panaudojo romėnai sukurdami monolitinius kupolinius apvalkalus, kurie stovėjo tūkstantmečius [18].

Šiuolaikinė technologinė pažanga ir skaitmeninės analizės gamybos sritis leido sukurti ir padaryti modernius betoninius apvalkalus patrauklesniais. Tačiau gamybos išlaidos vis tiek išlieka didelės [19]. Lankstūs klojiniai turi galimybę išspręsti šią pagrindinę statybos kaštų problemą supaprastinus statybos procesą. Tačiau korpuso ir membranų struktūras riboja fizikos dėsniai, nes jų dizainas yra pagrįstas tiesiogiai dėl jėgos, geometrijos ir medžiagos integravimo. Sumažinant lenkimo momentus ir šlyties jėgas optimizuojant medžiagų panaudojimą, tačiau kuriant tokią struktūrą reikia sukurti formą, kuri išlaikytu pusiausvyrą tarp formos ir medžiagų panaudojimo kiekio. [20]. Kadangi membranos ir armatūros tinklo struktūros atlaiko, formuojasi tik tempianti jėga plokštumoje [21], nors norint gauti stabilumą ir norint atlaikyti apkrovų kitimus, praktikoje reikalingas lenkimo standumo išdėstymas.

## Stogai ir skliautai

„Apvalkalai“ puikiai tinka kupolams ir stogo konstrukcijoms, kur aukštis ir laisvoji geometrija yra palyginti neribojama [22]. Naudojant audinius kabinant ant standžių arkų, kad būtų sukurti briaunoti vienpakopiai kupolai. Aštuntajame dešimtmetyje Kersavage'o ir Knott'o ir Nezo darbai paskatino suformuoti daugybę stogų iš audinių. „TSC Global“ [23]. Čia yra ištemptas lankstus armatūrinis tinklas aplink medinį rėmą ir padengtas betonu iki 10 mm storio. Įtempimas lanksčiame tinklelyje sukuria dvigubai išlenktą antiklastinę apvalkalo formą, kuri kartu su mažu savo svoriu pagerina konstrukcijos atsparumą žemės drebėjimui [24].



**26 pav.** Džeimso Wallerio pagamintas „Ctesiphon“ apvalkalas [24].

## Pneumatinės formos

Vienas iš pirmųjų pneumatinių klojinių pritaikymų buvo cilindrinų vamzdžių betono gamybos būdas. Nuo to laiko plačiai naudojami pneumatiniai klojiniai buvo ekonomiškai efektyvūs, vieno aukšto kupolo tipo namų statybai [25]. Tačiau Southas išrado kitą statybos metodą, kai betonas

purškiamas ant pripūstų pneumatinių klojinių. Priešingai nei jau aprašyti Neffo ir Heifetzo metodai, Southo metodu purškiama ne tik iš išorės, bet ir vidaus taip pat pridodant poliuretano sluoksnį, kuris sutvirtina klojinį prieš pilant betoną [26]. Šis metodas vis dar naudojamas ir šiandien [27]. Parodyta 27 paveiksle.



**27 pav.** Monolitinio kupolo korpuso namas [24].

## Klojiniai

Nors klojinių medžiagą galima naudoti neaustinėmis membranomis, austiems audiniams yra paprastai teikiama pirmenybė dėl jų prieinamumo, mažų kainų, didelio stiprumo ir teigiamo poveikio paviršių apdailai [28]. Norint, kad klojiniai būtų tvirti, reikia juos gerai įtempti, pageidautina kieta ir patvari medžiaga, kurią būtų galima panaudoti kelis kartus. Paprastai pageidautina vengti audinio raukšlių, susijusių su išmontavimu, estetikos ir pakartojamumo problemomis. Be to, gali būti sunku numatyti geometriją ir raukšlių susidarymą [29]. Yra reikšmingų išimčių, tokių kaip sąmoningas raukšlių išnaudojimas kuriant dizainą standiems „apvalkalams“ ir skliautams [30]. Raukšlės atsiranda dėl lanksčios medžiagos nesugebėjimo priglusti. Suspaudžiamas audinys gali būti iš anksto įtemptas, kad būtų užtikrintas įtempių tempimas ir tuo pačiu pašalinamos raukšlės. Patvirtinta, kad ypač tvirti audiniai, tokie kaip geotekstilė, yra populiarius medžiagų pasirinkimas. Naudojant lanksčius reikiamus klojinius svoris ir tūris gali būti žymiai sumažinti. Pavyzdžiui, jūrinė geotekstilė naudojama kuriant audinius.[31] Jos svoris yra  $0,23 \text{ kg/m}^2$ , palyginti su tipiškais 18 mm faneros klojiniais, viršijančiais  $10 \text{ kg/m}^2$  [32]. Todėl lanksčius klojinius galima lengvai supakuoti ir prireikus gabenti į vietą. Tai suteikia galimybę paruošti klojinius ne vietoje, sutrumpinant statybų laiką ir gerinant tvarkaraščių sudarymo lankstumą. Atvirkščiai, sąmoningus reikalavimus atitinkančių klojinių naudojimui yra naudojamos tokios medžiagos kaip spandeksas. Su šia medžiaga galima sukurti unikalias skulptūrines formas [23].



**28 pav.** lengvai gabenamas lankstus klojinys [24].

Istoriškai daugumai klojinių gamybai naudojamų audinių buvo pritaikyti iš kitos paskirties naudojamų audinių. Vis labiau paplitus audinių klojinių naudojimui buvo sukurtos specializuotos medžiagos, kurias būtų galima austi taip kad būtų pritaikytas standumas arba poringumo charakteristikos. Pavyzdžiui nuolat veikiančių klojinių idėja taip pat buvo ištirta, kai klojinių medžiaga (paprastai turinti gerą tempimo savybę) veikia kaip armatūra po betono sukietėjimo. Taip pat buvo pasiūlyti trisluoksniai audiniai, kurie turi daugiasluoksnę atvirą struktūrą [23, 33]. Lankstūs klojiniai gali apimti struktūras, kurios nėra dvimatės. Lynus, lynų tinklus galima derinti su audiniais, kad būtų sukurtos tolesnės formos kontrolės galimybės [34]. Taip pat galima naudoti sujungtus standžius segmentus, suteikiant dizaineriui kontroliuojamą lankstumo kryptį [23, 35]. Grotelės buvo išbandytos kaip betoniniai klojiniai kartu su audiniu. Tai suteikia lankstumo sukurti dvigubai išlenktas formas, tačiau taip pat užtikrinamas pakankamas standumas, kad būtų išlaikomas nesukietėjęs betonas [23, 36].

## Betonas

Iš esmės klojinių medžiagos pasirinkimas neturi įtakos betono naudojimo reikalavimams. Tačiau betono medžiagos savybės keičiasi naudojant pralaidžią klojinių medžiagą, tokią kaip austas audinys. Išleidžiant vandenį ir orą per klojinius yra sukuriama aukštos kokybės ir lygaus paviršiaus sluoksnis, turintis daug cemento. Kaip galima pastebėti, klojinių medžiagos tekstūra atsispaudžia betono paviršiuje 29 pav. Tai ne tik sukuria patrauklią betono dangą, bet pagerina stiprumą ir sumažina poringumą, todėl 50% sumažėja karbonizacijos ir chlorido įsiskverbimas [28]. Tas pats efektas pasiekiamas naudojant kontroliuojamo pralaidumo klojinius, įtraukiant pralaidų pamušalą į standžią formą [28].



**29 pav.** Užbaigtas betono paviršius be defektų [24].

Betono mišiniai, liejami kaip ploni sluoksniai turi būti tinkamo užpildo frakcijos, srauto ir konsistencijos, kad būtų užtikrintas jų tolygus pasiskirstymas ant paviršiaus. Betoną galima pilti rankiniu būdu ir glaistyti, arba purkšti. Purškiamas betonas naudojamas ten, kur dideliu greičiu yra tiekiamas cementas, vanduo ir smulkus užpildas ant paviršiaus [30, 37], leidžiant greičiau suformuoti didelį plotą. Purškiamas betonas užtikrina reikiamą sutankinimą, o klojiniai taip pat turi būti pakankamai standūs, kad jų nedeformuotų. Galima naudoti betono rišimosi priedus, kad kiekvienas iš eilės užpurkštas sluoksnis galėtų save kuo greičiau išlaikyti [38].

## Stiprinimas

Dėl lanksčių klojinių pobūdžio susidaro struktūros, turinčios neplaninių ir netaisyklingų formų. Tai yra optimalių konstrukcijų kūrimo pagrindas, tačiau armatūra taip pat turi būti formuojama taip, kad ji suteiktų tvirtumo ten, kur reikia. Įprastinė plieno armatūra gali būti dengiama tik pagal formas kur yra maži išlinkimai, o strypai yra pakankamai ploni ir lankstūs. Kur reikalingi storesni strypai ar reikalingi reikšmingi išlinkimai, plieninius armatūros strypus galima sulenkti pagal reikiama formą [39]. Didelės apimtys gali sukelti dideles darbo sąnaudas, todėl gali būti sunku pasiekti reikiamus rezultatus greitu metu. Todėl buvo pradėta naudoti keletas lanksčių alternatyvių sustiprinimo strategijų suformuotoms struktūroms. Konstrukciją galima supaprastinti, jei armavimo medžiaga yra pakankamai lanksti. Pavyzdžiui naudojamas pluoštas armuotas polimero (FRP) armatūra susideda iš didelio tempimo stiprumo elastingų pluoštų (dažniausiai anglies, stiklo) arba bazalto) kartu su polimero matrica. Polimerinė armatūra yra mažiau tanki nei plieno armatūra ( $1,6 \text{ g/cm}^3$  anglies, palyginti su  $7,8 \text{ g/m}^3$  plienui) turi aukštą tempimo jėgą, ir yra atspari korozijai [40]. Parduodami FRP armatūros strypai savo forma yra panašūs į įprastus plieninius strypus, ir buvo naudojami kintamo profilio audinių suformuotose sijose [41].

### 1.5. Torkretavimas

Torkretavimas, tai betono užpurškimas ant įvairių paviršių panaudojant suslėgtą orą. Kadangi betonas ant paviršių purškiamas su didele jėga, jam nereikalingas joks papildomas sutankinimas. Betono purškimo metu dalis medžiagos atšoka, pirmiausia atšoka stambesni užpildai paviršiuje palikdami smulkausias daleles, suformuojančias tam tikrą sukibimo „tiltą“. Vėliau stambesnės užpildų dalelės į jį įsminga ir tuo pačiu sutankina, taip išgaunama tanki vientisa betono struktūra. Šiuo būdu išgautas monolitinis elementas vertinamas kaip gelžbetonio konstrukcija, kurią galima statiškai apkrauti. Torkretbetonis armatūrai suteikia šarminę aplinką, apsaugo nuo žalingo aplinkos poveikio ir pasižymi nepralaidumu vandeniui. Lietuvoje šis metodas dar nėra labai populiarius ir maišomas su mechanizuotu tinkavimu. Rotacinių torkretavimo mašinų pagalba galima faktiškai suformuoti neribojančio storio betono sluoksnius. Torkretbetonio užpildui naudojamas stambus iki 8mm užpildas. Torkretavimo įrenginiuose vanduo į skiedinį įmaišomas tik purškimo antgaliuose, tai leidžia užtikrinti mažesnę vandens ir cemento santykį, suteikia galimybę panaudoti specialius priedus pagreitinančius pradinį betono rišimąsi. Torkretbetonis gali būti pigmentuojamas įvairiomis spalvomis, sustiprinamas plieno fibromis, sutankinamas kristilizaciniais priedais. Gali būti varijuojama jo stiprumo, atsparumo žalingiems aplinkos poveikiams savybėmis. Lietuvoje šis metodas sėkmingai buvo pritaikytas rekonstruojant delfinariumą, jūrų muziejų, Kauno zoologijos sodo ruonių baseiną, Kauno hidroelektrinės bangolaužį, įrengiant šiuolaikinių verslo centrų požeminius parkingus.

Torkretavimas yra atliekamas dviem būdais: šlapiuoju ir sausuoju. Torkretuojant šlapiuoju būdu betonas yra tiesiai atvežamas iš betono mazgo ir aukštu slėgiu paduodamas į antgalį, kuris išpurškia betoną ant norimo paviršiaus. Sausuoju būdu atskiros torkretbetonio medžiagos atskirai paduodamos į purškimo antgalį, kuriame susimaišo ir susijungia su vandeniu. Tokiu būdu medžiaga žymiai geriau sukimba su paviršiumi, turi didesnę stiprumą ir tankį. Naudojamus mišinius torkretavimo įranga leidžia perduoti dideliais kiekiais ir atstumais.

Šios technologijos pagalba gali būti sukurti neįtikėtinos formos ir įvairiausios struktūros architektūriniai statiniai, kurie sunkiai įgyvendinami įprastų klojinių pagalba (arkos, kupolai). Taip pat naudojant šią technologiją galima sustiprinti ir atnaujinti tiltus, sienas, tunelius ir įvairius betoninius paviršius. Torkretavimas padeda išlaikyti ir išsaugoti statinius nepriekaištingos būklės daugelį metų juos pastoviai atnaujinant. Pati torkretavimo technologija yra labai paprasta ir pigi lyginant su kitomis technologijomis, eksploatacijos, įrengimo, laiko ir kainos atžvilgiu.

Torkretavimo mišiniai dažniausiai gaminami iš rišamosios medžiagos cemento, smėlio, žvirgždo ir specialių priedų, kurie pagreitina torkretbetonio rišimosi laiką ir įgaunamas savybes. Naudojant specialius priedus ir keičiant sudėtį galima sukurti vandeniui atsparų ir nelaidų betoną iš kurio gaminamos vandeniui nelaidžios konstrukcijos, nereikalaujančios papildomos hidroizoliacijos. Tokį betoną galima panaudoti hidrotechninių ir požeminių pastatų statybai bei remontui. Taip pat yra bandoma sukurti tokį torkretbetonį, kuris turėtų geras termoizoliacines savybes ir būtų gaminamas iš antrinių žaliavų. Tai prisidėtų prie gamtos išteklių tausojimo, antrinių žaliavų perdirbimo ir jų panaudojimo.

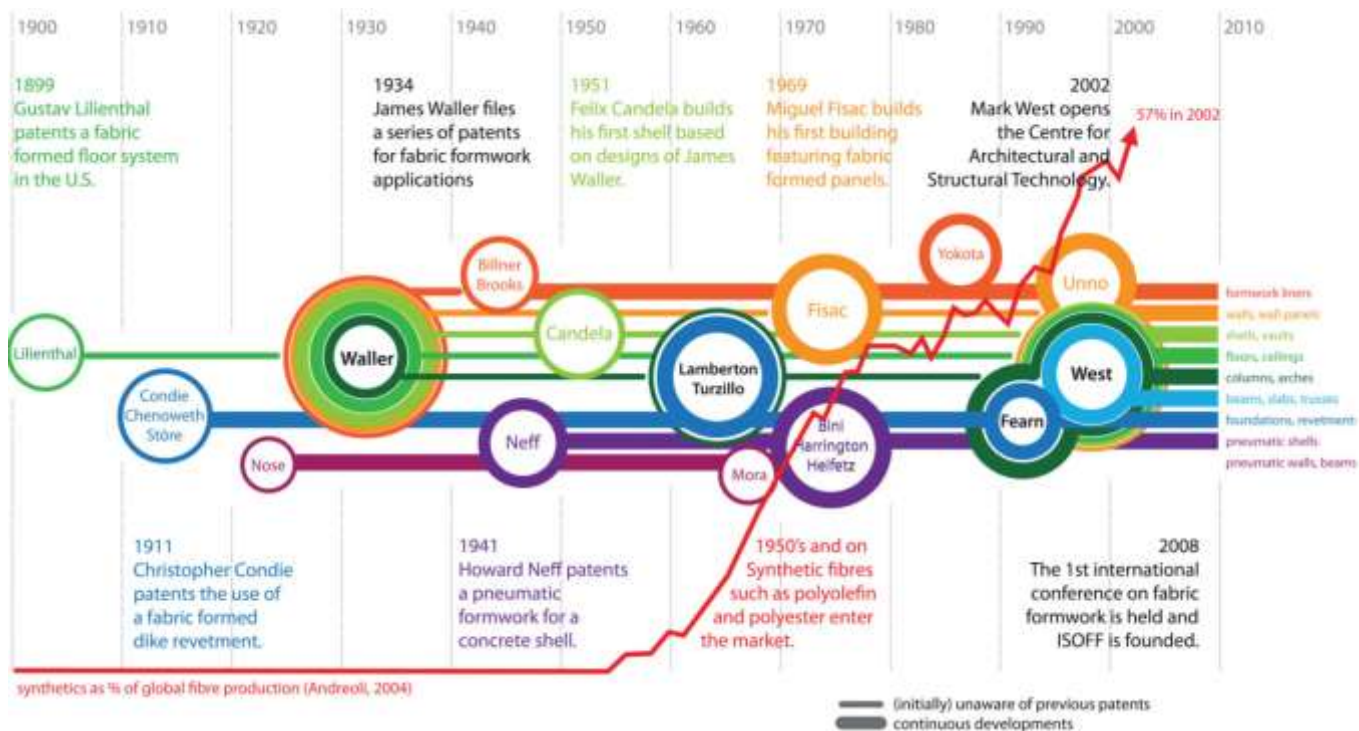
Torkretavimo technologijos pritaikymas statyboje:

- Monolitinių kupolų formavimui; Ovalių formų formavimui;
- Prieplaukų, užtvankų, tiltų remontui;
- Akmenims, mūriui sutvirtinti;
- Sunkiai pasiekiamų konstrukcijų atnaujinimui ir remontui;
- Fasadų, stogų, tunelių, tiltų, balkonų priežiūrai;
- Įvairių betoninių paviršių priežiūrai;
- Bendriesiems betoninių paviršių priežiūros ir remonto darbams;

## **1.6. Betoninių kupolų formavimo idėjų raida**

Audinių klojiniai yra pastato technologija, apimanti kaip medžiagos naudojamos suformuoti membranas betoninėms formoms.

Formavimo idėjų raida parodo, kaip metodai vystėsi istoriškai per idėjų prizmę (30 pav.). Kiekviena spalva reiškia tam tikrą taikymo būdą ir kiekvienas apskritimas reiškia pavienius ar kelis patentus, projektus ar leidinius panaudotus šiai idėjai vystyti. Linijos rodo tęsiamą komercinį ir akademinį susidomėjimą, arba sąsają su kiekvienu išradėju remiantis ankstesniais patentais arba išradimais (stora linija) [45].



30 pav. Audinių klojinių ir jų chronologinė schema. Andreoli, 2004 [45].

## 1.7. Literatūros apžvalgos santrauka

Monolitiniai betono kupolai buvo pradėti statyti dvidešimto amžiaus pradžioje. Iš pradžių kupolams statyti buvo naudojami paprasti mediniai klojiniai ir sistemos. Bėgant laikui, didėjant klojinių įrengimo sąnaudoms, pradėta tobulinti klojinių sistemas, ko pasekoje atsirado naujų skirtingų klojinių sistemų (strypinės/tinklelinės, pneumatinės, anglies pluošto, kėlimo).

Tobulėjant monolitinei statybai atsirado betono purškimo technologija, kuri leidžia statyti įvairius architektūrinius ir konstrukcinius statinius toretuojant iš vidinės ir išorinės pusės. Tam įtakos turėjo nauji pradininkai, sistemų tobulintojai, inžineriniai išradimai, atsirandančios skaitmeninės ir informacinės technologijos, padedančios suprojektuoti, išanalizuoti ir apskaičiuoti įvairias konstrukcijas.

Norit pagreitinti statybą ir sumažinti statybos kaštus buvo tobulinamos monolitinių klojinių sistemos pritaikant skaitmeninį projektavimą, gerinama statybinių medžiagų kokybė, mažinami matmenys elementuose ir optimizuojami konstrukciniai sprendimai. Tačiau iki šiandieninių laikų yra išlikusi problema, kad statybai reikalinga gerai kvalifikuota ir apmokyta darbo jėga. Šiuo metu Lietuvoje yra žinomos dvi torkretavimu užsiimančios kompanijos.

Monolitiniai kupolai gali būti suprojektuoti įvairaus dydžio, formų ir skirtingų struktūrų paviršiais. Monolitinius kupolus galima statyti bet kokioje geografinėje aplinkoje net ir po vandeniu. Jie atsparūs įvairioms gamtos stichijoms ir nereikalaujantys pastovios techninės priežiūros. Taip pat jie gali būti įvairios paskirties, nuo gyvenamųjų pastatų iki sandėlių, pastogių, aikštelių, bažnyčių ir architektūrinių statinių.

Prabėgus daugiau nei vienam amžiui monolitiniai betoniniai kupolai vis dar statomi, nors šiandieniniame pasaulyje populiarumas sumažėjęs. Nepaisant susidomėjimo sumažėjimui toliau yra tobulinamos statybos technologijos, klojinių sistemos ir bandoma kuo efektyviau ir ekonomiškiau pastatyti šiuos statinius ir pritraukti visuomenės susidomėjimą.



## 2. Praktikoje taikomų monolitinio betono kupolų statybos technologijų privalumai ir trūkumai

1 lentelė. kupolų statybos technologijų privalumai ir trūkumai

Privalumai:	Trūkumai:
Pagrindiniai privalumai ir trūkumai	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• pigesnė pastato konstrukcija;</li> <li>• sparti statyba;</li> <li>• pastatų ir patalpų įvairūs projektavimo variantai;</li> <li>• aukštas konstrukcijų standumas;</li> <li>• patikimumas;</li> <li>• atsparumas ugniai;</li> <li>• pastato ilgaamžiškumas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sudėtingas klojinių surinkimas;</li> <li>• reikalinga gerai kvalifikuota darbo jėga;</li> <li>• atsirandančios apkrovos betonavimo metu, kurios įtakoja galutinės konstrukcijos storio nukrypimus;</li> </ul>
<b>Neffo pneumatinių klojinių sistema</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ekonomiškai efektyvi statyba;</li> <li>• galima, bet kokia forma;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kupolo apačioje atsiranda įtrūkimai;</li> </ul>
<b>Heifetz tobulinama Neff sistemą</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• naudoja aukštesnį slėgį (4,0–10,0 kN / m<sup>2</sup>) purškiant betoną;</li> <li>• išvengiama deformacijų;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• brangi įranga;</li> <li>• kvalifikuota darbo jėga;</li> </ul>
<b>MacCracken savarankiško palaikymo metodą kupoliniam stogui pagaminti</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• klojiniai pagaminti iš lankstaus, šildomo plastiko medžiagos yra pigūs;</li> <li>• struktūra lengvai grūdinama karščiu;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reta medžiaga;</li> <li>• kvalifikuota darbo jėga;</li> </ul>
<b>Anglies pluošto statybos kupolų technologija</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• lengva konstrukcija;</li> <li>• moderni konstrukcija;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• įrengimui reikalingas robotas su specialia įranga;</li> <li>• reikalingos šiuolaikinės technologijos skaitmeniniam projektavimui ir programavimui;</li> </ul>
<b>Monolitinio audinio surinkimo technologija</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• greita statyba;</li> <li>• lengvas transportavimas;</li> <li>• lengvas surinkimas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• naudojama mažesniems statiniams;</li> <li>• žemi statinio reikalavimai;</li> </ul>
<b>Torkretuojant iš vidinės statinio pusės naudojant poliuretano putas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• stipri konstrukcija;</li> <li>• atspari gamtos stichijoms;</li> <li>• greita statyba;</li> <li>• įvairi forma;</li> <li>• efektyviai naudoja šilumą;</li> <li>• hermetiška, tinka laikyti medžiagas, kurioms reikalinga nuolatinė drėgmė;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• degdamos poliuretano putos išskiria toksiškus dūmus;</li> <li>• vinilo membrana degdama išskiria kenksmingas medžiagas;</li> <li>• lengvai pažeidžiama iš išorės;</li> <li>• pažeidus vinilo membraną drėgmė patenka į termoizoliacinį sluoksnį;</li> <li>• naudojant gyvenamajai paskirčiai reikalinga mechaninė ventiliacija;</li> <li>• apsaugoti konstrukcijai naudojamas aliuminis, kuris padidina laiko ir piniginius kaštus;</li> </ul>
<b>Kupolinių pastatų atsparumas per formą</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• apvalkalas daugiausia jėgas perduoda per membraną;</li> <li>• nedidelio lenkimo jėgos išlaiko mažus įtempius, mažindamos medžiagų poreikį;</li> <li>• betono takumas leidžia realizuoti norimas geometrines formas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• apvalkalo struktūrinės savybės turi atitikti pagal savo formą, ypač pagal kreivumą;</li> </ul>

## 2.1. Praktikoje taikomos monolitinio betono kupolų statybos technologijos išskiriant skirtingas klojinių sistemas

2 lentelė. kupolų statybos technologijos išskiriant skirtingas klojinių sistemas

<b>Oro erdvės pneumatiniai klojiniai</b>	
<u>Pritaikymas</u>	<u>Išskylančios problemos</u>
naudojami dviem skirtingais tikslais: statyti monolitiniam kupolams arba specialioje paskirtyje suformuoti tuščiavidurę erdvę	ypatingas dėmesys turi būti skiriamas tvirtinant pneumatinę konstrukciją tinkamoje padėtyje ir užtikrinti jų stabilumą kilimo metu.
klojiniai naudojami cilindro formai sukurti, membraną galima pašalinti ir pakartotinai panaudoti	jei visa pneumatinė konstrukcija yra visiškai uždengta betonu, reikia atsižvelgti į tai, kad membrana lieka įterpta į struktūrą.
naudojami lengvų konstrukcijų elementai	
<b>Klasikiniai pneumatiniai klojiniai</b>	
tinkami plonomis korpusinėms konstrukcijoms.	tempimo jėga membranoje visada tiesiogiai priklauso nuo vidinių pneumatinių klojinių slėgio ir kreivio spindulio
aktyviai formuojama pneumatinių klojinių struktūra (tai reiškia, kad pneumatinis klojinys turi baigtos struktūros formą.)	neigiamų deformacijų įtaka
naudojant vienos kameros sistemą, oro slėgis bet kuriame taške yra vienodas ir veikia statmenai membranai.	
formą galima įtakoti naudojant megztas arba klijuotas pneumatinę konstrukciją, pritaikytą membranų juosteles arba įtempiant membraną su įvyniojimais ar virvėmis.	
pneumatinės struktūros paprastai turi mažą kreivio spindulį ir nereikia atlaikyti didelių apkrovų.	
daugeliu atvejų leidžiamos didelės deformacijos.	
naudojant klasikinius pneumatinius klojinius, galima sukurti daugybę skirtingų formų.	
<b>Kėlimo pneumatiniai klojiniai</b>	
pasižymi nedideliu svoriu, ir maža įsigijimo kaina.	jei klojiniai nukrypsta nuo planuojamos formos, galutinės formos struktūra taip pat nukrypsta
galima pakelti dideles apkrovas.	transformacijos proceso metu minkšta medžiaga turi sugebėti absorbuoti jėgas
reikalingas nedidelis slėgis formai palaikyti.	betono rišimosi laikas paviršiuje gali sukelti nukrypimą nuo norimos figūros. (tai gali būti problema, nes gali atsirasti dideli įtempiai.)
<b>Grūdinto betono pneumatinis formavimas</b>	
plokščia grūdinta betono plokštė yra paverčiama į dvigubai išlenktus apvalkalus	papildomai tarp betoninių elementų tvirtinami pneumatiniai pleištai, kurie apsaugo balioną pleišto formos vietose kilimo metu.
transformacijos proceso metu plokštė pakeliama ir iškraipoma - pripučiant pneumatinį kėlimo klojinį.	plieniniai lynai arba stiklo pluoštu sustiprinti plastikiniai strypai užtikrina, kad betoniniai elementai atlaikytų didelius įtempius.
pneumatiniai klojiniai naudojami kėlimui yra tokio pat skersmens kaip betoninis apvalkalas.	
šis naujas metodas gali būti naudojamas daugybei skirtingų dvigubai išlenktų formų paviršiams.	

<b>Aktyvaus lenkimo kėlimo pneumatiniai klojiniai</b>	
šie pneumatiniai klojiniai neturi įtakos galutinei formai.	jei plokščia plokštė gaminama tiksliai ir visi formos netikslumai yra uždaromi, tada gauta galutinė struktūra gali būti pastatyta tik su nedideliais nukrypimais nuo geometrinės optimalios formos.
Betono savybės. Pirmiausia plokščia plokštė liejama naudojant įprastą betoną	galutinė forma gaunama kaip pleišto formos tarpai uždaromi ir užsandarinami.
sukietėjusi plokštė yra transformuojama į dvigubai išlenktą apvalkalą.	armatūra turi didžiausią poveikį
leidžia naudoti patikrintą gaminimo techniką ir užtikrina aukštą betono kokybę, taip pat tikslus plokštės matmenis	
<b>Tekstiliniai klojiniai</b>	
austiems audiniams yra paprastai teikiama pirmenybė dėl jų prieinamumo, mažų kainų, didelio stiprumo ir teigiamo poveikio paviršių apdailai	norint, kad klojiniai būtų tvirti, reikia juos gerai įtempti, pageidautina kieta ir patvari medžiaga, kurią būtų galima panaudoti kelis kartus
kaip sąmoningas raukšlių išnaudojimas kuriant dizainą standiems „apvalkalams“ ir skliautams	paprastai pageidautina vengti audinio raukšlių, susijusių su išmontavimo, estetikos ir pakartojamumo problemomis.
naudojant lanksčius reikiamus klojinius svoris ir tūris gali būti žymiai sumažinti	sunku numatyti geometriją ir raukšlių susidarymą
jūrinė geotekstilė naudojama kuriant audinius,. [31] jos svoris yra 0,23 kg/m <sup>2</sup> , palyginti su tipiškais 18 mm faneros klojiniais, viršijančiais 10 kg / m <sup>2</sup>	
suteikia galimybę paruošti klojinius ne vietoje, sutrumpinant statybų laiką ir gerinant tvarkaraščių sudarymo lankstumą	
klojinių naudojimui yra naudojamos tokios medžiagos kaip spandeksas. Su šia medžiaga galima sukurti unikalias skulptūrinės formas	

## 2.2. Monolitinių kupolų statymas torkretuojant vidinę kupolo pusę, torkretuojant išorinę kupolo pusę, torkretavimui naudojant skirtingas medžiagas

3 lentelė. lyginamos alternatyvos torkretuojant vidinę kupolo pusę, torkretuojant išorinę kupolo pusę

Torkretuojant išorinę kupolo pusę	Torkretuojant vidinę kupolo pusę
<ul style="list-style-type: none"> <li>paviršiaus formos dažniausiai naudojamos apvalkalo struktūroms formuoti;</li> <li>armatūra sumontuota membranos išorėje;</li> <li>betonas purškiamas iš išorės;</li> <li>paprastai tik vienas formavimas reikalingas paviršiui, ant kurio dedamas betonas;</li> <li>jei paviršius yra pasviręs, betonas turi būti neslankus, kad būtų išvengta tekėjimo;</li> <li>geometriją nurodo santykinai panaudotas jėgas ir vidinius įtempius klojinyje;</li> <li>liejant betoninius apvalkalus, klojiniai yra po betonu mechanškai įtempti palaikomo oro slėgiu (pneumatinių klojinių atveju) arba hidraulinių pavarų (adaptivaus klojinių atveju);</li> <li>efektyvus apvalkalas daugiausia jėgas perduoda per membraną;</li> <li>betono takumas leidžia realizuoti norimas geometrines formas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pripūsta membrana yra atspari vandeniui, paprastai stabilizuota UV spinduliais, tvirtai pritvirtinta prie žiedo pagrindo;</li> <li>poliuretano izoliacija purškama ant kupolo vidinės pusės;</li> <li>armatūros strypai įspaudžiami į poliuretaną, paruoštą paskutiniam etapui;</li> <li>ant armatūros ir poliuretano purškama betono forma, vadinama šratbetoniu, ir tai sudaro konstrukcinį kupolo elementą;</li> <li>betonas rišimosi laikas privalo būti greitas, kitu atveju pradės kristi arba slinkti žemyn;</li> <li>betono užpildas turi būti smulkios ir vidutinio dydžio frakcijos, kad išvengtų kuo mažiau atšokimo nuo paviršiaus;</li> <li>torkretuojama plonais sluoksniais kol pasiekiamas projektinis storis;</li> <li>šilta ir efektyviai naudoja šilumą;</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• lankstūs klojiniai turi galimybę išspręsti šią pagrindinę statybos kaštų problemą supaprastinus statybos procesą;</li> <li>• dėl lanksčių klojinių pobūdžio susidaro struktūros, turinčios neplaninių ir netaisyklingų formų;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• išlaikomas hermetiškumas;</li> <li>• apsaugoti iš išorės naudojama skarda;</li> </ul>
---	--

#### **Panašumai**

- Betono mišiniai, liejami kaip ploni sluoksniai turi būti tinkamo užpildo frakcijos, srauto ir konsistencijos, kad būtų užtikrintas jų tolygus pasiskirstymas ant paviršiaus. Betoną galima glaistyti arba purkšti;
- Purškiamas betono naudojamas ten, kur dideliu greičiu yra tiekiamas cementas, vanduo ir smulkus užpildas ant paviršiaus [30, 37], leidžiant greičiau suformuoti didelį plotą;
- Purškiamas betonas užtikrina reikiamą sutankinimą, o klojiniai taip pat turi būti pakankamai standūs, kad jų nedeformuotų;
- Galima naudoti betono rišimosi priedus, kad kiekvienas iš eilės užpurkštas sluoksnis galėtų save kuo greičiau išlaikyti;
- Armatūra taip pat turi būti formuojama taip, kad ji suteiktų tvirtumo ten, kur reikia. Įprastinė plieno armatūra gali būti dengiama tik pagal formas kur yra maži išlinkimai, o strypai yra pakankamai ploni ir lankstūs;
- Kur reikalingi storesni strypai ar reikalingi reikšmingi išlinkimai, plieninius armatūros strypus galima sulenkti pagal reikiamą formą [39];
- Didelės apimtys gali sukelti dideles darbo sąnaudas, todėl gali būti sunku pasiekti reikiamus rezultatus greitu metu.

### 3. Tyrimų metodika

#### 3.1. Torkretavimo įranga

Siekiant įvertinti torkretavimo technologijos įtaką betono bandinių fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei betono ilgaamžiškumui, lyginant betono mišinio ruošimo ceche bei statybos aikštelėje suformuotų bandinių savybes, pirmiausia reikėjo suformuoti betono bandinius mišinio ruošimo ceche ir statybos aikštelėje, taikant torkretavimo technologiją.

Torkretavimo įranga naudojama suformuoti betoninius kupolus, stogus, kupolines konstrukcijas, sienas. Su torkretavimo įranga galima padengti surenkamų gelžbetoninių ir betoninių gaminių paviršius, tokius kaip: perdangos plokštes, kolonas, sijas ir kitus nelygius paviršius. Toretuojami paviršiai privalo būti švarūs, nuvalyti, pašalintos visos birios medžiagos. Betoniniai ir porėti paviršiai privalo būti sudrėkinti. Torkretavimas atliekamas purškiant betono mišinį ant paviršiaus arba į formą. Betono mišinys sudarytas iš portlandcemenčio ir užpildo, kurio frakcija dažniausiai būna iki 10mm smulkiųjų ir stambiųjų dalelių. Tuomet torkretavimo įrenginyje sumaišomas portlandcementis, užpildas, vanduo ir suslėgtu oru išpurškiamas ant torkretuojamo paviršiaus. Toretuojama nuo 25mm iki 75mm storio sluoksniai kas 10 minučių. Šis mišinys turi turėti rišimąsi greitinančių priedų, kad spėtų išlaikyti sekantį sluoksnį. Naudojant torkretavimo būdą nėra reikalingas papildomas sutankinimas, kadangi purškiant aukštu slėgiu dalelės atsitrenkdamos į paviršių pačios sutankina betoną.

Šlapiojo torkretavimo technologija naudota formuojant bandinius statybos aikštelėje. Su šia įranga suformuoti apie 1000×1000×100 mm bandiniai buvo palikti kietėti 28 paras lauko sąlygomis, kaip parodyta 31 paveiksle. Vėliau iš minėtų 1000×1000 mm dydžio bandinių buvo išpjauti 100×100×100 mm bei 100×100×150 mm matmenų bandiniai. Šie bandiniai naudoti nustatant betono fizikines ir mechanines savybes bei betono ilgaamžiškumą.



31 pav. Statybos aikštelėje suformuoti bandiniai



**32 pav.** Rišimasi greitinančios įmaišos padavimo į tutą siurblys



**33 pav.** Betono mišinio purkštuvus – su hidrauliniu valdymo mechanizmu



**34 pav.** Oro kompresorius



**35 pav.** Betono mišinio padavimo į tūtą siurblys

Torkretuojant rankiniu būdu arba savaeige mašina torkretbetonis yra išpurškiamas sukamaisiais judesiais, kaip būtų piešiamas aštuonetas arba begalybės ženklas. Atliekant šį judesį dalelės geriau prikimba ir tolygiau pasiskirsto ant torkretuojamo paviršiaus, ko pasekoje yra sumažinamos atšokusio užpildo dalelių sąnaudos ir gaunamas lygesnis paviršius. Pavaizduota 36, 37 paveiksluose.



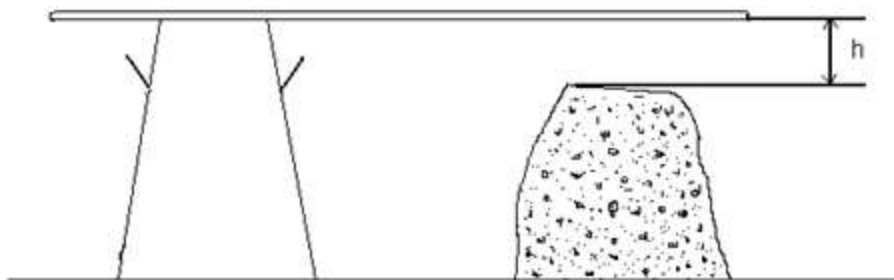
**36 pav.** „Šlapiojo tokretavimo būdas“, tūtoje sumaišomas betono mišinys su rišimąsi greitinančia įmaiša



**37 pav. a) ir b)** Torkretavimo įranga sumontuota ant savaeigės statybos mašinos

### 3.2. Betono mišinio technologinių savybių nustatymas

Šviežio betono mišinio slankumas nustatytas pagal standarto LST EN 12350-2 reikalavimus. Bandymo metu naudojama įranga: forma bandiniui suformuoti (kūgio formos); tankinimo strypas ( $\varnothing=16\pm 1\text{ mm}$ ;  $l=600\pm 5\text{ mm}$ ); piltuvas (nebūtinai); liniuotė; pagrindo plokštė/paviršius; permaišymo indas; kastuvėlis; drėgnas audinys; mentelė; chronometras arba laikrodis. Sudrėkinama kūginė forma ir pagrindo plokštė. Forma pastatoma ant horizontalios pagrindo plokštės/paviršiaus. Formą pildant, ji prie pagrindo plokštės/paviršiaus pritvirtinama arba prispaudžiama, abiem kojomis primynus formos plokšteles. Forma užpildoma trimis sluoksniais, kad kiekvieno storis po sutankinimo būtų apytiksliai vienas trečdalis formos aukščio. Kiekvienas sluoksnis tankinamas 25 strypo dūriais, kurie kiekviename sluoksnio plote turi būti paskirstyti tolygiai. Apatinis sluoksnis badomas šiek tiek pakreiptais dūriais, kurių apie pusė išdėstoma spirale nuo krašto į centrą. Antras ir viršutinis sluoksniai tankinami per kiekvieno jų storį dūriais, smeigiant tik iki sutankintojo sluoksnio. I viršutinį sluoksnį betono mišinio iki jo tankinimo dedama su pertekliumi virš formos. Jei tankinant viršutinis betono mišinio sluoksnis sukrenta žemiau viršutinio formos krašto, reikia dar įdėti betono mišinio, kad perteklius virš formos visada būtų išlaikytas. Sutankinus viršutinį sluoksnį, betono mišinio paviršius sulyginamas pjaunamaisiais ir voluojamaisiais tankinimo strypo judesiais. Neužbertas betono mišinys nuvalomas nuo pagrindo plokštės/paviršiaus. Forma nuo betono mišinio bandinio nutraukiama atsargiai ją keliant vertikalia kryptimi. Betono mišinio bandinio, nutraukus nuo jo kūginę formą, suslūgimo dydis yra betono mišinio konsistencijos rodiklis, matuojamas milimetrais.



3.2.1 pav. Betono mišinio slankumo matavimas

Šviežio betono mišinio tankis nustatytas pagal standarto LST EN 12350-6 reikalavimus. Šiame bandyme naudojamos priemonės: cilindrinis indas, vibravimo stalas, mentelė, svarstyklės. Bandymo metu betono mišinys mentele sudedamas į indą. Betono mišinys tuoj pat po indo užpildymo visiškai sutankinamas taip, kad mišinys neišsisluoksniuotų ir neatsiskirtų vanduo. Sutankinamas ant vibravimo stalo. Sutankintas mišinys sveriamas. Šviežio betono mišinio tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_{\text{mišinio}} = \frac{m_{\text{užpild.indo}} - m_{\text{tuš.indo}}}{V} \cdot 100\% = 2,431 \text{ kg/m}^3 \quad (3.2.1)$$

čia:  $\rho_{\text{mišinio}}$  – betono mišinio tankis;  $m_{\text{užpild.indo}}$  – užpildyto indo masė;  $m_{\text{tuš.indo}}$  – tuščio indo masė;  $V$  – indo tūris.



### 3.3. Bandinių formavimas ir kietinimas

Betono bandiniai  $100 \times 100 \times 100$  mm ir  $150 \times 150 \times 150$  mm matmenų buvo formuojami betono mišinio ruošimo ceche, esančiu adresu Raudondvario pl. 157, Kaunas 47171. Betono mišinio sudėties gamintojas neatskleidė. Fizikinių ir mechaninių savybių nustatymui betono bandiniai buvo formuojami plastikinėse  $150 \times 150 \times 150$  mm ir metalinėse  $100 \times 100 \times 100$  mm matmenų formose. Betono mišinys formose sutankintas naudojant vibracinį stalą. Bandinių formavimas vyko keliais etapais: pirmojo etapo metu formos mišiniu buvo užpildytos iki pusės savo tūrio, antrojo etapo metu – užpildytas visas formos tūris. Bandinių formavimo metu betono mišinio tankinimo procesas vyko keliais etapais: pirmojo etapo metu pradėjus tankinti betono mišinį ant vibracinio stalo šis laikinai suskystėjo, suslūgo ir nusėdo užpildydamas visą formos tūrį; antrojo etapo metu buvo pašalintas mišinyje susidaręs oras. Pirmasis mišinio tankinimo etapas truko nuo 3 iki 5 sekundžių, antrasis – nuo 7 iki 15 s.



38 pav. Betono mišinio ruošimo ceche suformuoti bandiniai



39 pav. Bandiniai palikti kietėti vandenyje

### 3.4. Betono bandinių fizikinių ir mechaninių savybių nustatymas

Betono bandinių tankis nustatytas remiantis standarte LST EN 12390-7 keliamais reikalavimais. Betono bandinių tūris apskaičiuojamas iš bandinių matavimo duomenų kubiniais metrais, apvalinant iki keturių reikšminių skaitmenų. Tikslus gautų bandinių tūris buvo nustatomas matuojant slankmačiu.

Tūris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V=a \cdot b \cdot h; \quad (3.4.1)$$

čia:  $a$ ,  $b$  – kraštinių ilgiai,  $h$  – bandinio aukštis.

Bandinių tankis apskaičiuojamas naudojant bandinio masę ir tūrį pagal formulę:

$$\rho=m/v; \quad (3.4.2)$$

čia:  $\rho$  – bandinių tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $m$  – bandinio masė bandymo sąlygomis,  $\text{kg}$ ;  $v$  – bandinio tūris,  $\text{m}^3$ .

Betono gniuždomasis stipris nustatomas remiantis standarte LST EN 12390-3 keliamais reikalavimais. Bandiniai gniuždomi iki suirimo gniuždymo bandymo mašina, atitinkančia LST EN 12390-4. Užrašoma didžiausia bandinio atlaikoma apkrova ir apskaičiuojamas betono stipris gniuždant. Kubiniai bandiniai padedami taip, kad apkrova veiktų statmenai formavimo kryptčiai. Bandinio centras turi sutapti su apatinės plokštės centru  $\pm 1\%$  nurodyto kubo kraštinės tikslumu. Parenkamas pastovus apkrovos didinimo nuo  $0,2 \text{ MPa/s}$  ( $\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ) iki  $1,0 \text{ MPa/s}$  ( $\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ) greitis. Apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir nepertraukiamai didinama parinktu pastoviu  $\pm 10\%$  greičiu tol, kol toliau nedidėja. Užrašoma didžiausia parodyta apkrova.

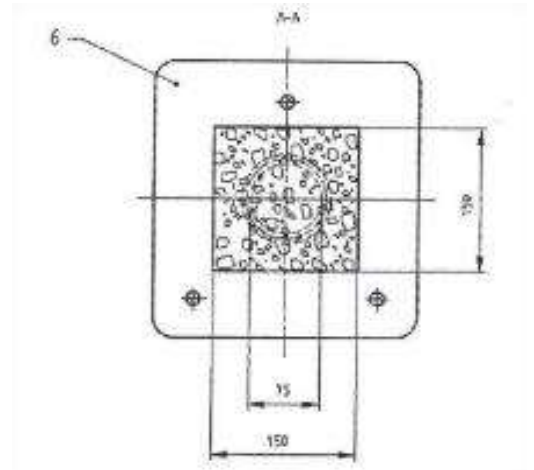
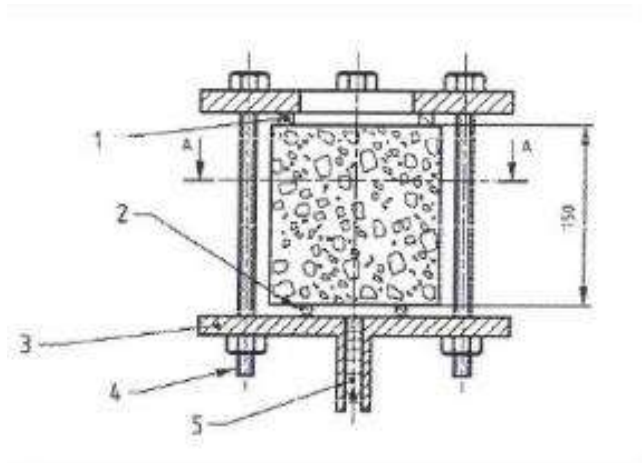
Gniuždomasis stipris yra apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$f_c = F/A, \text{ N/mm}^2 \quad (3.4.3)$$

čia:  $f_c$  – gniuždomasis stipris,  $\text{MPa}$  (niutonais kvadratiniam milimetrui);  $F$  – didžiausia ardomoji apkrova,  $\text{N}$ ;  $A$  – bandinio skerspjūvio plotas,  $\text{mm}^2$ , kurį veikė gniuždymo jėga, apskaičiuojamas iš bandinio matmenų matavimo.

Betono nepralaidumas vandeniui nustatytas remiantis standarte LST 1974 (O priede) keliamais reikalavimais. Bandymui naudojami bandiniai kubai  $150 \text{ mm}$  skersmens ir  $150 \text{ mm}$  aukščio. Iš pradžių, bandiniai sandarinami metalinės kubinėse formose, o po to bandiniai su metaliniais kubais sandariai įtvirtinami bandymų įrenginio lizduose. Vandens slėgis lizduose po apatiniiais bandinių galais didinamas pakopomis kas  $0,2 \text{ MPa}$  per laiką nuo  $1 \text{ min}$  iki  $5 \text{ min}$ . Kiekviename vandens slėgio lygyje pastovus slėgis išlaikomas  $16 \text{ h}$ , esant bandinio aukščiui  $150 \text{ mm}$ . Bandoma, kol bandinio paviršiuje pasirodo vandens filtravimosi per betoną požymiai – vandens dėmės arba lašai.

Vandens įsiskverbimo gylis betone nustatytas remiantis standarte LST EN 12390-8 keliamais reikalavimais. Bandinys kubas  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  matmenų dedamas į bandymų įrenginį (3.4.1 pav.) taip, kad vandens slėgis veiktų bandomąjį plotą ir slėgis būtų nuolat rodomas.

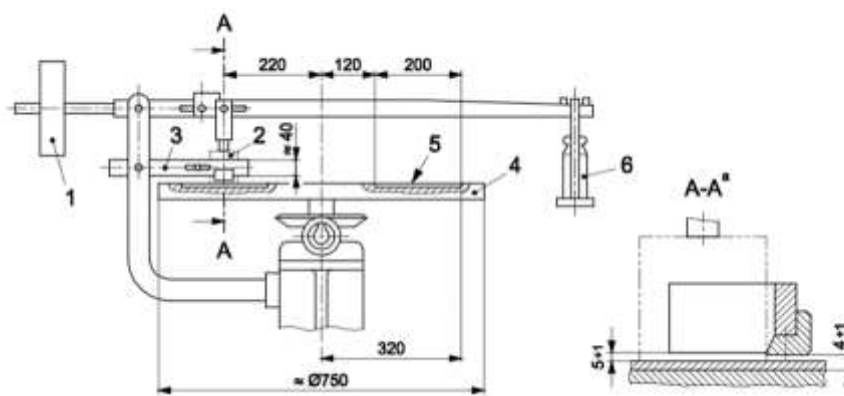


**3.4.1 pav.** Bandymo įrenginio pavyzdys: 1-tvirtinimo elementas, 2-sandarinio žiedas, 3-priveržiama plokštė, 4-srieginis strypas, 5-vanduo, veikimas slėgio, 6-priveržiama plokštelė.

Bandinys dedamas į įrenginį ir  $(72 \pm 2)$  h veikimas  $(500 \pm 50)$  kPa vandens slėgiu. Bandymo metu periodiškai stebima bandinio paviršių, neveikiamų vandens slėgio, išvaizda, ar nepasirodo vanduo. Jei pastebimas vandens ištekis, į rezultatą atsižvelgiama ir jis fiksuojamas. Praėjus nustatytai slėgio veikimo trukmei, bandinys iš įrenginio išimamas. Nušluostomas paviršius, kurį veikė vandens slėgis, pašalinant vandens perteklių. Bandinys perskelimas pusiau statmenai paviršiui, kurį veikė vandens slėgis. Skėlimo ir apžiūrėjimo metu bandinys laikomas paviršiumi, kurį veikė vandens slėgis, į apačią. Kai tik perskeltas paviršius pakankami išdžiūsta, kad būtų galima aiškiai matyti vandens įsiskverbimo sritį, srities riba bandinio paviršiuje paženklinama. Išmatuojamas didžiausias vandens įsiskverbimo gylis bandomajame plote ir užrašomas milimetro tikslumu.

#### Betono dilumo nustatymas

Dilumo (atsparumo dėvėjimuisi) bandymas buvo atliekamas pagal Böhme metodą, LST EN 13892-3:2014 standarto reikalavimus. Betono atsparumas dėvėjimuisi remiasi tūrio nuostoliais, kurie skaičiuojami pagal masės pokyčius. Kai bandinys susideda ir kelių medžiagų sluoksnių, tuomet dilumas nustatomas kaip bandinio storio (aukščio) sumažėjimas. Bandymui atlikti naudojama įranga yra pateikta 3.4.2 paveiksle.



**3.4.2 pav.** Dilumo bandymo įrangos principinė schema: 1 - atsvara; 2 - bandinys; 3 - bandinio laikiklis; 4 - sukamasis diskas; 5 - bandymo takas; 6 - apkrovimo svoris.

Siekiant nustatyti tūrio nuostolius prieš bandymą yra nustatomas bandinio tankis  $\rho_R$ , t.y. bandinys išmatuojamas 0,1 mm tikslumu ir pasveriamas 0,1 g tikslumu. Dilumo bandymui atlikti yra naudojami trys bandiniai – kubeliai  $(71 \pm 1,5)$  mm, kurie prieš bandymą išdžiovinami iki pastovios masės  $(110 \pm 5)$  °C temperatūroje. Kiekvienas bandinys išbandomas po 16 ciklų, iš kurių kiekvienas susideda iš 22 apsisukimų. 20 g standartinės dilinimo medžiagos tolygiai paskleidžiama ant bandymo tako (3.4.2 pav. (5)) ir bandinys įstatomas į laikiklį (3), o bandinio kontaktinis paviršius nukreiptas į taką bei centriškai apkraunamas  $(294 \pm 3)$  N apkrova. Tuomet besisukantis diskas atsargiai pasukamas, kad dilinimo medžiaga ant tako būtų tolygiai pasiskirsčiusi per bandinį, kurį kerta. Po kiekvieno ciklo yra nuvalomas ir besisukantis stalas, ir bandinio kontaktinis paviršius, pats bandinys yra pasveriamas ir pasukamas 90° dedamas atgal į bandymo įrangą. Ant tako paskleidžiamas naujas 20 g dilinimo medžiagos kiekis. Tokiu būdu bandinys yra pasukamas 4 kartus, t. y. atliekama 16 ciklų. Dilumo atsparumas pagal Böhme A po 16 ciklų yra nustatomas pagal bandinio tūrio nuostolius  $\Delta V$  naudojant formulę:

$$A = \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_R}, \text{ cm}^3/50\text{cm}^2 \quad (3.4.4)$$

čia:  $\Delta m$  – masės nuostoliai, g;  $\rho_R$  – bandinio tankis, g/cm<sup>3</sup>.

### 3.5. Betono ilgaamžiškumo nustatymas

Betono atsparumas šalčiui nustatytas taikant tūrinio užšaldymo ir atšildymo bandymo metodą pagal standarte LST 1428-17 pateiktus reikalavimus. Atsparumo šalčiui bandymui naudoti bandiniai kubai  $100 \times 100 \times 100$  mm matmenų. Pasiekę projekcinę stiprį betono bandiniai pamerkami į vonią su vandeniu kurio temperatūra  $(18 \pm 5)$  °C. Bandiniai įmirkami taip: pirmąją parą į vonią pripilama tiek vandens, kad jis apsemtų apie 1/3 bandinių aukščio. Taip apsemti bandiniai laikomi 24 h. Po to į vonią pripilama tiek vandens, kad būtų apsemta apie 2/3 bandinių aukščio. Taip apsemti bandiniai vėl laikomi 24 h. Po to vandens pripilama tiek, kad visiškai apsemtų bandinius ir jo sluoksnio storis virš bandinių ir iš visų jų pusių būtų ne mažesnis kaip 20 mm. Taip apsemti bandiniai laikomi dar 24 h (iš viso 4 paras). Prisotinti bandiniai prieš atsparumo šalčiui nustatymą išimami iš vonios. Praėjus nuo 2 h iki 4 h nuo bandinių išėmimo iš vonios, bandomi kontroliniai bandiniai, nustatant jų pradinį gniuždymo stiprį pagal LST EN 12390-3. Atsparumo šalčiui bandymui skirti betono bandiniai (6 bandiniai, jeigu atsparumo šalčiui nustatymo trukmė ilgesnė nei 100 ciklų) sudedami į šaldymo kamerą. Šaldymo kameros centre užšaldymo metu turi būti minus  $(18 \pm 2)$  °C temperatūra. Esant minėtajai temperatūrai užšaldymo trukmė turi būti ne trumpesnė kaip 2,5 h, kai bandomi  $(100 \times 100 \times 100)$  mm bandiniai. Po atsparumo šalčiui nustatymo bandiniai iš šaldymo kameros išimami ir sudedami į vonią su vandeniu, kurio temperatūra  $(18 \pm 5)$  °C. Vonioje bandiniai turi būti laikomi ne trumpiau kaip  $(2 \pm 0,5)$  h, kai bandomi  $(100 \times 100 \times 100)$  mm bandiniai. Bandiniai apžiūrimi po tam tikro užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus. Betono atsparumas šalčiui nustatomas pagal bandinių gniuždymo stiprį, nustatytą pagal LST EN 12390-3. Jeigu bandinių serijos (3 bandiniai) vidutinis gniuždymo stipris po reikiamo (projektinio) užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus atitinka arba yra ne daugiau kaip 5 % mažesnis už kontrolinių bandinių gniuždymo stiprį, laikoma, kad betonas išlaikė atsparumo šalčiui bandymą.

Betono bandinių gniuždymo stiprio po atsparumo šalčiui bandymo sumažėjimas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta f = \frac{f_{\text{s}} - f_{\text{k}}}{f_{\text{k}}} \times 100; \quad (3.5.1)$$

čia:  $\Delta f$  – betono bandinių gniuždymo stiprio sumažėjimas procentais (%) lyginant su kontrolinių bandinių stipriu;  $f_{\text{k}}$  – kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio verčių vidurkis prieš atsparumo šalčiui bandymą megapaskaliais (MPa);  $f_{\text{s}}$  – bandinių gniuždymo stiprio verčių vidurkis po tam tikro užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus megapaskaliais (MPa).

Jeigu po atsparumo šalčiui bandymo bandinių gniuždymo stipris sumažėjo daugiau kaip 5 % lyginant su kontrolinių bandinių gniuždymo stipriu, betonas atsparumo šalčiui bandymo neišlaikė.

#### 4. Tyrimų rezultatai.

##### 4.1. Torkretavimui paruošto mišinio technologinės savybės

Tyrimo metu betono mišinio panaudota sudėti nebuvo žinoma, tačiau buvo išvardintos betono mišinio sudedamos dalys: LST EN 206-C30/37-XC3-C10,20-D<sub>max</sub>8-S4 (xx lentelė).

**4 lentelė.** Betono mišinio sudedamosios dalys.

Mišinio sudedamoji, matavimo vnt.	Kiekis 1 m <sup>3</sup> betono mišinio
	T ir TO
CEM I 42,5 R, kg	nenurodyta
Vanduo, l	nenurodyta
0/4 frakcijos smėlis, kg	nenurodyta
5/8 frakcijos granito skalda, kg	nenurodyta
Superplastiklis, kg	nenurodyta
Orą įtraukianti įmaiša, kg	nenurodyta
Rišimąsi lėtinanti įmaiša	nenurodyta
Mikroplaušas, kg	0,45

Betono mišinio konsistencija. Betono mišinio konsistencija buvo vertinta atliekant slankumo bandymą. Betono mišinio slankumo matavimo akimirka betono mišinio ruošimo ceche pavaizduota 39 pav. Nustatyta, kad šviežio betono mišinio slankumo vidutinė vertė yra 200 mm. Mišinys pagal konsistenciją tenkina S4 slankumo klasę, kuri kinta ribose nuo (160 iki 210)±30 mm. Tokios konsistencijos mišinys naudojamas taikant šlapio torkretavimo technologiją.

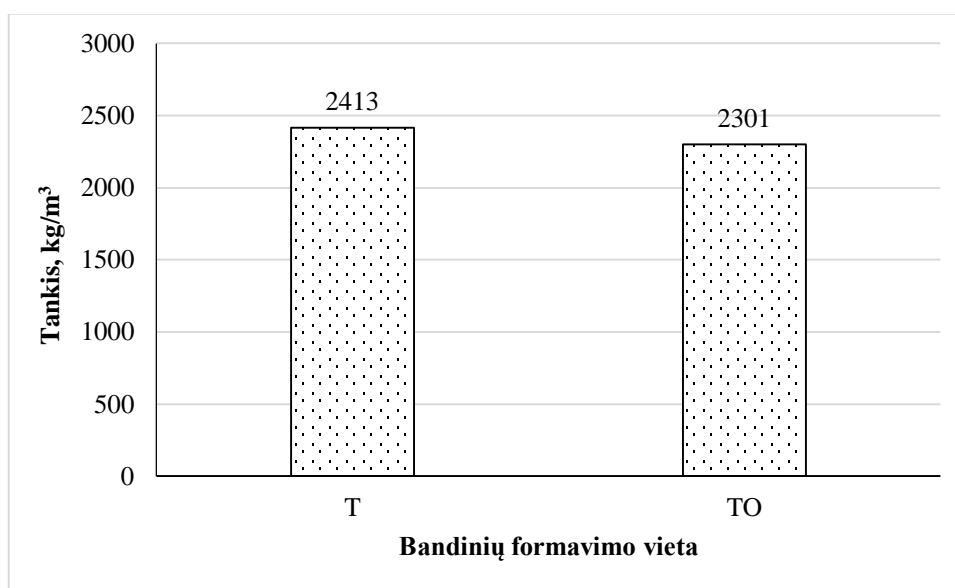


**40 pav.** Betono mišinio slankumo nustatymas

Betono mišinio tankis. Tyrimo metu taip pat buvo atliktas šviežio betono mišinio tankio nustatymo bandymas. Atlikus minėtą bandymą nustatyta vidutinė tankio vertė yra 2431 kg/m<sup>3</sup>.

## 4.2. Torkretavimo technologijos įtaka betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms

Sukietėjusio betono tankis. Sukietėjusio betono tankio kitimas priklausomai nuo taikyto bandinių suformavimo būdo pavaizduotas 41 pav. Iš šio paveikslo matyti, kad betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių betono tankio vidurkis gautas  $2413 \text{ kg/m}^3$ , o statybos aikštelėje suformuotų bandinių, taikant torkretavimo būdą, tankio vidurkis gautas  $2301 \text{ kg/m}^3$ . Iš gautų rezultatų matome, kad betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių tankio vidurkis apie 4,6% didesnis nei torkretavimo būdu suformuotų bandinių tankio vidurkis. Vadinasi, torkretavimo būdu statybos aikštelėje iš to paties mišinio suformuoti bandiniai pasižymi mažiau tankia struktūra, lyginant su bandiniais, suformuotais betono mišinio ruošimo ceche, kuomet bandiniai metalinėse formose buvo tankinami ant vibravimo stalo.

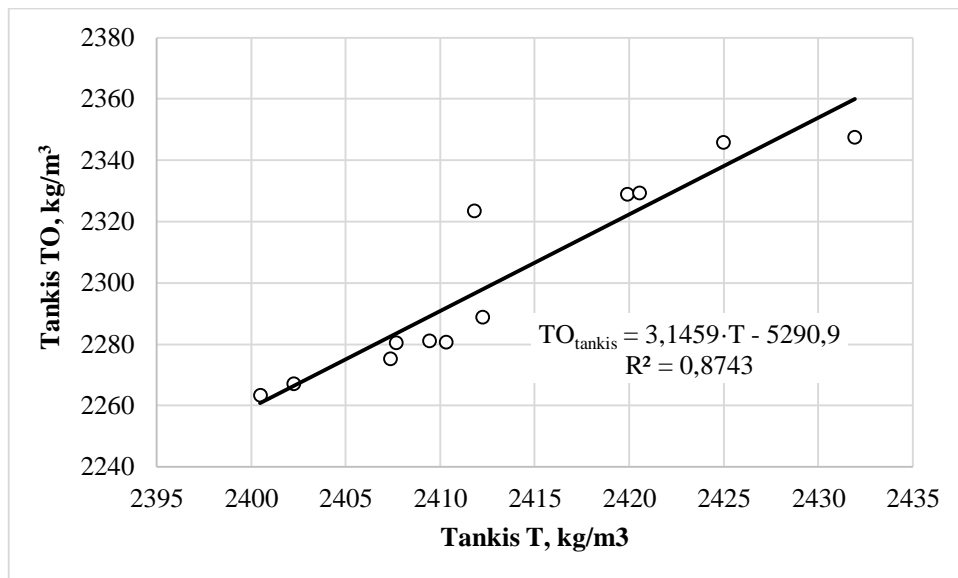


**41 pav.** Sukietėjusio betono bandinių tankis: TO - betono tankis, taikant torkretavimo technologiją, T - laboratorijoje nustatytas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, betono tankis

Remiantis gautais tyrimo rezultatais buvo sudaryta priklausomybė (42 pav.), kuria remiantis galima prognozuoti statybos aikštelėje suformuoto betono tankį, taikant šlapio torkretavimo technologiją, kai yra žinomas laboratorijoje suformuotų bandinių tankis:

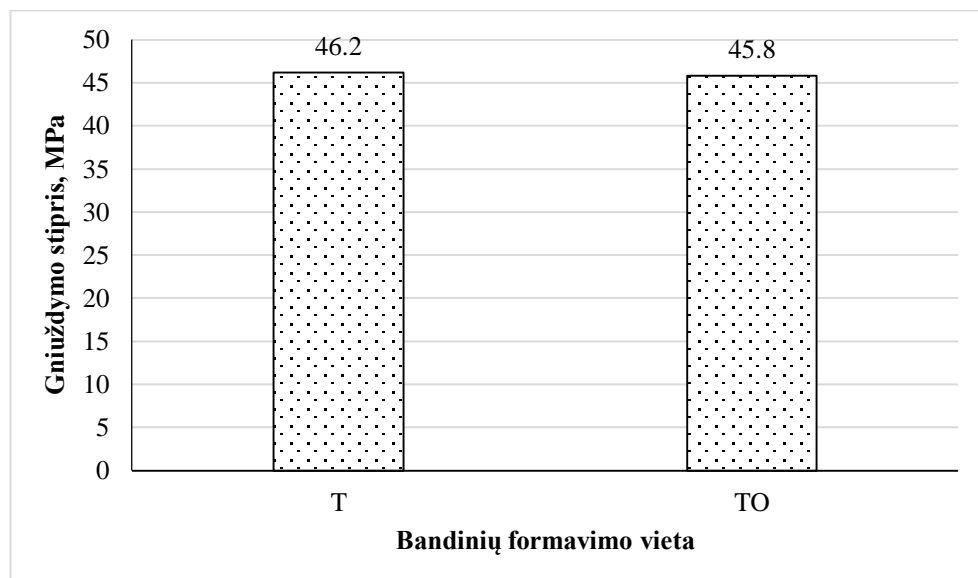
$$TO_{\text{tankis}} = 3,1459 \cdot T_{\text{tankis}} - 5290,9; \text{ kg/m}^3 \quad (4.2.1)$$

čia:  $TO_{\text{tankis}}$  – prognozuojamas betono tankis, taikant torkretavimo technologiją ( $\text{kg/m}^3$ ),  $T_{\text{tankis}}$  – laboratorijoje nustatytas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, betono tankis ( $\text{kg/m}^3$ ).



**42 pav.** Betono tankio, taikant torkretavimo technologiją, prognozavimas, kai žinomas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, sukietėjusio betono tankis

**Sukietėjusio betono gniuždymo stipris.** Sukietėjusio betono gniuždymo stiprio kitimas priklausomai nuo taikyto bandinių suformavimo būdo pavaizduotas 43 pav. Iš šio paveikslėlio matyti, kad statybos aikštelėje suformuotų bandinių, taikant torkretavimo būdą, gniuždymo stiprio vidutinė vertė yra lygi 46,2 MPa, o betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių gniuždymo stiprio vidutinė vertė yra lygi 45,8 MPa. Matyti, kad betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių gniuždymo stiprio vidurkis gautas didesnis nei torkretavimo būdu suformuotų bandinių gniuždymo stiprio vidurkis. Betono bandinių gniuždymo stiprio sumažėjimą atspindi ir bandinių tankio sumažėjimas (41 pav.).



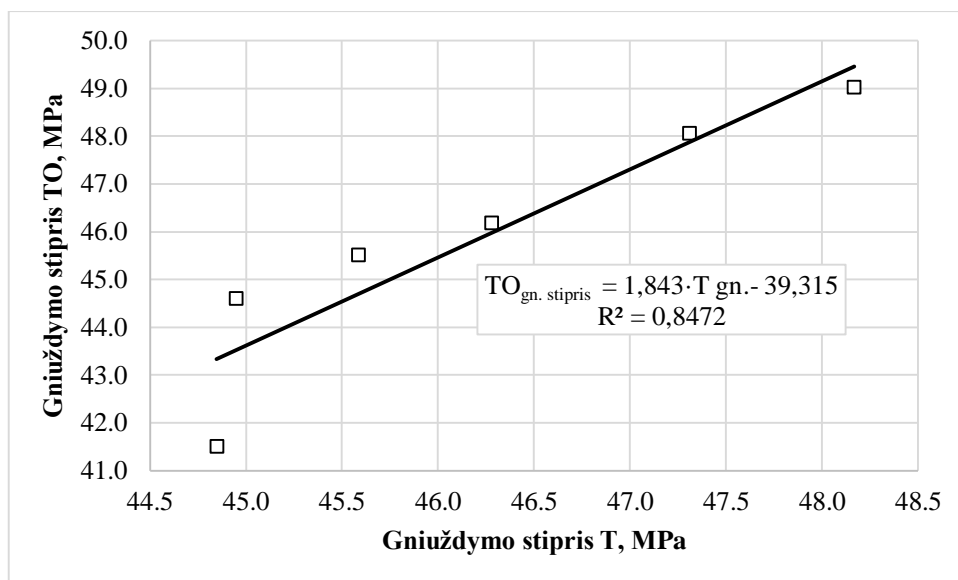
**43 pav.** Betono bandinių gniuždymo stipris: TO - betono gniuždymo stipris, taikant torkretavimo technologiją, T- laboratorijoje nustatytas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, betono gniuždymo stipris



Remiantis gautais tyrimo rezultatais buvo sudaryta priklausomybė (44 pav.), kuria remiantis galima prognozuoti statybos aikštelėje suformuoto betono gniuždymo stiprį, taikant šlapio torkretavimo technologiją, kai yra žinomas laboratorijoje suformuotų bandinių gniuždymo stipris:

$$TO_{\text{gn. stipris}} = 1,843 \cdot T_{\text{gn. stipris}} - 39,315 \text{ MPa}; \quad (4.2.2)$$

čia:  $TO_{\text{gn. stipris}}$  – prognozuojamas betono gniuždymo stipris, taikant torkretavimo technologiją (MPa),  $T_{\text{gn. stipris}}$  – laboratorijoje nustatytas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, betono gniuždymo stiprį (MPa).



**44 pav.** Betono gniuždymo stiprio, taikant torkretavimo technologiją, prognozavimas, kai žinomas tos pačios betono mišinio sudėties, kuri naudojama torkretavimui, sukietėjusio betono gniuždymo stipris

**Sukietėjusio betono nelaidumas vandeniui.** Sukietėjusio betono nelaidumo vandeniui kitimas priklausomai nuo taikyto bandinių suformavimo būdo pateiktas 12 ir 13 lentelėse. Iš šiose lentelėse pateiktų domenų matyti, kad tiek įprastu būdu, tiek taikant torkretavimo būdą, suformuoti bandiniai vandens nepraleido, kuomet vandens slėgis įrenginyje palaispniui buvo keliamas iki 0,8 MPa. Nustatyta, kad bandiniai atitinka W8 betono nelaidumo vandeniui markę.

**5 lentelė.** Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) nelaidumo vandeniui bandymo rezultatai

Bandinių žymėjimas	Bandymo data	Slėgis bandymo metu, MPa	Slėgio pokytis, MPa	Bandymo rezultatai pagal LST 1974:2006, O priedas		Išvada apie betono nelaidumą vandeniui
				Band. Nr.	Atžyma apie vandens nuotėkį	
T-1 – T-6	2020-07-07	0,2	0,02	1-6	nepraleido	Betono nelaidumo vandeniui markė W8
	2020-07-08	0,4	0,02	1-6	nepraleido	
	2020-07-09	0,6	0,05	1-6	nepraleido	
	2020-07-10	0,8	0,05	1-6	nepraleido	

**6 lentelė.** Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) nelaidumo vandeniui bandymo rezultatai

Bandinių žymėjimas	Bandymo data	Slėgis bandymo metu, MPa	Slėgio pokytis, MPa	Bandymo rezultatai pagal LST 1974:2006, O priedas		Išvada apie betono nelaidumą vandeniui
				Band. Nr.	Atžyma apie vandens nuotėkį	
TO-1 – TO-6	2020-07-11	0,2	0,05	1-6	nepraleido	Betono nelaidumo vandeniui markė W8
	2020-07-12	0,4	0,05	1-6	nepraleido	
	2020-07-13	0,6	0,02	1-6	nepraleido	
	2020-07-14	0,8	0,05	1-6	nepraleido	

**Vandens įsiskverbimo gylis betone.** Vandens įsiskverbimo gylio kitimas priklausomai nuo taikyto bandinių suformavimo būdo pateiktas 14 ir 15 lentelėse. Iš šiose lentelėse pateiktų domenų matyti, kad betono ruošimo ceche suformuotų bandinių vandens įsiskverbimo gylio vidutinė vertė gauta 16,5 mm, o statybos aikštelėje suformuotų bandinių, taikant torkretavimo būdą, vandens įsiskverbimo gylio vidutinė vertė gauta 19,9 mm. Tiek įprastu būdu, tiek taikant torkretavimo būdą, suformuoti bandiniai yra nelaidūs vandeniui, nes vidutinis vandens įsiskverbimo gylis yra mažesnis už 20 mm leistiną. Betono ruošimo ceche suformuotų bandinių didžiausias vandens įsiskverbimo gylis siekia 22,9 mm, o statybos aikštelėje suformuotų bandinių, taikant torkretavimo būdą, didžiausias vandens įsiskverbimo gylis 27,8 mm. Tiek įprastu būdu, tiek taikant torkretavimo būdą, suformuoti bandiniai yra nelaidūs vandeniui, nes didžiausias vandens įsiskverbimo gylis neviršija 50 mm leistinos ribos.

**7 lentelė.** Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui bandymo rezultatai

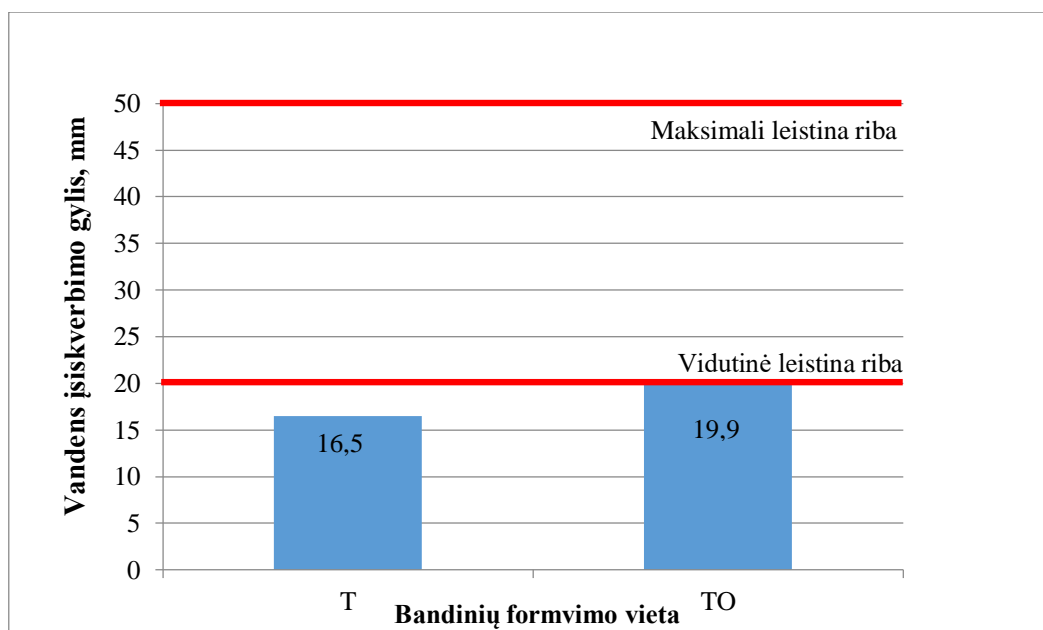
Bandinių žymėjimas	Bandymo data (bandinių amžius)	Slėgis bandymo metu, MPa	Bandymo rezultatai pagal LST EN 12390-8:2019		Išvada apie vandens įsiskverbimą pagal LST 1974:2012, F priedas
			Bandymo Nr.	Atžyma apie vandens nuotėkį	
	2020-07-22	0,5	T-1 – T-6	nepraleido	Betonas nelaidus vandeniui, nes vidutinis vandens įsiskverbimo gylis 16,5 mm mažiau už 20 mm leistiną. Didžiausias įsiskverbimo gylis 22,9 mm < 50 mm.
T-1 – T-6	2020-07-23	0,5	T-1 – T-6	nepraleido	
	2020-07-24	0,5	T-1 – T-6	nepraleido	
				Vandens įsiskverbimo gylis, mm	
				18,0	
				14,7	
				10,6	
				22,9	
				19,8	
				12,7	
		<b>Vidutinė reikšmė</b>		<b>16,5</b>	

**Pastabos:** bandiniai – kubai 150×150×150 mm dydžio, kurie veikiami vandens slėgiu iš apačios bandinio formavimo krypties atžvilgiu; \* šešių matavimų vidutinė reikšmė.

**8 lentelė.** Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui bandymo rezultatai

Bandinių žymėjimas	Bandymo data (bandinių amžius)	Slėgis bandymo metu, MPa	Bandymo rezultatai pagal LST EN 12390-8:2019		Išvada apie vandens įsiskverbimą pagal LST 1974:2012, F priedas
			Bandymo Nr.	Atžyma apie vandens nuotėkį	
	2020-07-26	0,5	TO-1 – TO-6	nepraleido	Betonas nelaidus vandeniui, nes vidutinis vandens įsiskverbimo gylis 19,9 mm yra mažiau už 20 mm leistiną. Didžiausias įsiskverbimo gylis 27,8 mm < 50 mm.
TO-1 – TO-6	2020-07-27	0,5	TO-1 – TO-6	nepraleido	
	2020-07-28	0,5	TO-1 – TO-6	nepraleido	
				Vandens įsiskverbimo gylis, mm	
				17,1	
				16,7	
				21,5	
				18,0	
				27,8	
				18,5	
		<b>Vidutinė reikšmė</b>		<b>19,9</b>	

**Pastabos:** bandiniai – kubai 150×150×150 mm dydžio, kurie veikiami vandens slėgiu iš apačios bandinio formavimo krypties atžvilgiu; \* šešių matavimų vidutinė reikšmė.



**45. pav.** Torkretavimo technologijos įtaka vandens įsiskverbimo gyliui betone

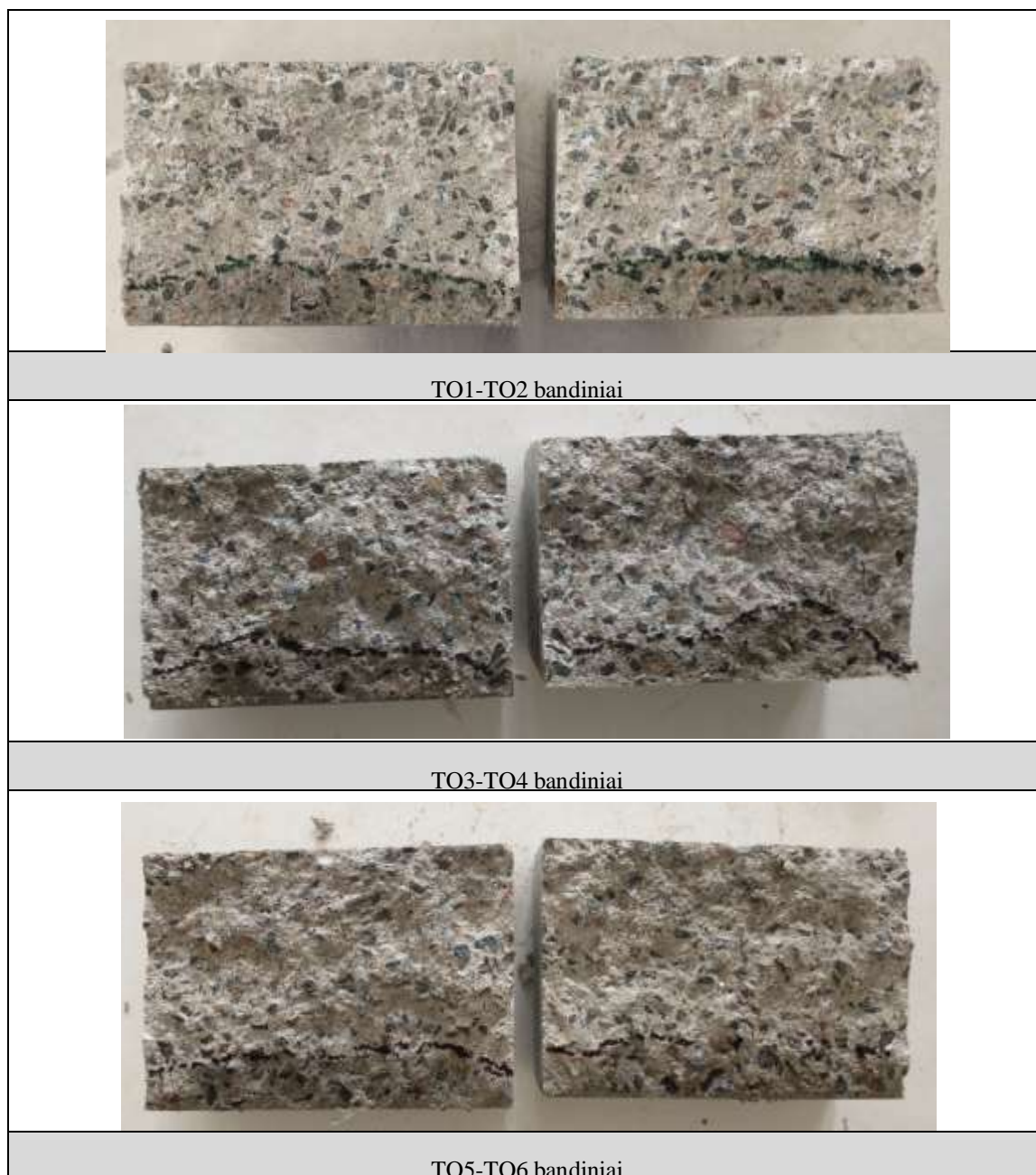
Betono dilumas. Betono dilumo kitimas priklausomai nuo taikyto bandinių suformavimo būdo pateiktas 16 ir 17 lentelėse. Iš šiose lentelėse pateiktų domenių matyti, kad betono ruošimo ceche

suformuotų bandinių vidutinis dilumo rodiklis yra  $10,01 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ , o statybos aikštelėje suformuotų bandinių, taikant torkretavimo būdą, vidutinis dilumo rodiklis yra  $9,74 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ . Iš gautų rezultatų matoma, kad betono ruošimo ceche suformuotų bandinių vidutinis dilumo rodiklis didesnis nei statybos aikštelėje suformuotų bandinių, taikant torkretavimo būdą, vidutinis dilumo rodiklis. Tam įtakos gali turėti tai, kad dilumo nustatymui naudoti TO bandiniai, buvo išpjauti iš statybos aikštelėje paliktų  $1000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}$  bandinių. Tokiu atveju, paviršiuje buvo matomas stambus užpildas, kuris pasižymi didesniu kietumu nei cementinis akmuo.

**9lentelė.** T bandinių vandens įsiskverbimo gylio betone veikiant slėgiui bandymo fotofiksacija



**10 lentelė.** TO bandinių vandens įsiskverbimo gylis betone veikiant slėgiui bandymo fotofiksacija



**11 lentelė.** Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) dilumo bandymo duomenys

Bandinio žymuo	Tankis, g/cm <sup>3</sup>	Masė, g			Dilumo rodiklis (pagal Böhme metodą), cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup>
		prieš bandymą	po bandymo	masės nuostolis	
T-1	2,28	761,50	739,09	22,41	9,85
T-2	2,29	857,43	833,80	23,63	10,34
T-3	2,30	824,61	802,01	22,60	9,84
<b>vidurkis</b>	<b>2,29</b>	<b>814,51</b>	<b>791,63</b>	<b>22,88</b>	<b>10,01</b>





**Pastabos:** Bandiniai kubeliai 71±1,5 mm dydžio. Bandinio būklė – bandiniai išdžiovinti (110±5)°C temperatūroje iki pastovios masės.





**12 lentelė.** Tokretbetonio dilumo bandymo duomenys (bandiniai formuoti statybos aikštelėje)

Bandinio žymuo	Tankis, g/cm <sup>3</sup>	Masė, g			Dilumo rodiklis (pagal Böhme metodą), cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup>
		prieš bandymą	po bandymo	masės nuostolis	
TO-1	2,25	825,61	783,75	19,89	8,86
TO-2	2,26	823,28	754,94	22,61	10,02
TO-3	2,24	816,50	775,87	23,11	10,33
<b>vidurkis</b>	<b>2,25</b>	<b>821,80</b>	<b>771,52</b>	<b>21,87</b>	<b>9,74</b>



**Pastabos:** Bandiniai kubeliai 71±1,5 mm dydžio. Bandinio būklė – bandiniai išdžiovinti (110±5)°C temperatūroje iki pastovios masės.

**13 lentelė.** T betono bandinio paviršiaus fotofiksacija

Bandinys T prieš dilumo bandymą	Bandinys T po dilumo bandymo
	
I plokštuma	
	
II plokštuma	

	
III plokštuma	
	
IV plokštuma	

14 lentelė. TO betono bandymo fotofiksacija

Bandinys TO prieš dilumo bandymą	Bandinys TO po dilumo bandymo
	
I plokštuma	



II ploštuma



III ploštuma



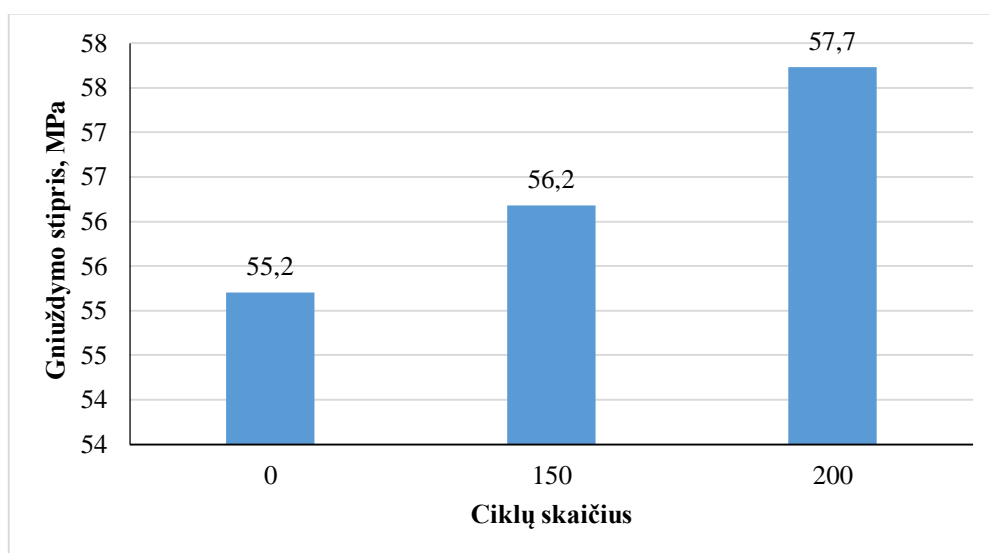
IV ploštuma



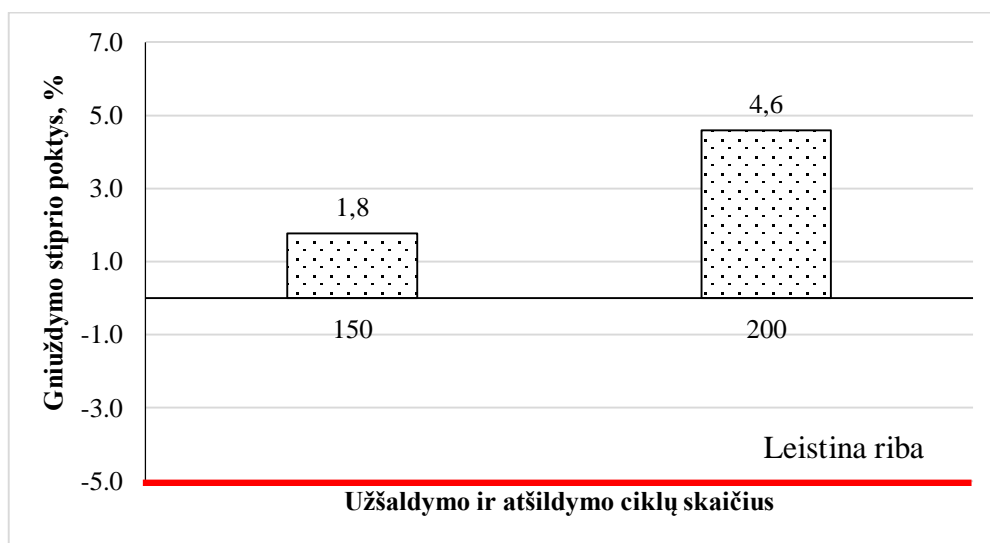
### 4.3. Torkretavimo technologijos įtaka betono ilgaamžiškumui

**Betono atsparumas šalčiui.** Betono atsparumui šalčiui nustatyti naudoti bandiniai – kubai 100×100×100 mm dydžio, kurių mastelio koeficientas  $\alpha$  lygus 0,95. Taikytas pagrindinis bandymo metodas, mirkymo terpė – vanduo. Betono bandinių kubų gniuždymo stipris išbandytas per 2-4 h nuo bandinių išėmimo iš vandens. Jeigu po atsparumo šalčiui bandymo bandinių gniuždymo stipris sumažėjo daugiau kaip 5% lyginant su kontrolinių bandinių gniuždymo stipriu, betonas atsparumo šalčiui bandymo neišlaikė ir atvirkščiai.

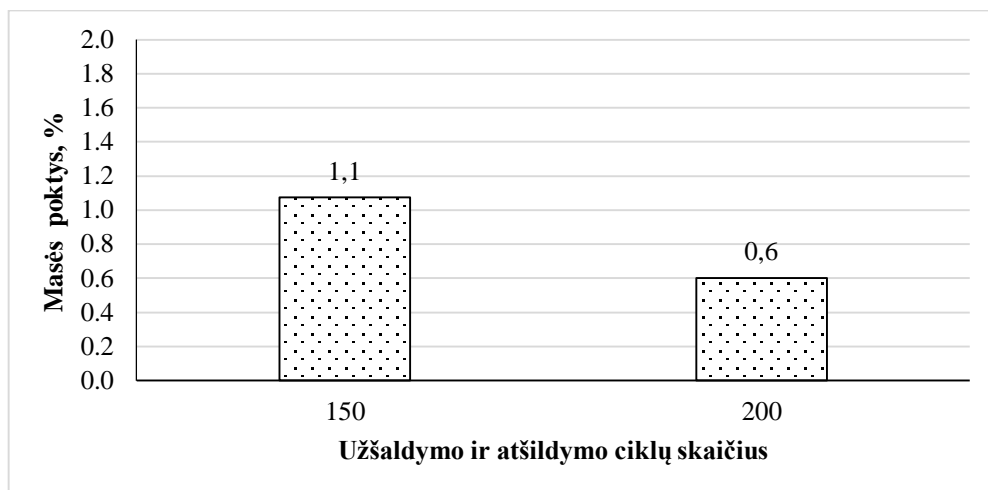
Betono atsparumo šalčiui kitimas priklausomai nuo taikyto bandinių suformavimo būdo pateiktas 45 ir 16 pav. Iš 45 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad betono mišinio ruošimo ceche suformuotiems bandiniams po 150 užšalimo ciklų gautas gniuždymo stiprio vidurkis 56,2 MPa, o po 200 užšalimo ciklų – 57,7 MPa. Matyti, kad po atsparumo šalčiui bandymo bandinių gniuždymo stipris ne sumažėjo daugiau kaip 5%, o padidėjo lyginant su bandinių gniuždymo stipriu, nustatytu prieš bandymą: po 150 ciklų padidėjo 1,77%, o po 200 ciklų – padidėjo 4,58%. Betonas tenkina atsparumo šalčiui markę F200.



a) gniuždymo stipris po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus



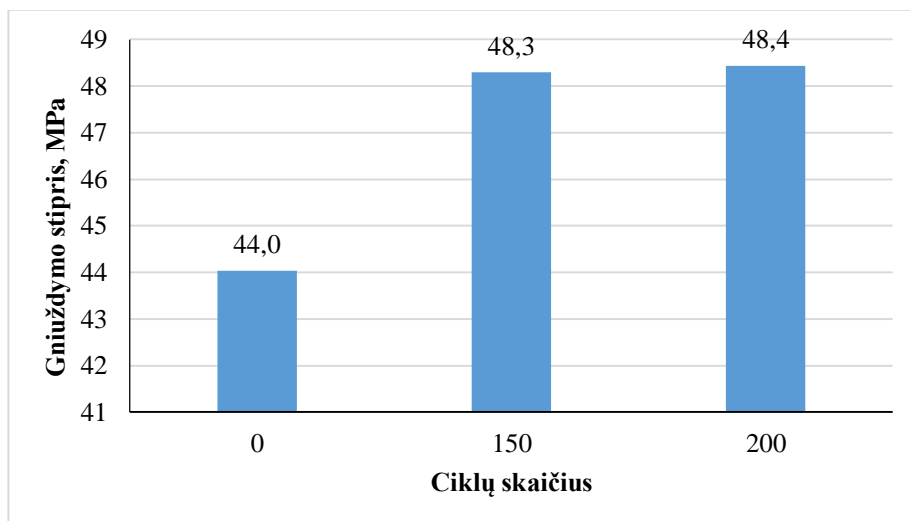
b) gniuždymo stiprio pokytis po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus



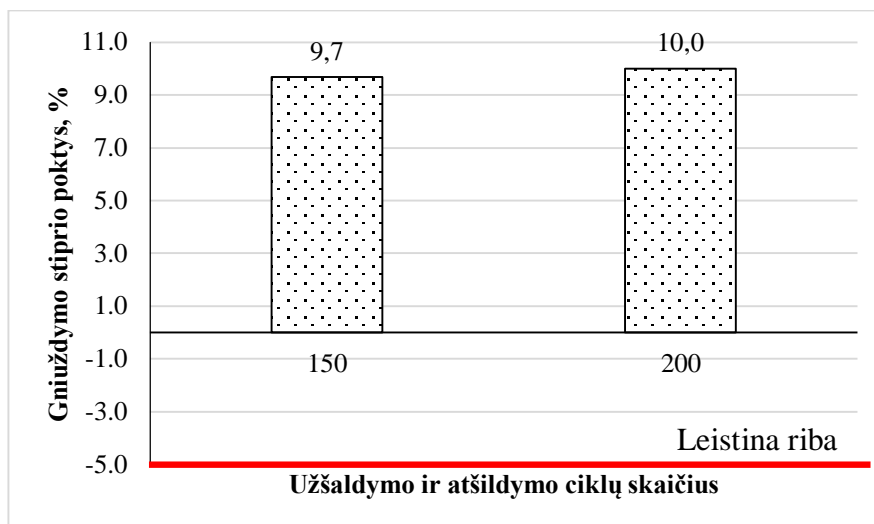
c) masės pokytis po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus

**46 pav.** Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) ilgaamžiškumas

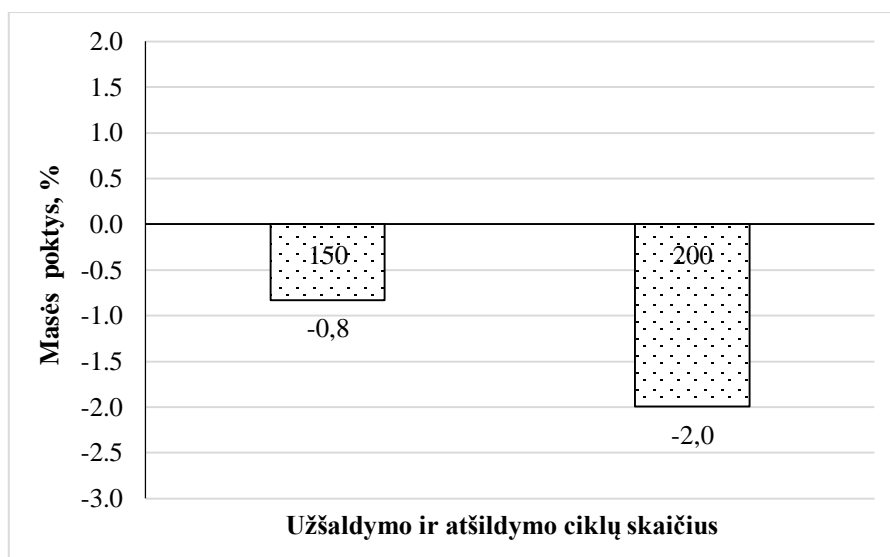
Statybos aikštelėje suformuotų bandinių gniuždymo stipris po 150 užšaldymo ciklų gautas 48,3 MPa o po 200 ciklų 48,4 MPa lyginant su kontroliniais bandiniais (46 pav.). Matyti, kad po atsparumo šalčiui bandymo bandinių gniuždymo stipris ne sumažėjo daugiau kaip 5%, o padidėjo lyginant su bandinių gniuždymo stipriu, nustatyto prieš bandymą: po 150 ciklų padidėjo 9,67%, o po 200 ciklų – padidėjo 9,99%. Betonai tenkina atsparumo šalčiui markę F200. Įvertinus rezultatus matoma, kad tiek betono mišinio ruošimo ceche įprastu būdu suformuotų bandinių, tiek statybos aikštelėje torkretavimo būdu suformuotų bandinių betono gniuždymo stiprio vertės padidėja po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus. Šiuo bandymu taip pat nustatyta, kad betono ruošimo ceche suformuotų bandinių gniuždymo stipris po nustatyto užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus yra didesnis. Betono struktūros formavimuisi įtakos galėjo turėti torkretavimo technologija.



a) gniuždymo stipris po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus



b) gniuždymo stiprio pokytis po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus



c) masės pokytis po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus

**47 pav.** Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) ilgaamžiškumas

Bandinių vaizdas po 150 ir 200 užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus pavaizduotas 48 ir 49 pav.



a) po 150 ciklų

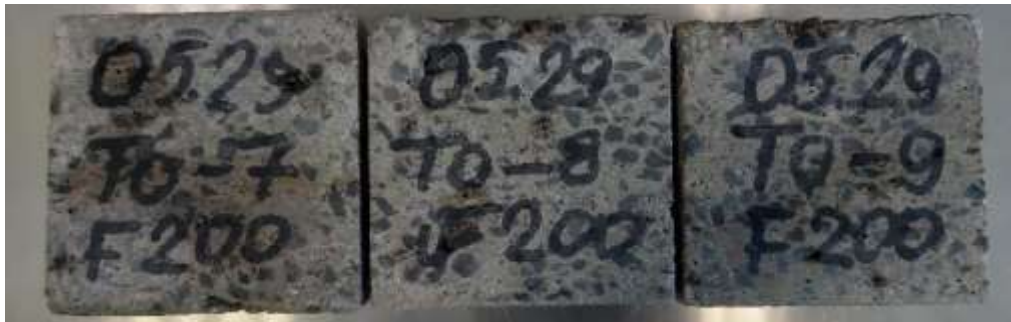


b) po 200 ciklų

**48 pav.** Betono mišinio ruošimo ceche suformuotų bandinių (T) bandinių vaizdas



a) po 150 ciklų



b) po 200 ciklų

**49 pav.** Torkretavimo būdu suformuotų bandinių (TO) bandinių vaizdas

Tiek betono mišinio ruošimo ceche įprastu būdu suformuotų bandinių, tiek statybos aikštelėje torkretavimo būdu suformuotuose bandiniuose nepastebimi plyšiai ar kiti defektai (47-48 pav.) tiek po 150, tiek po 200 užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus bandymo. Kadangi po atsparumo šalčiui bandymo bandinių gniuždymo stipris nesumažėjo daugiau kaip 5 % lyginant su kontrolinių bandinių gniuždymo stipriu, betonas atsparumo šalčiui bandymą išlaikė.

## Išvados

1. Betono kupolų statybai naudojamos pneumatinės klojinių sistemos bei torkretavimo technologija yra efektyvios taupant statybines medžiagas ir darbo jėgą. Tačiau tokio tipo technologijos reikalauja kvalifikuotos darbo jėgos. Atsižvelgiant į platų monolitinių kupolų technologijų taikymą bei skirtingų konstrukcijų klasifikaciją yra skiriamos trys pagrindinės grupės: oro erdvės pneumatiniai, klasikiniai ir kėlimo pneumatiniai. Monolitinio betono kupolai gali būti suprojektuoti taip, kad atitiktų šiuolaikinius architektūrinius poreikius, o patys statiniai pasižymi ilgaamžiškumu, statomi sunkiomis klimato ir geografinėmis sąlygomis. Monolitinio betono kupolai gali būti suprojektuoti taip, kad atitiktų bet kokius architektūrinius poreikius. Šie kupolai yra ilgaamžiai, taupūs, statomi sunkiomis klimato ir geografinėmis sąlygomis.
2. Remiantis gautais tyrimo rezultatais buvo sudarytos priklausomybės, kuriomis remiantis galima prognozuoti statybos aikštelėje torkretavimo būdu suformuoto sukietėjusio betono tankį, bei gniuždymo stiprį, kai yra žinomas laboratorijoje įprastu būdu suformuotų bandinių betono tankis ir gniuždymo stipris. Torkretavimo būdu statybos aikštelėje iš to paties mišinio suformuoti bandiniai pasižymi mažiau tankia struktūra ( $2301 \text{ kg/m}^3$ ), lyginant su bandiniais, suformuotais betono mišinio ruošimo ceche ( $2413 \text{ kg/m}^3$ ), kuomet bandiniai metalinėse formose buvo tankinami ant vibravimo stalo. Dėl mažesnio tankio torkretavimo būdu suformuotų bandinių gniuždymo stipris ( $45,8 \text{ MPa}$ ) taip pat gautas mažesnis lyginant su įprastu būdu suformuotų bandinių gniuždymo stipriu ( $46,2 \text{ MPa}$ ).
3. Tiek įprastu būdu, tiek taikant torkretavimo būdą, suformuoti betono bandiniai vandens nepraleido, kuomet vandens slėgis įrenginyje palaiptams buvo keliamas iki  $0,8 \text{ MPa}$ , ir atitinka W8 betono nelaidumo vandeniui markę. Taip pat nustatyta, kad abiem būdais suformuoti betono bandiniai yra nelaidūs vandeniui, nes vidutinis vandens įsiskverbimo gylis yra mažesnis už  $20 \text{ mm}$  leistiną, o didžiausias vandens įsiskverbimo gylis neviršija  $50 \text{ mm}$  leistinos ribos.
4. Betono ruošimo ceche suformuotų bandinių vidutinis dilumo rodiklis ( $10,01 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ ) gautas didesnis nei statybos aikštelėje torkretavimo būdu suformuotų bandinių vidutinis dilumo rodiklis ( $9,74 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ ). Tam įtakos gali turėti tai, kad dilumo nustatymui naudoti bandiniai buvo išpjauti iš statybos aikštelėje paliktų  $1000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}$  dydžio bandinių. Pastarųjų bandinių paviršiuje buvo atidengtas stambus užpildas (granito skalda), kuris galėjo turėti įtakos dilumo rezultatams.
5. Atlikus betono ilgaamžiškumo bandymą nustatyta, kad po atsparumo šalčiui bandymo bandinių gniuždymo stipris ne sumažėjo daugiau kaip  $5\%$ , o padidėjo lyginant su bandinių gniuždymo stipriu, nustatytu prieš bandymą. Tiek įprastu būdu, tiek taikant torkretavimo būdą, suformuoti betono bandiniai tenkina atsparumo šalčiui markę F200. Įprastu būdu suformuotų bandinių gniuždymo stipris po nustatyto užšaldymo-atšildymo ciklų skaičiaus gautas didesnis. Betono struktūros formavimuisi įtakos galėjo turėti torkretavimo technologija.

## Informacijos šaltinių sąrašas

1. TOICHI, Nose. Process of constructing culverts or pipes of concrete. U.S. Patent No 1,600,353, 1926.
2. KROMOSER, Benjamin; HUBER, Patrick. Pneumatic formwork systems in structural engineering. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016
3. MATHEWS, Charles B.; AMBROSE, John G. *Inflatable core for use in casting hollow concrete units*. U.S. Patent No 2,485,898, 1949.
4. HEIFETZ, H. Domecrete Building System (Israel), "Bauen+ wohnen= construction+ habitation= building+ home,". *Internationale Zeitschrift*, 1972, 26.6: 262-263.
5. DÖRSTELMANN, Moritz, et al. ICD/ITKE research pavilion 2014–15: Fibre placement on a pneumatic body based on a water spider web. *Architectural Design*, 2015, 85.5: 60-65.
6. SOBEK, Werner. *Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen*. 1987.
7. KROMOSER, Benjamin; KOLLEGGER, Johann. Herstellung von Schalentragerwerken aus Beton mit der "Pneumatic Wedge Method" Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen mithilfe von pneumatischer Schalung. *Beton-und Stahlbetonbau*, 2014, 109.8: 557-565.
8. KROMOSER, Benjamin; KOLLEGGER, Johann. Pneumatic forming of hardened concrete–building shells in the 21st century. *Structural Concrete*, 2015, 16.2: 161-171.
9. HUIJBEN, F.; VAN HERWIJNEN, F.; NIJSSE, R. Vacuumatics 3D-formwork systems: customised free-form solidification. In: *IV International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, ECCOMAS*. 2009.
10. HUIJBEN, Frank; HERWIJNEN, F. van; NIJSSE, Rob. VACUUMATICS; Systematic Flexural Rigidity Analysis. In: *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. 2010. p. 8-12.
11. HUIJBEN, Frank; VAN HERWIJNEN, Frans; NIJSSE, Rob. Concrete shell structures revisited: Introducing a new 'low-tech' construction method using vacuumatics formwork. In: *Structural Membranes 2011: Proceedings of the 5th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Barcelona, Spain, 5-7 October 2011*. CIMNE, 2011.
12. COOK, John, et al. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental research letters*, 2013, 8.2: 024024.
13. HANSEN, James, et al. Assessing "dangerous climate change": Required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature. *PloS one*, 2013, 8.12: e81648.
14. FROGGATT, Antony; ROUHAUD, Estelle; SVAČINOVÁ, Tereza. The importance of Coherent and integrated energy and agriculture policies in Meeting eU Climate Change objectives. *The EU, the US and global climate governance*, 2014, 95-114.

15. VEENENDAAL, Diederik; WEST, Mark; BLOCK, Philippe. History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. *Structural Concrete*, 2011, 12.3: 164-177.
16. WEST, M.; ARAYA, R. Recent fabric formwork construction projects. In: *Second International Conference on Flexible Formwork*. University of Bath: Bath. 2012.
17. ISLER, Heinz. Concrete shells derived from experimental shapes. *Structural engineering international*, 1994, 4.3: 142-147.
18. ADAM, Jean-Pierre. *Roman building: materials and techniques*. Routledge, 2005.
19. MEYER, Christian; SHEER, Michael. Do concrete shells deserve another look?. *Concrete international*, 2005, 27.10: 43-50.
20. OLSSON, Ola; BILLETER, Markus; ASSARSSON, Ulf. Clustered deferred and forward shading. In: *Proceedings of the Fourth ACM SIGGRAPH/Eurographics conference on High-Performance Graphics*. Eurographics Association, 2012. p. 87-96.
21. BLETZINGER, Kai-Uwe, et al. Computational methods for form finding and optimization of shells and membranes. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2005, 194.30-33: 3438-3452.
22. CONLON, C. James Waller's contribution to the advancement of shell roof construction and fabric formed concrete. In: *2nd International Conference on Flexible Formwork (Orr J. et al eds)*, University of Bath. 2012.
23. HAWKINS, Will J., et al. Flexible formwork technologies—a state of the art review. *Structural Concrete*, 2016, 17.6: 911-935.
24. BALDING, D. Testing and analysis of geogrid-reinforced thin-shell masonry. *MEng thesis*, University of Cambridge, 2013.
25. VEENENDAAL, Diederik; WEST, Mark; BLOCK, Philippe. History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. *Structural Concrete*, 2011, 12.3: 164-177.
26. NEIGHBOR, Noel; SOUTH, David B. An evaluation of the monolithic dome construction method for biological containment structures. *Journal of the American Biological Safety Association*, 1997, 2.1: 39-46.
27. HAWKINS, Will J., et al. Flexible formwork technologies—a state of the art review. *Structural Concrete*, 2016, 17.6: 911-935.
28. ORR, John, et al. Durability enhancements using fabric formwork. *Magazine of Concrete Research*, 2013, 65.20: 1236-1245.
29. LU, K.; ACCORSI, M.; LEONARD, J. Finite element analysis of membrane wrinkling. *International Journal for numerical methods in engineering*, 2001, 50.5: 1017-1038.
30. WEST, Mark. Thin shell concrete from fabric molds. *University of Manitoba*, [http://umanitoba.ca/cast\\_Final structure with oriented funnels](http://umanitoba.ca/cast_Final_structure_with_oriented_funnelns), 2009.

31. ORR, John. *Flexible formwork for concrete structures*. 2012. PhD Thesis. University of Bath.
32. NEWMAN, John; CHOO, Ban Seng (ed.). *Advanced concrete technology set*. Elsevier, 2003.
33. BRENNAN, Julie, et al. The potential of advanced textiles for fabric formwork. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 2013, 166.4: 229-237.
34. VEENENDAAL, Diederik; BLOCK, Philippe. Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork. *Engineering structures*, 2014, 75: 39-50.
35. KRISTENSEN, Mathias Kraemmergaard; JEPSEN, Christian Raun. *Flexible mat for providing a dynamically reconfigurable double-curved moulding surface in a mould*. U.S. Patent No 9,168,678, 2015.
36. TANG, Gabriel; PEDRESCHI, Remo. Deployable gridshells as formwork for concrete shells. In: *Proceedings of IASS Annual Symposia*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2015. p. 1-12.
37. CAUBERG, Niki, et al. Shell elements of textile reinforced concrete using fabric formwork: a case study. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15.4: 677-689.
38. NEVILLE, Adam M. *New concrete technologies and building design*. Halsted Press, 1980.
39. ORR, John. *Flexible formwork for concrete structures*. 2012. PhD Thesis. University of Bath.
40. TAERWE, Luc. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Second International RILEM Symposium*. CRC Press, 2004.
41. ORR, John, et al. Innovative reinforcement for fabric formed concrete structures. 2011.
42. VEENENDAAL, Diederik; WEST, Mark; BLOCK, Philippe. History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. *Structural Concrete*, 2011, 12.3: 164-177.
43. TUWIENPRMEDIA. Betonkuppel zum Aufblasen. *YouTube* [online]. 3 June 2014. [Accessed 6 September 2020]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=1s-ClIhWRNU>
44. COLLINS, David. The Monolithic Dome. *Monolithic Dome Institute* [online]. [Accessed 6 September 2020]. Available from: <https://www.monolithic.org/domes>
45. VEENENDAAL, Diederik, WEST, Mark and BLOCK, Philippe. History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. *Structural Concrete*. 2011. Vol. 12, no. 3p. 164–177. DOI 10.1002/suco.201100014.



## Priedai

### *1 priedas. Betono gniuždymo stiprio nustatymas T - betono mišinio ruošimo ceche suformuotiems bandiniams*

Bandinio žymėjimas	Pagam. data	Išband. data	Laik. sąl.	Matmenys, mm			Orasaus. band. masė, g	Betono (skiedinio) tankis kg/m <sup>3</sup>	Vidut. tankis, kg/m <sup>3</sup>	Preso parodymai, kN	Gniuž. stipris, MPa	Imties reikšmė	Vidutinis gn. stipris MPa	Stand. nuokr. MPa	Variac. k-tas, V	Gniužd. pavirš. pl., mm	Šonų statmen., mm	
T-1	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	151	150	8195,6	2412	2413	1090,1	48,1	48,2	46,2	1,33	0,029	-	-	
T-2	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8207,8	2432		1084,6	48,2							
T-3	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8139,8	2412		1069,1	47,5							
T-4	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8184,3	2425		949,0	42,2							44,8
T-5	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	151	150	8186,1	2409		1099,7	48,6							
T-6	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8169,3	2421		1036,5	46,1							47,3
T-7	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8107,6	2402		1036,1	46,0							
T-8	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8101,6	2400		1015,2	45,1							45,6
T-9	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	151	150	150	8180,1	2408		1019,9	45,0							
T-10	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8134,8	2410		1009,5	44,9							44,9
T-11	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8167,2	2420		1016,4	45,2							
T-12	20.05.29	20.06.26	Vandenyje	150	150	150	8124,8	2407		1066,1	47,4							46,3

Žymėjimas: T - betono mišinio ruošimo ceche suformuoti bandiniai.

Aplinkos oro temperatūra: 27,4 °C

Santykinis drėgnis: 53,9 %

**2 Priedas. Betono gniuždymo stiprio nustatymas TO - statybos aikštelėje suformuotiems bandiniams**

Bandinio žymėjimas	Pagam. data	Išband. data	Laik. sąl.	Matmenys, mm			Orasaus. band. masė, g	Sukietėjusio betono tankis kg/m <sup>3</sup>	Vidut. tankis, kg/m <sup>3</sup>	Preso parodymai, kN	Gniužd. stipris MPa	Imties reikšmė	Vidutinis gn. stipris MPa	Stand. nuokr. MPa	Variac. k-tas, V	Gniužd. pavirš. pl., mm	Šonų statmen., mm
TO-1	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	104	152	5479,5	2280	2301	730,1	46,2	46,2	45,8	2,67	0,058		
TO-2	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	112	153	5895,6	2263		834,5	49,0	49,0					
TO-3	20.05.29	20.06.26	Objekte	151	117	152	6124,6	2281		804,0	45,5	45,5					
TO-4	20.05.29	20.06.26	Objekte	151	103	153	5586,1	2347		747,4	48,1	48,1					
TO-5	20.05.29	20.06.26	Objekte	153	109	152	5890,1	2324		743,7	44,6	44,6					
TO-6	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	114	153	6076,0	2289		720,1	41,5	41,5					
TO-7	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	100	152	5257,1	2275									
TO-8	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	110	152	5761,7	2267									
TO-9	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	102	151	5340,5	2281									
TO-10	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	99	152	5327,2	2329									
TO-11	20.05.29	20.06.26	Objekte	153	99	152	5363,1	2329									
TO-11	20.05.29	20.06.26	Objekte	152	106	153	5783,1	2346									

Žymėjimas: TO - statybos aikštelėje suformuoti bandiniai naudojant šlapio torkretavimo technologiją.

**3 priedas. Betono gaminių atsparumas šalčiui T - statybos aikštelėje suformuotiems bandiniams**

Imties Nr.	Bandinio žymėjimas	Bandymo data	Matmenys, mm			Masė, g		Ciklų skaičius	Preso parody- mai, kN	Gniuždymo stipris, MPa		Bandinių išvaizda	Gniuždymo stiprio pokytis		Masės, kg		Msės pokytis	
						Prieš šaldymą	Po šaldymo			Reikšmės įvertinus $\alpha$	Vidutinė reikšmė		MPa	%	Vidutinė reikšmė	kg	%	
			a	b	h													
1	T-13	2020.06.26	99	101	101	2396,5		Prieš šaldymą	584,6	55,5	55,2	nėra			2408,0			
	T-14		100	101	100	2412,4			593,0	55,8		nėra						
	T-15		101	101	101	2415,0			582,9	54,3		nėra						
	T-16	2020.08.24	101	101	101	2456,5	2454,4	150	575	53,5	56,2	nėra	0,98	1,77	2433,8	25,87	1,07	
	T-17		100	100	101	2426,9	2423,0		626,2	59,5		nėra						
	T-18		101	99	101	2418,1	2412,7		584,1	55,5		nėra						
	T-19		100	101	100	2420,1	2416,8	200	565,8	53,2	57,7	nėra	2,53	4,58	2422,4	14,47	0,60	
	T-20		100	100	101	2431,9	2431,2		604,6	57,4		nėra						
	T-21		100	100	100	2415,3	2412,5		658,3	62,5		nėra						

Žymėjimas: T - betono mišinio ruošimo ceche suformuoti bandiniai.

**4priedas. Betono gaminių atsparumas šalčiui TO - statybos aikštelėje suformuotiems bandiniams**

Imties Nr.	Bandinio žymėjimas	Bandymo data	Matmenys, mm			Masė, g		Ciklų skaičius	Preso parodymai, kN	Gniuždymo stipris, MPa		Bandinių išvaizda	Gniuždymo stiprio pokytis		Masės, kg		Msės pokytis	
						Prieš šaldymą	Po šaldymo			Reikšmės įvertinus $\alpha$	Vidutinė reikšmė		MPa	%	Vidutinė reikšmė	kg	%	
			a	b	h													
1	TO-7	2020.06.26	101	99	101	2379,1		Prieš šaldymą	512,1	48,7	44,0	nėra			2383,6			
	TO-8		101	101	103	2435,0			451,3	42,0		nėra						
	TO-9		102	98	101	2336,7			436,0	41,4		nėra						
	TO-10		102	98	100	2317,9	2357,1	150	438,2	41,6	48,3	nėra	4,26	9,67	2363,8	-19,77	-0,83	
	TO-11		101	99	102	2383,8	2419,8		538,2	51,1		nėra						
	TO-12		99	101	102	2389,8	2422,5		548,6	52,1		nėra						
	TO-13		102	100	103	2386,3	2437,6	200	473,4	44,1	48,4	nėra	4,40	9,99	2336,1	-47,47	-1,99	
	TO-14		101	97	101	2310,7	2357,6		536,9	52,1		nėra						
	TO-15		102	97	102	2311,4	2355,1		512,0	49,2		nėra						

Žymėjimas: TO - statybos aikštelėje suformuoti bandiniai naudojant šlapio torkretavimo technologiją.