



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Olga Finoženok

**BETONO ATLIEKŲ ANTRINIO NAUDOJIMO BETONO MIŠINIUOSE
GALIMYBIŲ TYRIMAI**

**THE RESEARCH OF POSSIBILITIES CONCRETE WASTE USAGE IN THE
FURTHER PRODUCTION OF CONCRETE COMPOSITE**

Baigiamasis magistro darbas

Statybos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 61202T112

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Romualdas Mačiulaitis

(Vardas, pavardė)

(Data)

Olga Finoženok

**BETONO ATLIEKŲ ANTRINIO NAUDOJIMO BETONO MIŠINIUOSE
GALIMYBIŲ TYRIMAI**

**THE RESEARCH OF POSSIBILITIES CONCRETE WASTE USAGE IN THE
FURTHER PRODUCTION OF CONCRETE COMPOSITE**

Baigiamasis magistro darbas

Statybos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 61202T112

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas doc. dr. Ramunė Žurauskienė

(Parašas)

(Data)

Konsultantas doc. dr. Zofija Babickienė

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Technologijos .mokslo sritis

Statybos inžinerija mokslo kryptis

Statybos inžinerija studijų kryptis

Statybos medžiagos ir dirbiniai studijų programa, valstybinis kodas 62402T109

.....specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Prof. Romualdas Mačiulaitis

(Vardas, pavardė)

2009 01 05

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2009..... Nr.

Vilnius

Studentui (ei)

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema

Betono atliekų antinio naudojimo
betono mišinioose palikėis

patvirtinta 2008 m. gruodžio mėn. 10 d. dekanų įsakymu Nr. 388 st.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2009 m. birželio 01 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti lituotųjų gipsvalgų baigiamojo darbo temą.
Parinkti žaliavą, iš kurių naudojant standartinių tyrimo
metodus Parinkti betono mišinį sukuriant pagal pateiktas metodu-
kas ir susiformuoti bandinius. Įdėti mechanines sąveikas,
nustatyti struktūrines charakteristikas. Įrašyti praeities rezultata-
tus, pateikti išvadas. Pateikti išnagrinėto lituotųjų gipsvalgų
baigiamojo darbo temą.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas

(Paraša)

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Statybos fakultetas

Statybinių medžiagų katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 2

Data 2009-05-18

Statybos medžiagos ir dirbiniai studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Betono atliekų antrinio naudojimo betono mišiniuose galimybių tyrimai**

Autorius **Olga Finoženok**

Vadovas doc. dr. **Ramunė Žurauskienė**

Kalba

☒ lietuvių
☐ užsienio

Anotacija

Baigiamojo magistro darbo tikslas yra ištirti betono atliekų antrinio naudojimo betono mišiniuose galimybes. Tikslui pasiekti atlikta techninės bei mokslinės literatūros analizė, išnagrinėtos bendros žinios apie betoną, jo struktūrą, savybes. Baigiamajame darbe nagrinėjami betoninių ir gelžbetoninių atliekų perdirbimo ir panaudojimo klausimai. Išnagrinėjus betono žaliavų tyrimo metodus, buvo ištirtos medžiagos, naudojamos betono atliekų gamyboje. Betono, pagaminto naudojant betono atliekas, kaip stambų užpildą, sudėtis parinkta naudojantis lentelėmis, grafikais ir nomogramomis.

Eksperimentinėje – tiriamojoje dalyje išdėstyti žaliavų naudojamų betono gamyboje, tyrimo rezultatai, pateiktos pagal pasirinktą metodiką apskaičiuotos betono sudėtys. Šiame tiriamajame darbe betono gamybai buvo naudotos betono atliekos vietoje stambaus užpildo ir nustatoma ar kinta standartinės stipruminės betono savybės ir tiriamos struktūrinės sukietėjusio betono savybės.

Išnagrinėjus teorines ir praktines betono atliekų panaudojimo galimybes, vietoj stambiojo užpildo, tokio kaip granitinė ir žvyro skalda galima teigti, kad naudojant trupintas betono atliekas galima gauti panašių savybių betono gaminius. Darbo gale pateikiamos baigiamojo darbo išvados.

Darbą sudaro 3 dalys: įvadas, tyrimo objektas, tyrimo metodai, eksperimentinė – tiriamoji dalis, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 63 p. teksto be priedų, 27 iliustracijos, 27 lentelės, 33 formulės ir 51 bibliografinis šaltinis.

Prieduose pridedamas straipsnis, publikuotas Jaunųjų mokslininkų konferencijos leidinyje „Mokslas – Lietuvos ateitis“.

Prasminiai žodžiai: betonas, statybinės atliekos, užpildai, skalda, stipris gniuždant, ilgaamžiškumas, struktūrinės savybės.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Building Materials

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2009-05-18

Construction Materials and Products study programme master thesis.

Title: **The research of possibilities concrete waste usage in the further production of concrete composite**

Author **Olga Finoženok**

Academic supervisor **doc. dr. Ramunė Žurauskienė**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

The goal of final master work is to exam the possibility of concrete's waste recycling in concrete's compound. The analysis of technical and scientific literature was made to reach the goal, also the common information about concrete and its structure and properties was explored. The questions of concrete and reinforced concrete waste recycling was analysed in this final work. After exploring concrete stock's research methods, the material, used in concrete's waste production was examed. The consist of concrete, produced using concrete's waste like a big filling, was selected using tables, diagrams and monograms.

The results of stock's used in concrete's production research was reported experimental – exploratory part. Also concrete's consists, calculated with selected method, was presented. Concrete waste instead of big filling was used to produce concrete in this exploratory work. Was tested if standard strength properties change and was examed structural callous concrete's properties.

After research of theoretical and practical concrete waste's usage possibilities, when it is used instead of a big filling such as granitic or gravel breakstone, we can state, that we can get concrete products with similar properties using shatter concrete waste. The findings of final work are reported in the end of work.

The final work consist of 3 parts: introduction, the subject of research, the research methods, experimental – exploratory part, conclusions and the list of literature.

Thesis consist of: 63 p. text without appendixes, 27 pictures, 27 tables, 33 formulas, 51 bibliographical entries.

The article, published in "Science – The Future Of Lithuania" is attached in supplements.

Keywords: concrete, constructional waste, fillings, breakstone, strenght, durability, structural properties.

TURINYS

IVADAS	10
1. TYRIMO OBJEKTAS	11
1.1. PASAULIO MOKSLININKŲ STATYBINIŲ ATLIEKŲ PANAUDOJIMO BETONUI GAMINTI TYRIMAI	11
1.2. BETONO ATLIEKOS IR JŲ PANAUDOJIMAS	12
<i>1.2.1. Betono atliekų atsiradimas</i>	<i>12</i>
<i>1.2.2. Betono skalda iš atliekų ir jos panaudojimas</i>	<i>12</i>
<i>1.2.3. Betono skaldos iš atliekų gamyba</i>	<i>13</i>
1.3. BETONAS IR JO KLASIFIKACIJA	17
1.4 BETONO SUDĖTIES REIKALAVIMAI	20
1.5 BETONO SUDĖTIES ŽALIAVOS	24
<i>1.5.1. Stambūs užpildai</i>	<i>24</i>
<i>1.5.2. Smėlis.....</i>	<i>25</i>
<i>1.5.3. Cementas</i>	<i>26</i>
<i>1.5.4. Vanduo</i>	<i>26</i>
1.6. BETONO STRUKTŪRA	26
<i>1.6.1. Submikrostruktūra.....</i>	<i>27</i>
<i>1.6.2. Mikrostruktūra.....</i>	<i>27</i>
<i>1.6.3. Mezostruktūra</i>	<i>27</i>
<i>1.6.4. Makrostruktūra.....</i>	<i>28</i>
<i>1.6.5. Megastruktūra.....</i>	<i>28</i>
1.7. BETONO MIŠINIO SAVYBĖS.....	29
1.8. BETONO STIPRUMAS.....	30
2. TYRIMO METODAI IR BETONO SUDĖTIES PARINKIMAS...34	34
2.1. ŽALIAVŲ IR BANDINIŲ TYRIMO METODAI	34
<i>2.1.1. Smėlio tyrimo metodai</i>	<i>34</i>
<i>2.1.2. Portlandcemenčio tyrimo metodai.....</i>	<i>36</i>

2.1.3. Stambiojo užpildo, pagaminto iš betono atliekų tyrimas.....	37
2.1.4. Betono bandinių stipruminių savybių tyrimas.....	38
2.1.5. Betono struktūrinių savybių tyrimas.....	39
2.2. BETONO SUDĖTIES PROJEKTAVIMO METODAI	42
2.3. BETONO BANDINIŲ GAMYBA	48
3. EKSPERIMENTINĖ – TIRIAMOJI DALIS	49
3.1. ŽALIAVŲ BANDYMŲ REZULTATAI	49
3.2. TIRIAMOJO BETONO SUDĖTYS IR BANDINIŲ GAMYBA	51
3.3. BETONO STIPRUMINĖS SAVYBĖS	52
3.4. BETONO BANDINIŲ STRUKTŪRINĖS SAVYBĖS	57
IŠVADOS	61
LITERATŪRA	62
PRIEDAS	65

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Betono atliekų skalda.....	12
2 pav. Statybos atliekų perdirbimas griovimo aikštelėje.....	13
3 pav. Statybinių atliekų perdirbimas betono skaldos gamyklos teritorijoje.....	13
4 pav. Ekskavatoriai.....	14
5 pav. Hidraulinės žirklys	14
6 pav. Statybinių atliekų trypinimas.....	14
7 pav. Žiauninio trupintuvo schema	15
8 pav. Skirtingų frakcijų betono skaldos iš statybinių atliekų gamybos technologija.....	16
9 pav. Normalaus betono struktūros schema.....	26
10 pav. Betono megastruktūros tipai.....	28
11 pav. Slankumo matavimo kūgis ir suslūgimo atvejai.....	29
12 pav. Betono bandinių irimo gniuždant pobūdis.....	30
13 pav. Betono idealios struktūros modelis ir irimo schema.....	30

14 pav. Betono irimo pobūdis.....	31
15 pav. Betono stiprumo kitimas priklausomai nuo kietėjimo trukmės ir aplinkos temperatūros.....	31
16 pav. 16 pav. Betono stiprumo kitimas priklausomai nuo kietėjimo trukmės, kai kietėjimo aplinkos temperatūra + 80 °C	32
17 pav. Vandens kiekio nustatymo grafikas.....	42
18 pav. Skaldos iš betono atliekų granulimetrinės sudėties kreivė.....	48
19 pav. Smėlio granulimetrinės sudėties kreivė.....	49
20 pav. Betono stiprio priklausomybė nuo kietėjimo trukmės.....	52
21 pav. Betono bandiniai po gniuždymo: a – bandinys pažymėtas B _E žymeniu; b – bandinys pažymėtas B-II žymeniu.....	53
22 pav. Betono bandiniai po gniuždymo: a – bandinys pažymėtas B-II žymeniu; b – bandinys pažymėtas B-III žymeniu.....	53
23 pav. Etaloninio ir B-I bandinių stiprio priklausomybė nuo kietėjimo trukmės.....	54
24 pav. Etaloninio ir B-I, B-II, B-III betono bandinių stipris (procentais nuo klasinio stiprio) po 3 kietėjimo parų.....	55
25 pav. Sugniuždyto betono bandinio fragmentas.....	56
26 pav. Betono bandinių įmirkis normaliomis sąlygomis.....	56
27 pav. Betono bandinių tankis.....	57

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Trupintuvo BB 120 T techniniai duomenys	15
1.2 lentelė. Normaliojo ir sunkiojo betono stiprio gniuždant klasė	17
1.3 lentelė Lengvojo betono stiprio gniuždant klasė.....	18
1.4 lentelė. Aplinkos poveikio klasės.....	20
1.5 lentelė. Gamtinio grunto ir gruntinio vandens cheminio agresyvumo ribinių rodiklių vertės pagal aplinkos poveikio klases.....	21
1.6 lentelė. Rekomenduojamieji betono sudėčių ir savybių apribojimai.....	22
1.7 lentelė. Užpildų granulimetrinės sudėties bendrieji reikalavimai.....	23
1.8 lentelė. Išbirų per vidurinįjį sieta absoliutinės ribos ir leistinieji nuokrypiai.....	24
1.9 lentelė. Užpildų kategorijos pagal smūginio trupio didžiausias vertes.....	24
1.10 lentelė. Cemento klasės pagal stiprį gniuždant.....	25
2.1 lentelė. Struktūros išvestiniai rodikliai ir jų apskaičiavimo metodika.....	39
2.2 lentelė. Koeficiento A reikšmės	41

2.3 lentelė. Užpildo tuštumų perpildymo koeficientai.....	42
2.4 lentelė. Koeficiento A reikšmės priklausomai nuo naudojamų užpildų.....	43
2.5 lentelė. Koeficientų K_1 ir K_2 reikšmės.....	44
2.6 lentelė. Optimalus skaldos frakcijų santykis.....	45
3.1 lentelė. Skaldos iš betono atliekų pagrindinės savybės.....	48
3.2 lentelė. Pagrindinės smėlio savybės.....	49
3.3 lentelė. Cemento fizikinės – mechaninės savybės.....	49
3.4 lentelė. Cemento cheminės savybės.....	49
3.5 lentelė. Pagrindinės nustatytosios portlandcemenčio savybės.....	50
3.6 lentelė. Portlandcemenčio tešlos normalaus tirštumo nustatymo rezultatai.....	50
3.7 lentelė. Betono mišinių sudėtys.....	51
3.8 lentelė. Betono stiprio gniuždant nustatymo rezultatai.....	51
3.9 lentelė. Betono stiprio gniuždant didėjimas.....	52
3.10 lentelė. Etaloninio bandinio B_E struktūros išvestiniai rodikliai.....	58
3.11 lentelė. B-II betono bandinių struktūros išvestiniai rodikliai.....	59

IVADAS

Betonas yra vienas iš seniausių statybinių medžiagų. Įvairios paskirties pastatams ir kitokiems statiniams betonas naudojamos jau XVIII a. vidurio. Betonas, kaip patikima statybinė medžiaga, dėl savo gerų savybių naudojamas visame pasaulyje. Betono gamyba susijusi su nemažomis energijos sąnaudomis, pradedant nuo žaliavų paruošimo ir baigiant produkcijos transportavimu. Todėl labai svarbu visuose gamybos etapuose energijos sąnaudas sumažinti iki minimumo.

Betoninių ir gelžbetoninių atliekų perdirbimo ir tvarkymo klausimai aktualūs šiais laikais, nes vis daugiau griunama senų pastatų, o statybos atliekoms skiriama ne tiek daug dėmesio. Kasmet pasaulyje susidaro 2,5 mlrd. tonų statybinių atliekų, tarp jų Europoje – 200 mln. tonų, Lietuvoje – 200–250 tūkst. tonų. Atitinkamai perdirbus betono ir gelžbetonio atliekas, galima jas naudoti statybose ir statybinių medžiagų pramonėje. Vietoj karjeruose gautos dolomitinės ar granitinės skaldos, naudoti sutrupintas betono atliekas.

Lietuvoje betono atliekų panaudojimas yra silpnai išvystytas, o žinant, kad stambių užpildų ištekliai riboti, šis klausimas tampa labai aktualiu. Mano darbo tikslas yra ištirti betono atliekų panaudojimo betono mišiniuose galimybes, gaminant normalųjį betoną.

Lietuvoje, norint išvystyti betono ir gelžbetonio atliekų panaudojimą betono mišiniuose, reikia atlikti nemažai tyrimų, todėl šiame tiriamajame darbe betono gamybai buvo naudotos betono atliekos vietoje stambaus užpildo ir nustatoma ar kinta standartinės stipruminės betono savybės ir tiriamos struktūrinės sukietėjusio betono savybės.

Mano tiriamojo darbo tikslas yra ištirti antrinio betono panaudojimo galimybes vietoj stambiojo užpildo, tokio kaip dolomitinė, granitinė ir žvyro skalda.

1. TYRIMO OBJEKTAS

1.1. Pasaulio mokslininkų statybinių atliekų panaudojimo betonui gaminti tyrimai

Betono gamyba yra plačiai paplitusi visame pasaulyje. Jo gamybai naudojamos medžiagos nėra deficitinės. Ekologiniu aspektu, betonas yra ideali terpė naudojant jo gamyboje produkto perdirbimo ir kitas atliekas, kurios būtų išvežtos į sąvartynus.

Betono gamyboje naudojamo stambiojo ir smulkiojo užpildo kilmė gali būti įvairi. Mokslininkai savo darbuose yra išnaginę tokias medžiagas, kaip: stiklo laužas [33], aukštakrosnių peleniai [32], medienos atliekos [15], susmulkintos klinties ir betono atliekų mišinys [34], vulkaninių pelenų pėma [4].

Mokslininkai atliko produkto, gaunamo perdirbus betono ir gelžbetonio atliekas, tyrimus. Ištyrę skaldos iš betono atliekų frakcijų 5–40 mm sudėtis tyrėjas nustatė, kad tokios skaldos sudėtis artima skaldos sudėčiai iš natūralių uolienų ir atitinka reikalavimus, keliamus natūraliai skaldai. Tokia skalda išlaiko iki 100 šaldymo bei atitirpinimo ciklų. Nustatyta, kad 5–10 mm skaldos tankis yra 1,4–1,58 g/cm³. Mokslininkai taip pat nustatė skaldos iš betono atliekų vandens poreikį, maišant betono mišinį. Šis kiekis priklauso nuo skaldos frakcijos: 0–5 mm skaldos vandens poreikis 12,8 %, 5–10 mm – 10,1 %, 10–20 mm – 8,2 %, 20–40 mm – 6,1 % [39].

Italų mokslininkai [33] parinko skirtingas betono sudėtis, kurių sudėtyje buvo stiklo laužas, keramzitas ir žvirgždas. Po 28 parų kietėjimo buvo nustatomas stipris gniuždant. Mažiausią gniuždomąjį stiprį pasiekė betonai, kurių sudėtyje buvo 0,52 mm, 2–16 mm dalelių dydžio stiklo laužas ir 0,5–2 mm keramzitas, 2–16 mm stiklo laužas (stipris gniuždant buvo atitinkamai 4,2 MPa ir 7,4 MPa). Didžiausią stiprį (35,1 MPa) įgijo betonas, kurio sudėtyje buvo 0,5–2 mm keramzitas ir 2–16 mm žvirgždas.

Šiais laikais mediena plačiai naudojama, yra daug medienos apdirbimo cechų. Dėl to susidaro daug medienos (žievė, pjuvenos, medienos trupiniai, kelmai, viršūnės, šakos, atraižos ir kitos nesupuvusios atliekos) atliekų, kurias galima panaudoti kaip betono užpildą. Medienos atliekos yra tamptariai plastiška medžiaga, kuri pasižymi tamprumo, plastiškumo ir klampumo savybėmis. Medienos atliekų tamprumas priklauso nuo medienos veislės, medienos užpildų plastiškumas priklauso nuo drėgčio, drėgnesne mediena yra plastiškesnė, sausesnė–stipresnė gniuždant. Medienos užpildai turi neigiamų savybių – susitraukimo deformacijos, keičiantis aplinkos drėgčiai ir temperatūrai [3, 15]. Užpildų iš medienos atliekų ilgis turi būti nuo 10 iki 40 mm, storis 0,2–1 mm. Tokie parametrai geriausi, nes yra optimalūs savitasis paviršiaus plotas ir mažiausios drėgminės deformacijos džiūstant, mažiausios tampriosios jėgos formuojant dirbinius. Medienos atliekos naudojamos cementiniams betonams gaminti.

Mokslininkai iš Didžiosios Britanijos [34] tyrė sugriautų pastatų atliekų panaudojimą naujo betono gamyboje. Taip pat mokslininkas ištyrė betoną, kurio sudėtyje stambus ir smulkus užpildas buvo pagamintas iš betono atliekų, o cemento sąnaudos minimalios ($100\text{--}215\text{ kg/m}^3$). Tokio betono stipris gniuždant po 7 kietėjimo parų pasiekė $7,9\text{--}12,2\text{ MPa}$, o po 28 parų – $8,4\text{--}12,9\text{ MPa}$.

Tyrėjų grupė [1] lengvojo betono gamyboje vietoje natūralaus smėlio panaudojo krosnių pelenus. Po 150 parų stipris gniuždant buvo didesnis nei 20 MPa .

Mokslininkai iš Hong Kong Politechninio universiteto ištyrė sugriautų betono ir gelžbetonio konstrukcijų atliekų panaudojimą kaip užpildą trinkelų gamyboje. Pagamintų trinkelų tankis buvo nuo 2109 iki 2276 kg/m^3 , stipris gniuždant po 28 kietėjimo parų nuo $39,3$ iki $65,1\text{ MPa}$, vandens įgeriamumas nuo $5,8$ iki $12,7\%$ [2].

1.2. Betono atliekos ir jų panaudojimas

1.2.1. *Betono atliekų atsiradimas*

Betoninių ir gelžbetoninių atliekų perdirbimo ir tvarkymo problemos aktualios šiais laikais, nes vis daugiau griauinama senų pastatų ir statybos atliekoms skiriama ne tiek daug dėmesio.

Kas tai yra statybos atliekos? Statybos atliekos – tai atliekos susidarančios statant, rekonstruojant, remontuojant ar griauinant statinius pagal teisės norminių aktų nustatytus reikalavimus parengtą, suderintą ir patvirtintą projektą, taip pat statybos gaminių brokas. Kasmet pasaulyje susidaro $2,5$ mlrd. tonų statybinių atliekų, tarp jų Europoje – 200 mln. tonų, Lietuvoje – $200\text{--}250$ tūkst. tonų. Visos tos atliekos yra perdirbamos su specialia įranga arba užkasamos sąvartynų gruntuose [11, 45, 46].

Kiekvieną dieną statybos aikštelėse ar griauinant senus pastatus, atsiranda daug betono atliekų, kurias galima panaudoti kaip betono stambų užpildą. Be to statybos pramonė reikalauja didelio kiekio skaldos, smėlio, kurių didelę dalį galima gauti perdirbant betono ir gelžbetonio atliekas. Gaminant skaldą iš natūralių uolienų, energijos sąnaudos yra 8 kartus didesnės, negu gaminant skaldą iš betono ir gelžbetonio atliekų, o betono su užpildais iš antrinio betono savikaina sumažėja 25% [46].

1.2.2. *Betono skalda iš atliekų ir jos panaudojimas*

Antrinė betono skalda – tai skalda, gauta sumalus betono ir gelžbetonio konstrukcijų atliekas. Susmulkinus betono atliekas gaunamas skirtingų frakcijų užpildų mišinys. Populiariausia tokios skaldos frakcija $0\text{--}70\text{ mm}$. 1 paveiksle pateikiami prasijotos betono skaldos frakcijos vaizdai. Tokia skalda buvo naudojama antrinio naudojimo betono mišinių gamyboje.



a) 10–20 mm

b) 5–10 mm

1 pav. Betono atliekų skalda [autorės]

Antrinė betono skalda naudojama:

- Statybų aikštelėse įrengiant laikinus kelius ir pravažiuojimus;
- Silpnų gruntų sustiprinimui;
- Tvarkant aplinką, įrengiant šaligatvius, perėjimo takelius;
- Kaip stambus užpildas betono gamyboje, kurio stiprumas 5–20 MPa [9, 10, 11].

Taip pat antrinę betono skaldą galima naudoti naujose statybose, betonuojant pamatus, įrengiant automobilių stovėjimo aikšteles, tiesiant arba remontuojant lauko vandentiekio ir lauko kanalizacijos vamzdžius.

Europos šalyse antrinis betono panaudojimas yra labai išplėtotas, kadangi naudojama apie 90 % visų betono atliekų, o Lietuvoje antrinio betono panaudojimas sudaro apie 10–15 %. Kadangi mūsų šalyje betono atliekų panaudojimas yra silpnai išvystytas, todėl mano tikslas yra ištirti visas betono atliekų panaudojimo galimybes, gaminant normalųjį betoną.

1.2.3. Betono skaldos iš atliekų gamyba

Statybinių atliekų perdirbimas dažniausiai atliekamas naudojant specialią smulkinimo ir rūšiavimo įrangą. Perdirbant atliekas ir nekondicinę statybinių produkciją naudojami du pagrindiniai būdai:

- 1) Susidariusių atliekų perdirbimas jų atsiradimo vietoje – statybvietėje (2 pav.) [8, 10];
- 2) Atliekų perdirbimas betono skaldos gamybos ceche (3 pav.) [8, 10, 45].



2 pav. Statybos atliekų perdirbimas griovimo aikštelėje [13]



3 pav. Statybinių atliekų perdirbimas betono skaldos gamyklos teritorijoje [13]

Perdirbant atliekas statybvietėje ne visada yra galimybė naudoti labai aukštos kokybės įrenginius, kurie užtikrintų švarų ir frakcionuotą produktą. Be to toks gamybos būdas, ekologiniu požiūriu yra teršiantis orą šalia esantiems gyvenamiesiems namams.

Gaminant skaldą betono skaldos gamyklos teritorijoje atsiranda transportavimo išlaidos, nes betono ir gelžbetonio atliekas iš griovimo aikštelės reikia pervežti į gamyklos teritoriją. Tačiau tokiu būdu gaunama skalda būna švaresnė, be to pati gamybos technologinė linija yra galingesnė, galinti perdirbti didesnę atliekų kiekį.

Betono skaldos gamybą sudaro tokie pagrindiniai etapai:

- Atliekų priėmimas ir pirminis paruošimas;
- Perdirbimo etapas;
- Sandėliavimas.

Priimant ir tvarkant atliekas, jos pirmiausia yra sandėliuojamos, atliekamas pirminis jų apdirbimas, trupinimas. Čia dažniausiai naudojami ekskavatoriai (4 pav.) ir hidraulinės žirklys (5 pav.), taip pat metalas atskiriamas nuo betono.



4 pav. Ekskavatoriai [7]



5 pav. Hidraulinės žirklys [7]

Antrame etape vyksta pagrindiniai atliekų perdirbimo procesai: trupinimas, smulkinimas, sijojimas, jei reikia plovimas. Perdirbimo procese naudojami trupintuvai, smulkintuvai, magnetiniai separatoriai, sijotuvai, oro separatoriai (termoizoliacijos, tapetų linoleumo ir kt. susmulkintoms priemonėms atskirti). 6 paveiksle pateikiamas betono skaldos trupinimo įrenginio fragmentas.



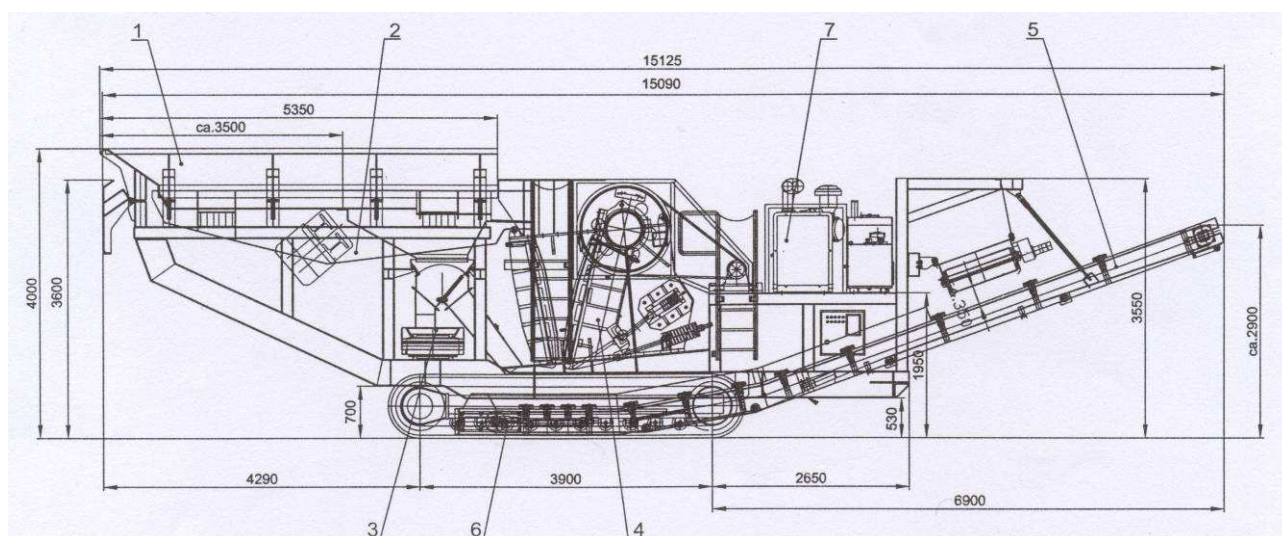
6 pav. Statybinių atliekų trupinimas [9]

Trupinimui naudojamas žiauninis trupintuvas BB 120 T, kuriame medžiaga trypinama tarp dviejų metalinių plokščių, tai yra žiaunų. Trupintuvo našumas 60–250 t/val. Tai priklauso nuo įkrovos angos dydžio ir trypinamos medžiagos charakteristikų.

Žiauninio trupintuvo BB 120 T techniniai duomenys pateikti 1.1 lentelėje, o 7 paveiksle pateikta trupintuvo schema.

1.1 lentelė. Trupintuvo BB 120 T techniniai duomenys

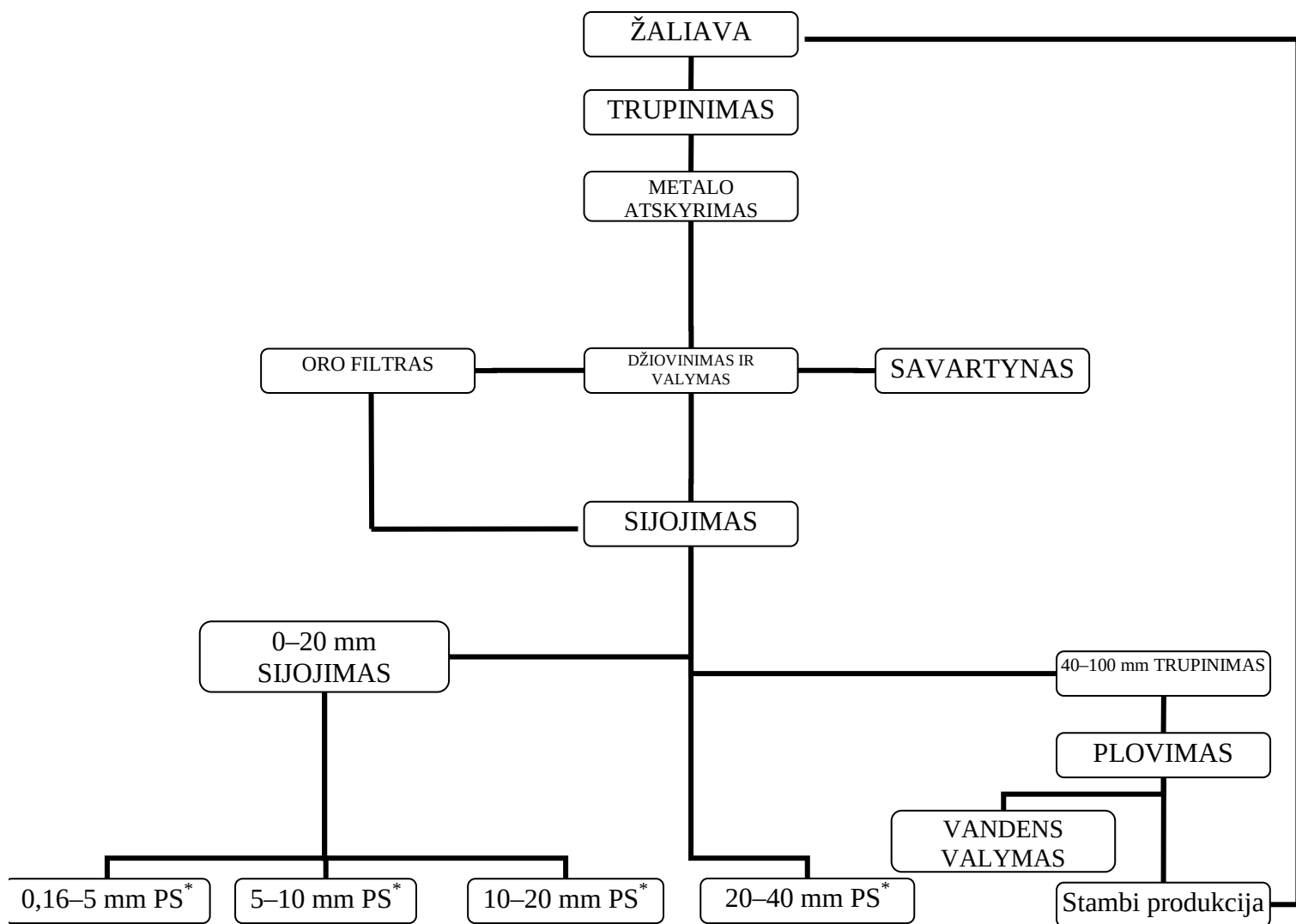
Parametras	Matavimo vienetas	Dydis
Sutrupintos medžiagos dydis	mm	0–45
Pakrovimo anga	mm	45–150
Našumas	t/val.	60–250
Svoris	t	46
Aukštis	mm	4000
Darbinis aukštis	mm	3600
Darbinis plotis	mm	2750
Darbinis ilgis	mm	15090



7 pav. Žiauninio trupintuvo schema: 1 – žaliavos pakrovimo anga; 2 – medžiagos padavimo įrenginys; 3 – cilindras su kiauryme ; 4 – trypinimo žiaunos; 5 – juostinis transporteris; 6 – pervežimo įrenginiai; 7 – variklis

Susmulkinta ir prasijota pro sietų rinkinius medžiaga gali būti plaunama, jei to reikalauja betono gamybos technologija, nes ant susmulkintų užpildų iš betono atliekų paviršiaus būna daug cemento dulkių ir kitų priemaišų. Pagal stambumą ir tankį, gauta skalda sandėliuojama atviro arba uždaro tipo sandėliuose.

Visa skaldos iš panaudoto betono gamybos technologija pavaizduota 8 paveiksle.



8 pav. Skirtingų frakcijų betono skaldos iš statybinių atliekų gamybos technologija [autorės]

* produkcijos sandėlis

1.3. Betonas ir jo klasifikacija

Betonas tai yra dirbtinis akmuo, kuris gaunamas sukietėjus racionaliai parengtos sudėties rišančiosios medžiagos, vandens ir užpildų mišiniui.

Betonas klasifikuojamas pagal:

- Tanki;
- Stiprumā;
- Užpildo rūši;
- Užpildu stambumā;

- Rišamosios medžiagos rūšį;
- Kietėjimo sąlygas;
- Paskirtį [3, 26, 29].

Pagal tankį (sausų gaminių po 28 parų kietėjimo) betonas skirstomas į:

- Sunkųjį – tankis didesnis nei 2600 kg/m^3 ;
- Normalųjį – tankis $2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$;
- Lengvąjį – tankis $800 - 2000 \text{ kg/m}^3$;
- Ypač lengvą – tankis iki 800 kg/m^3 [26].

Pagal stiprį betonas skirstomas į:

- Stiprųjį;
- Lengvąjį [3, 23].

1.2 lentelėje surašyti normaliojo ir sunkiojo betono stiprio gniuždant klasės ir jų mažiausieji charakteristiniai cilindriniai ir kubiniai stipriai. 1.3 lentelėje surašyti lengvojo betono stiprio gniuždant klasės ir mažiausieji charakteristiniai cilindriniai ir kubiniai stipriai [23].

1.2 lentelė. Normaliojo ir sunkiojo betono stiprio gniuždant klasė

Stiprio gniuždant klasė	Mažiausias charakteristinis cilindrinis stipris $f_{ck,cl} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	Mažiausias charakteristinis kubinis stipris $f_{ck,cube} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

1.3 lentelė Lengvojo betono stiprio gniuždant klasė

Stiprio gniuždant klasė	Mažiausias charakteristinis cilindrinis stipris $f_{ck,cl}$ (N/mm ²)	Mažiausias charakteristinis kubinis stipris $f_{ck,cube}$ (N/mm ²)
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Pagal užpildų rūšį, betonas būna:

- su tankiais;
- poringais;
- specialiais užpildais.

Priklausomai nuo užpildų stambumo, betonai gali būti:

- smulkiagrūdžiu, gaminamas tik su smulkiais užpildais, kurių dalelės iki 10 mm;
- stambiagrūdžiu, kurio užpildų dalelės gali būti iki 150 mm [3].

Pagal panaudotas rišančiąsias medžiagas, betonai skirstomi į:

1. cementinius, gaminamus iš hidraulinių rišančiųjų medžiagų;
2. gipsinius, gaminamus iš gipsinių arba anhidritinių rišančiųjų medžiagų;
3. silikatinčius, gaminamus iš kalkių;
4. asfaltbetonį ir plastbetonį, gaminamus iš organinių rišančiųjų medžiagų (bitumo, deguto, sintetinių dervų) [3].

Pagal kietėjimo sąlygas, betonas gali būti:

- kietėjęs natūralioje aplinkoje;

- šildytas atmosferiniame slėgyje;
- kaitintas autoklave.

Pagal paskirtį betonas skirstomas į:

1. Konstrukcinį, naudojamą gaminant laikančiąsias konstrukcijas. Tokio betono svarbiausia savybė yra stiprumas;
2. Konstrukcinį–termoizoliacinį, iš kurio gaminami laikantieji aitvariniai pastatų elementai. Tokie betonai turi būti stiprūs ir gerai izoliuoti šilumą;
3. Termoizoliacinį, kuris naudojamas pastatų ir statinių belementų šiluminei izoliacijai. Tokiam betonui būdingos geros termoizoliacinės savybės;
4. Hidroterminį, kuris dažniausiai naudojamas užtvankų statyboje. Jis turi būti stiprus, tankus, nelaidus vandeniui, atsparus šalčiui ir agresyviai vandeniui;
5. Atsparų kaitrai, kuris neturi prarasti laikančiosios galios, ilgą laiką veikiant aukštos temperatūros;
6. Chemiškai atsparų betoną, kuri turi būti atsparus druskų tirpalams, rūgštims, šarmams bei garams;
7. Dekoratyvinį betoną, naudojamą pastatų ir statinių apdailai. Tokių betonų labai svarbi savybė yra spalva ir faktūra;
8. Kelių betonas, kuri turi būti stiprus, atsparus dilumui ir smūgiams, šalčiui, temperatūros bei drėgmės svyravimams [3,26].

1.4 Betono sudėties reikalavimai

Betono sudėties parinkimo metodų yra daug, tačiau betonas turi būti tokios sudėties, kad po numatytos kietėjimo trukmės atitiktų standarto keliamus reikalavimus. Naudojamos medžiagos turi būti be kenksmingų priemaišų, nes bet kokios priemaišos gali įtakoti betono ilgaamžiškumą bei stiprumines savybes. Visi reikalavimai, keliami betono komponentams yra pateikti medžiagų standartuose.

Betoną gali veikti įvairūs aplinkos poveikiai, kurie yra suskirstomi į aplinkos poveikių klases ir pateikti 1.4 lentelėje. 1.5 lentelėje yra pateiktos gamtinio grunto ir gruntinio vandens cheminio agresyvumo ribinių rodiklių vertės pagal aplinkos poveikio klases. Įvertinus koks bus aplinkos poveikis, pagal standarto reikalavimus reikia laikytis betono sudėčių ir savybių rekomendacijų, kurios yra pateiktos 1.6 lentelėje [23].

1.4 lentelė. Aplinkos poveikio klasės

Aplinkos poveikių klasės	Aplinkos aprašymas	Pasitaikančių eksploataavimo aplinkos klasių informaciniai pavyzdžiai
1. Nėra korozijos ar agresijos rizikos		
XO	Betonui be armatūros arba metalinių įdėtinių detalių; visos eksploatacinės aplinkos, išskyrus tas, kuriose yra šaldymo ir šildymo, erozijos ir cheminis poveikiai. Betonui su armatūra arba metalinėmis įdėtinėmis detalėmis: labai sausa	Betonas viduje pastatų, kuriuose labai mažas oro drėgnis
2. Karbonizacijos sukeliamą koroziją		
Kai armuotą arba su įdėtinėmis detalėmis betoną veikia oras ir drėgmė, aplinkos sąlygos klasifikuojamos kaip nurodyta toliau: PASTABA: Drėgnumo sąlygos yra susijusios su armatūros arba įdėtinio metalo apsauginiu betono sluoksniu, bet daugeliu atvejų betono dangos būklė atspindi vietovės aplinkos sąlygas. Kokiu atveju vietovės aplinkos klasifikacija gali būti adekvati nurodytai klasei. Jeigu tarp betono ir aplinkos yra užtvara, tokiu atveju gali būti kitaip.		
XC1	Sausa arba pastoviai šlapia	Betonas viduje pastatų, kuriuose mažas oro drėgnis Betonas vandenyje
XC2	Šlapia, retai sausa	Betono paviršiai ilgai mirksta vandenyje Daugelis pamatų
XC3	Vidutiniškai drėgna	Betonas viduje pastatų, kuriuose vidutinis arba aukštas oro drėgnis Išorinis, pridengiantis nuo lietaus betonas
XC 4	Cikliška šlapia ir sausa	Betono paviršiai mirksta vandenyje, bet nepriklauso XC2 klasei
3. Chloridų, bet ne jūros vandens, sukelta korozija		
Kai armuotą arba su įdėtinėmis metalinėmis detalėmis betoną veikia turintis chloridų vanduo, ledą tirpančios druskos, bet ne jūros vanduo, druskos, eksploatacinė aplinka klasifikuojama kaip nurodyta toliau		
XD1	Vidutinio drėgnumo aplinka	Atviras betono paviršius taškomas chlorido vandens purslais
XD2	Drėgna, retai sausa aplinka	Plaukimo baseinai Atviras betonas, veikiamas pramoninio chlorido vandens
XD3	Cikliška drėgna ir sausa aplinka	Tiltų dalys, kurias aptaško chloringas vanduo Grindiniai, šaligatviai Automobilių aikštelių plokštės
4. Jūros vandens chloridų sukeliamą koroziją		
Kai armuotą arba su įdėtinėmis metalinėmis detalėmis betoną veikia jūros chloridų turintis vanduo arba oras su jūrinės kilmės chloridais, aplinkos sąlygos klasifikuojamos taip:		
XS1	Veikia purslų druska, bet ne tiesioginis jūros vanduo	Konstrukcijos arti kranto arba ant kranto
XS2	Pastoviai panardinta	Jūrinių konstrukcijų dalys
XS3	Potvynio, purslų ar taškymo zonos	Jūrinių konstrukcijų dalys
5. Šaldymo/šildymo poveikis be druskos arba su ja		
Kai betonas eksploatuojamas esant esminiams šaldymo, šildymo bei šlapios aplinkos poveikiams,		

aplinkos sąlygos klasifikuojamos taip:		
XF1	Vidutinis vandens įmirkis be ledo tirpinimo medžiagos	Vertikalūs betono paviršiai, veikiami lietaus ir šalčio
XF2	Vidutinis vandens įmirkis su ledo tirpančiomis medžiagos	Kelių konstrukcijų vertikalūs betono paviršiai, kuriuos veikia šaltis ir ledą tirpančios druskos
XF3	Aukštas vandens įmirkis be ledo tirpinimo medžiagos	Horizontalūs betono paviršiai veikiami šalčio ir lietaus
XF4	Aukštas vandens įmirkis su ledo tirpančiomis medžiagos	Kelių ir tiltų dangos, veikiamos druskų Betono paviršiai, tiesiogiai veikiami druskų ir šalčio Šalčio veikiamos konstrukcijos jūros purslų zonoje
6. Cheminis poveikis		
Kai betonas atviras cheminiam poveikiui, veikiant gamtiniam gruntui arba gruntiniam vandeniui kaip nurodyta 1.5 lentelėje, eksploatacinės aplinkos sąlygos klasifikuojamos kaip pateikta toliau:		
XA1	Silpno cheminio agresyvumo aplinka pagal 1.5 lentelę	
XA2	Vidutinio cheminio agresyvumo aplinka pagal 1.5 lentelę	
XA3	Didelio cheminio agresyvumo aplinka pagal 1.5 lentelę	

1.5 lentelė. Gamtinio grunto ir gruntinio vandens cheminio agresyvumo ribinių rodiklių vertės pagal aplinkos poveikio klases

Toliau pateikta cheminio agresyvumo aplinkos klasifikacija parengta imant, kad gamtinio grunto ir gruntinio vandens (vandens ir grunto) temperatūra gali būti nuo 5 °C iki 25 °C, o vandens greitis mažas–artimas stovinčiam.

Klasė nustatoma pagal blogiausią bet kurios vienos cheminės charakteristikos vertės.

Kai dvi ar daugiau agresyvumo charakteristikų nurodo tą pačią klasę, aplinka priskiriama artimiausiai aukštesnei klasei, nebent yra ištirta, kad šiuo specialiu atveju tai nebūtina.

Cheminė charakteristika	XA1	XA2	XA2
Gruntinis vanduo			
SO_4^{2-} (mg/l)	≥ 200 ir ≤ 600	> 600 ir ≤ 3000	> 40 ir ≤ 100
pH	$\leq 6,5$ ir $\geq 5,5$	$< 5,5$ ir $\geq 4,5$	$< 4,5$ ir ≥ 4
Agresyvus CO_2 (mg/l)	≥ 15 ir ≤ 40	> 40 ir ≤ 100	> 1000 persotintas
NH_4^+ (mg/l)	≥ 15 ir ≤ 30	> 30 ir ≤ 60	> 60 ir ≤ 100
Mg^{2+} (mg/l)	≥ 300 ir ≤ 1000	> 1000 ir ≤ 3000	> 3000 persotintas
Gruntas			
SO_4^{2-} (mg/kg ^a)	≥ 2000 ir $\leq 3000^b$	$> 3000^b$ ir ≤ 12000	> 12000 ir ≤ 24000
Rūgštys (ml/kg)	> 200	Praktiškai nepasitaiko	

^a Molingas gruntas, kurio laidumas pastoviai mažesnis kaip 10^{-5} m/s, gali būti perkeltas į žemesnę klasę.

^b 3000 mg/kg ribą galima sumažinti iki 2000 mg/kg, jei sulfato jonų susikaupimo betone rizika atsiranda tik dėl cikliškai pasikartojančio išdžiūvimo ir sudrėkimo arba dėl kapiliarinio įsiurbimo.

1.6 lentelė. Rekomenduojamieji betono sudėčių ir savybių apribojimai

	Aplinkos poveikio klasė																	
	Nėra korozijos poveikių rizikos	Karbonizacijos sukeliamą koroziją				Chloridų sukeliamą koroziją						Šaldymo ir šildymo poveikis				Agresyvi cheminė aplinka		
						Jūros vandens			Chloridų, bet ne iš jūros vandens									
	XO	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Didžiausias V/C	–	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Mažiausia stiprio klasė	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Mažiausias cemento kiekis (kg/m³)	–	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Mažiausias oro kiekis (%)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	4.0 ^a	4.0 ^a	4.0 ^a	–	–	–
^a Kai betone nėra įtraukto oro, betono savybės turi būti nustatomos remiantis patvirtintais bandymo metodais ir palyginamos su betonu, kurio atsparumas šalčiui dėl atitinkamos aplinkos poveikio klasės yra įrodytas																		

1.5 Betono sudėties žaliavos

1.5.1. Stambūs užpildai

Betono užpildai sudaro daugiau kaip 80 % betono tūrio. Jie turi didelę įtaką betono savybėms ir ilgaamžiškumui. Kaip žinoma betono stiprumas labai priklauso nuo užpildų kokybės, granulometrinės sudėties, organinių priemaišų [42, 44].

Betonui gaminti naudojami užpildai: granitinė ir žvyro skalda, žvyras, kvarcinis smėlis. Jei betono gamyboje naudojamas stambus užpildas, kuris neatitinka norminės granulometrinės sudėties, mišinyje gali susidaryti daug tuštumų, o betono stipris sumažėja 5–16 %. Kuo didesni naudojami stambūs užpildai, tuo mažiau vandens reikia gaminant betoną, tuo stipresnis gaunamas gaminytis [3, 4, 37].

Smulkusis užpildas – tai toks užpildas, kurio dalelių stambumas D ne didesnis kaip 4 mm. Stambusis užpildas – kurio stambumas D ne mažesnis kaip 4 mm ir d ne mažesnis kaip 2 mm. Užpildų dalelės gali būti įvairių frakcijų: 5–10 mm, 10–20 mm, 20–40 mm, 40–70 mm.

Gamtinis užpildas – kai D ne didesnis kaip 8 mm. Užpildų stambumas–užpildų charakteristika., apibūdinama apatinio sieto „ d “ ir viršutinio sieto D akelių matmenimis [21].

Užpildų granulometrinės sudėties bendrieji reikalavimai yra surašyti lentelėje 1.4, o išbirų per viduriniųjų sieta absoliutines ribos ir leidžiami nuokrypiai pateikti 1.7 lentelėje [21].

1.7 lentelė. Užpildų granulometrinės sudėties bendrieji reikalavimai

Užpildas	Frakcija	Išbiros (masės %)					Kategorija G^d
		2 D	1,4 D	D	d	d/2	
Stambusis	$D/d \leq 2$ arba $D \leq 11,2$ mm	100	98–100	85–99	0–20	0–5	G_c 85/20
		100	98–100	80–90	0–20	0–5	G_c 80/20
	$D/d > 2$ $D > 11,2$ mm	100	98–100	90–99	0–15	0–5	G_c 90/15
Smulkusis	$D \leq 4$ mm ir $d = 0$	100	95–100	85–99	–	–	G_F 85
Natūralios granulometrinės sudėties 0/8	$D = 8$ mm ir $d = 0$	100	98–100	90–99	–	–	G_{NG} 90
Frakcijų mišinys	$D \leq 45$ mm ir $d = 0$	100	98–100	90–99	–	–	G_A 90
		100	98–100	85–99	–	–	G_A 85

1.8 lentelė. Išbirų per vidurinįjį sietą absoliutinės ribos ir leistinieji nuokrypiai

D/d	Viduriniojo sieto akelių matmuo (mm)	Išbirų per vidurinįjį sietą absoliutinės ribos ir leidžiamosios nuokrypos (masės %)		Kategorija G_T
		Absoliutinės ribos	Gamintojo pateiktos tipinei sudėčiai leistinosios nuokrypos	
< 4	D/1,4	25–70	± 15	G_{T15}
≥ 4	D/2	25–70	$\pm 17,5$	$G_{T17,5}$

Vienafrakciniams stambiems užpildams 1.8 lentelės reikalavimai gali būti netaikomi jei:

- 2 $D > 11,2 \text{ mm}$ $D/d \leq 2$
- 3 $D \leq 11,2 \text{ mm}$ $D/d \leq 4$

Betono užpildų kategorijos pagal smūginio trupio didžiausios vertės surašytos 1.9 lentelėje [21].

1.9 lentelė. Užpildų kategorijos pagal smūginio trupio didžiausias vertes

Smūginio trupio vertė (%)	Kategorija SZ
≤ 18	SZ_{18}
≤ 22	SZ_{22}
≤ 26	SZ_{26}
≤ 32	SZ_{32}
> 32	$SZ_{\text{deklaruojamas}}$

Didelę įtaką betono savybėms turi užpildų granulometrinė sudėtis, jų stiprumas, tuštymėtumas ir švarumas. Užpildų fizikinės ir mechaninės savybės daro esminę įtaką daugeliui betono savybių. Labai stipriems betonams maišyti reikia naudoti stipresnius užpildus negu parenkamas betono stiprumas [37, 38]. Jei betono klasė numatyta aukštesnė nei C20/25, tai užpildų stiprumas turi būti 2 kartus didesnis. Žemesnių klasių betonams užpildų stiprumas turėtų būti 1,5 karto didesnis už norimą betono stiprumą. Užpildų tinkamumas nustatomas pagal LST EN 12620:2003 [21]

1.5.2. Smėlis

Smėlis – tai smulkusis užpildas, kuris susidaro yrant gamtinėms uolienoms. Gamtinis smėlis yra kvarco, lauko špatų, kalцитų, žėručio mišinys, sudarytas iš 0,125 (0,16)–4 (5) dydžio grūdelių. Gamtiniame smėlyje gali būti organinių priemaišų: dulkių, molio dalelių, dumblo ir kt., kurios turi įtakos betono stipriui, nes kietėjant cementui, jos sudaro žalingas organines priemaišas [3].

1.5.3. Cementas

Portlandcementis – tai yra hidraulinė rišamoji medžiaga, kurios sudėtyje vyrauja kalcio silikatai (70–80 %) ir kuri sumaišyta su vandeniu, rišasi ir kietėja, vykstant hidratacijos reakcijomis ir procesams. Portlandcementis gaunamas sumalus klinkerį ir tam tikrą gipso kiekį (cementu rišimosi trukmei reguliuoti). Klinkerį sudaro CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oksidai, kurie sudaro 95–97 % klinkerio masės. Klinkeryje yra ir MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , SO_3 oksidų [26].

Betono gamyboje nemažą reikšmę turi cemento savybės. Cemento tinkamumas yra nustatomas pagal LST EN 197–1 „Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai“. 1.10 lentelėje pateiktos cemento klasės pagal stiprį gniuždant [22].

1.10 lentelė. Cemento klasės pagal stiprį gniuždant

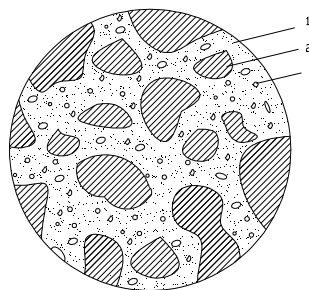
Klasė	Stipris gniuždant N/mm^2 (MPa)			
	Ankstysis		Standartinis	
	2 paros	7 paros	28 paros	
32,5	–	≥ 16	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	≥ 10	–		
42,5	≥ 10	–	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20	–		
52,5	≥ 20	–	$\geq 52,5$	–
52,5 R	≥ 30	–		

1.5.4. Vanduo

Vandens tinkamumas betono gamybai nustatomas pagal LST EN 1008 : 1997. Betono mišiniui ruošti vanduo turi būti švarus, be žalingų, trukdančių betonui normaliai kietėti priemaišų (rūgščių, sulfatų, riebalų ir kt.). Jame gali būti ne daugiau kaip 5000 mg/l įvairių ištirpusių druskų, iš jų sulfatų – ne daugiau kaip 2700 mg/l (perskaičiavus į SO_4). Vanduo turi būti nerūgštus, t.y. jo pH – nemažesnis kaip 4 [19].

1.6. Betono struktūra

Betonas yra kompozitinė medžiaga, kurios struktūrą apibūdina mikrosporos, makrosporos, kapiliarai, esantys betono akmenyje, užpilduose, jų sąlyčio vietose. Struktūra – tai medžiagos dalelių išsidėstymas tam tikrame tūryje ir jų tarpusavio ryšys [3]. Betono struktūra priklauso nuo komponentų ir jų sudėties parinkimo, sumaišymo, gaminio formavimo ir sukietinimo. Užpildai (smėlis, žvyras, skalda) užima 80–85 % betono tūrio ir sudaro kietą struktūros karkasą. 9 paveiksle pateikta betono struktūra [42].



9 pav. Normalaus betono struktūros schema: 1– cemento akmuo; 2 – skalda; 3 – smėlis [45]

Betono makrostruktūrai, mikrostruktūrai, mezastruktūrai, megastruktūrai turi įtakos kiekvienas technologijos procesas. Norint gauti reikiamos struktūros ir savybių betoną, reikia tinkamai parinkti cementą, stambiuosius ir smulkiuosius užpildus, jų kiekį bei kontroliuoti kiekvieną betono gamybos etapą. Labai svarbus vandens kiekio parinkimas, nes vanduo mišiniuose būna įgertas, fiziškai ir chemiškai sujungęs bei laisvas. Vandens būseną ir jo kiekiai turi didelę reikšmę formuojant betono struktūrą. Kai vandens kiekis nedidelis, tai vanduo dengia kietąsias daleles plona absorbcine plėvele. Kuo plonesnė vandens plėvelė, tuo mišinys mažiau plastiškas [26]. Betono struktūrą galima nagrinėti kaip submikrostruktūrą, mikrostruktūrą, mezastruktūrą, makrostruktūrą, megastruktūrą [3, 29].

1.6.1. Submikrostruktūra

Submikrostruktūra – tai medžiagų atomų, jonų ir molekulių, kurių dydis mažesnis kaip 10^{-9} m, sandara ir ryšys tarp jų. Tai yra atomų ir molekulių lygis. Submikrostruktūra tyrinėjama radiometrinės, elektroninės ir optinės mikroskopijos būdais, terminės, cheminės ir kitokiais analizės metodais [3].

1.6.2. Mikrostruktūra

Mikrostruktūra (koloidinės frakcijos lygis)–tai medžiagų makromolekulių, kristalų, fazių kontaktinio sluoksnio, mikrosporų (dydis nuo $1 \cdot 10^{-9}$ m iki $1 \cdot 10^{-7}$ m) sandara ir ryšys tarp jų. Kai nagrinėjama mikrostruktūra, tai tiriami cementinio akmens naujų junginių geliai, kristalai, mikroporos. Mikrostruktūra tyrinėjama elektroninės ir optinės mikroskopijos, radiometrinės, terminės, cheminės ir kitokios mikroanalizės metodais [3, 29].

1.6.3. Mezostruktūra

Mezostruktūra (dulkių frakcijos lygis) – tai medžiagą sudarančių grūdelių, jų kontaktinio sluoksnio, mezoporų (dydis nuo $1 \cdot 10^{-7}$ m iki $1 \cdot 10^{-5}$ m) sandara ir ryšys tarp jų. Mezostruktūra tyrinėjama optinės mikroskopijos, radiometrijos, elektrinės, granulimetrinės, fizikinės, mechaninės

ir kitokios analizės bei defektoskopijos metodais. [3]. Betono mezostruktūra – tai cementinio akmens struktūra, kuri priklauso nuo cemento cheminės mineraloginės sudėties, dalelių smulkumo, vandens ir cemento santykio, kietėjimo sąlygų. Sumaišius cemento miltelius su vandeniu prasideda kietėjimo procesas, kuris turi didelę įtaką cementinio akmens struktūros susidarymui. Cemento miltelių mišinys sudarytas iš skirtingų mineralų, be to cemento dalelių dydžiai yra skirtingi, todėl dalelės hidratuojasi skirtingu greičiu [3, 29].

1.6.4. Makrostruktūra

Makrostruktūra (smėlio frakcijos lygis) – tai smėlio frakcijų grūdelių, pastų tarpsluoksnių, porų (dydis nuo $14 \cdot 10^{-5}$ m iki $5 \cdot 10^{-3}$ m) sandara. Tokia struktūra tiriama optiškai ir vizualiai. Dalelės matuojamos optiniais, mechaniniais, elektriniais ir kitokiais tiksliais prietaisais [3]. Betono makrostruktūra – tai betone esančio cementinio skiedinio su smėlio užpildu struktūra, kuri susidaro betono formavimo metu ir priklauso nuo įvairių veiksnių: mišinio sudėties, smėlio granulimetrinės sudėties, dalelių formos ir kiekio. Betono makrostruktūra yra vienas pagrindinių veiksnių, lemiančių betono savybes [29]. Užpildai lemia betono makrostruktūrą. Geriausia ir optimaliausia betono užpildų sudėtis, sudaryta iš įvairių frakcijų grupių, tai yra 2–3 frakcijos. Stambųjų užpildų granulimetrinę sudėtį reguliuoti nesunku. Tačiau smėlio granulimetrinę sudėtį sureguliuoti labai sunku [3, 4, 29].

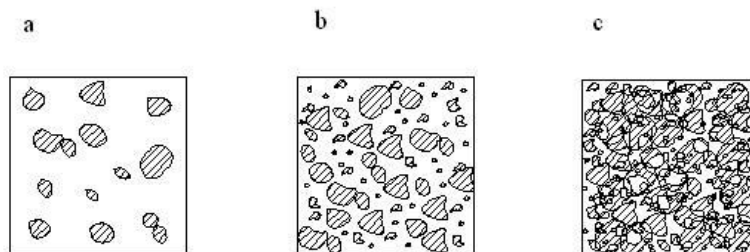
1.6.5. Megastruktūra

Megastruktūra (žvyringos frakcijos lygis) – tai betonų, skiedinių ir kitų medžiagų, kurių dalelės didesnės kaip $5 \cdot 10^{-3}$ m. Megastruktūra tiriama optiškai arba vizualiai. Dalelių porų dydžiai ir dalelių bei porų išsidėstymas matuojamas optiniais, mechaniniais, elektriniais ir kitokiais reikiamo tikslumo prietaisais [3]. Betonų megastruktūra – tai betonų su stambiaisiais užpildais struktūra, kuri priklauso nuo stambiųjų dalelių išsidėstymo erdvėje. Betono megastruktūra susidaro betono gaminio formavimo ir kietėjimo metu. Betono struktūra laikui bėgant kinta dėl užpildų bei cemento fizikinių ir cheminių procesų vykstančių betoną maišant ar jam kietėjant. Stambiųjų užpildų skirtinguose betono mišiniuose būna nevienodai. Todėl betono megastruktūra gali būti trejopa:

1. cementinio skiedinio tūris didesnis už tuštumų tarp stambaus užpildo grūdelių tūrį, todėl stambiųjų užpildų dalelės viena kitos neliečia. Tokio betono savybės daugiausia priklauso nuo cementinio skiedinio savybių;
2. cementinio skiedinio tūris lygus arba šiek tiek didesnis už tarp stambiųjų užpildų esančių tuštumų tūrį. Stambiųjų užpildų dalelės liečia viena kitą. Stambūs užpildai turi didelę įtaką betono savybėms, o ypač stiprumui;

3. cementinio skiedinio arba tešlos tūris mažesnis už tarp stambių užpildų esančių tuštumų tūrį, todėl lieka neužpildytų porų. Stambiojo užpildo dalelės dengia viena kitą, tarp jų atsiranda trintis. Toks betonas vadinasi stambiaporiu. [3, 4].

Megastruktūros schemas pateikiamos 10 paveiksle [29].



10 pav. Betono megastruktūros tipai: a – mišinys su plaukiojančiais užpildais; b – didesnio užpildų tūrio bei mažesnio skiedinio tūrio mišinys; c – maksimalus stambiojo užpildo tūrio betono mišinys [29]

1.7. Betono mišinio savybės

Rišamosios medžiagos, užpildų, vandens ir specialių priedų mišiniai, kol iš jų dar nesuformuoti gaminiai, vadinami betono mišiniais. Pagal fizikines – mechanines savybes betono mišiniai užima tarpinę padėtį tarp kietų kūnų ir klampių skysčių. Betono mišiniai sudaryti iš kietosios, skystosios ir dujinės fazių. Tokiems mišiniams būdingas klampumas [3, 29].

Betono mišiniai turi tenkinti šiuos du svarbiausius reikalavimus:

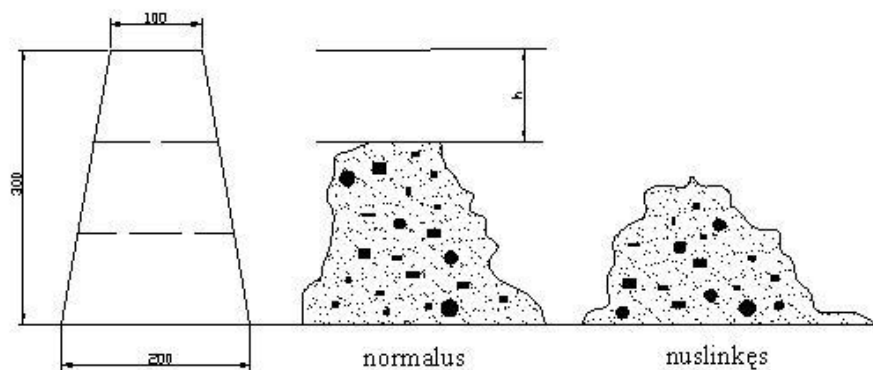
- 1) būti stabilūs, t. y. transportuojami, iškraunami ir formuojami turi išlikti homogeniški;
- 2) būti klojingi, t.y. formuojami ir tankinami turi gerai užpildyti formas bei tarpus tarp armatūros strypų.

Betono mišinio stabilumas priklauso nuo rišlumo: kuo mažesnis mišinio rišlumas, tuo greičiau jis išsisluoksniuoja. Mišinių rišlumas didėja, didinant juose cemento kiekį, mažinant vandens ir cemento santykį, didinant smulkiųjų užpildų (vietoj stambiųjų) vartojant šiurkštaus paviršiaus užpildus, kurių dalelės aštriabriaunės.

Betono mišinių klojingumas nusakomas slankumu arba standumu. Slankumas – tai mišinio savybė pasklisti, veikiant savai masei. Betono mišinys į kūgį (11 pav.), kuris padėtas ant lygaus metalinio laksto, sudedamas trimis sluoksniais. Sluoksniai sutankinami 16 mm skersmens metaliniu strypu. Kiekvienas sluoksnis badomas 25 kartus. Nuėmus kūginį indą, betono mišinys, veikiamas savos masės, suslūgsta, ir šis centimetrais išmatuotas nuoslūgis rodo mišinio slankumą.

Betono mišiniai, iš kurių suformuotas standartinis kūgis nesuslūgsta, vadinami standžiais. Jų klojumas apibūdinamas standumu.

Slankieji mišiniai lengvai sumaišomi, gerai užpildo formas. Standūs mišiniai klampesni, todėl dirbiniams iš jų formuoti reikia didesnės jėgos.



11 pav. Slankumo matavimo kūgis ir suslūgimo atvejai [5]

Kokios turi būti betono mišinio technologinės savybės, priklauso nuo formuojamų gaminių rūšies ir matmenų, betono mišinio transportavimo atstumo, armavimo laipsnio ir betonavimo būdo.

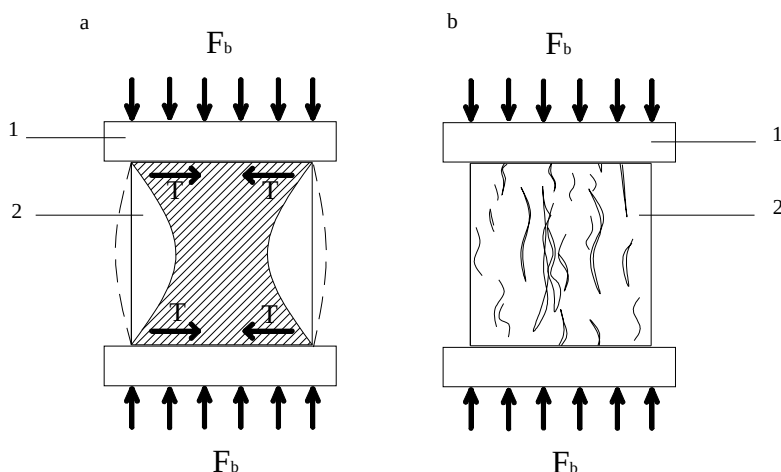
1.8. Betono stiprumas

Betono stiprumas yra medžiagos savybė atlaikyti be pastebimų irimo žymių dėl išorinių poveikių (apkrovos, temperatūros arba kitų deformacijos gradientų) atsiradusius įtempimus [3].

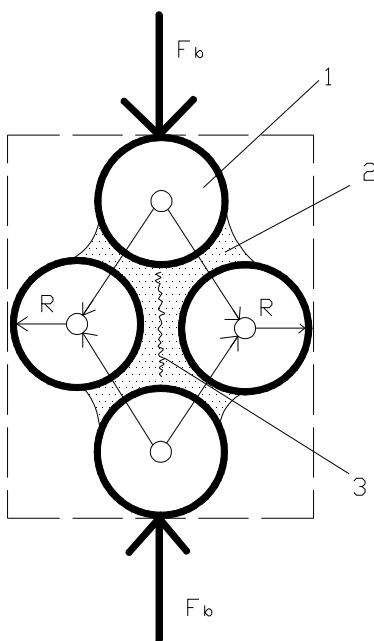
Stipris gniuždant yra pati svarbiausia betono savybė, kuri priklauso nuo cemento rūšies, aktyvumo, užpildų kokybės ir kiekio, cemento ir vandens santykio C/V , betono mišinio sudėties, klojimo ir sutankinimo būdo ir laipsnio, kietėjimo sąlygų ir trukmės, struktūros ir pradinių įtempimų. Dar neapkrautame betone dėl susitraukimo deformacijų cementinio akmens ir užpildų kontakto vietose atsiranda išankstinių vidinių įtempimų ar net mikroplyšių. Centriškai gniuždant betoną, dėl jo struktūros nevienalytiškumo ir vidinių įtempimų, susidaro sudėtingas įtemptasis būvis. Didėjant gniuždymo jėgai, iš pradžių betono struktūra tankėja, nes betonas labiau susispaudžia jėgos veikimo kryptimi, nei plečiasi statmena gniuždymo jėgai kryptimi. Tada silpniausiuose betono vietose skersinė deformacija prilygsta arba net didesnė nei ribinė tempiamo betono deformacija ir tada betonas toje vietoje plyšta. Pradedą atsirasti ir plėtotis mikroplyšiai, kurie yra lygiagretūs su jėgos veikimo kryptimi ir betono struktūra pradeda retėti. Kai apkrova dar padidėja, vietiniai mikroplyšiai susijungia į ištisinius ir mikroplyšiai virsta. Nuo čia prasideda

betono irimo procesas makroplyšiais [14]. 12 paveiksle yra pateiktos dvi betono pleišėjimo schemos: viena kai yra trintis su preso plokštuma, o kita kai nėra trinties su preso plokštuma.

Betono bandiniai gniuždomi suyra dėl skersinių deformacijų ir tempimo įtempimų, veikiančių pjūviuose, lygiagrečiuose gniuždymo jėgai F_b . Betono idealios struktūros modelis ir jo irimo schema parodyta 13 paveiksle. Čia tempimo įtempimai pjūviuose, lygiagrečiuose jėgai F_b , atsiranda dėl skėtimo jėgos R [3].



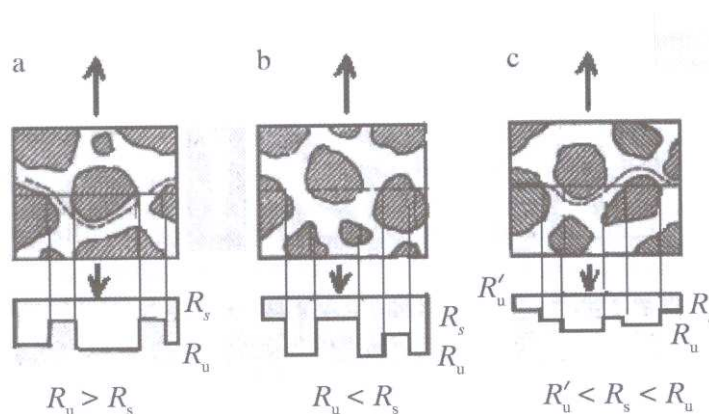
12 pav. Betono bandinių irimo gniuždant pobūdis: a – betoninio kubelio irimas, kai yra trintis su preso plokštuma; b – betoninio kubelio irimas kai nėra trinties su preso plokštuma; 1- preso plokštės; betono bandinys [14]



13 pav. Betono idealios struktūros modelis ir irimo schema: 1 – medžiagos grudeliai; 2 –matrica; 3 – plyšys, atsiradęs dėl tempimo įtempimų [3]

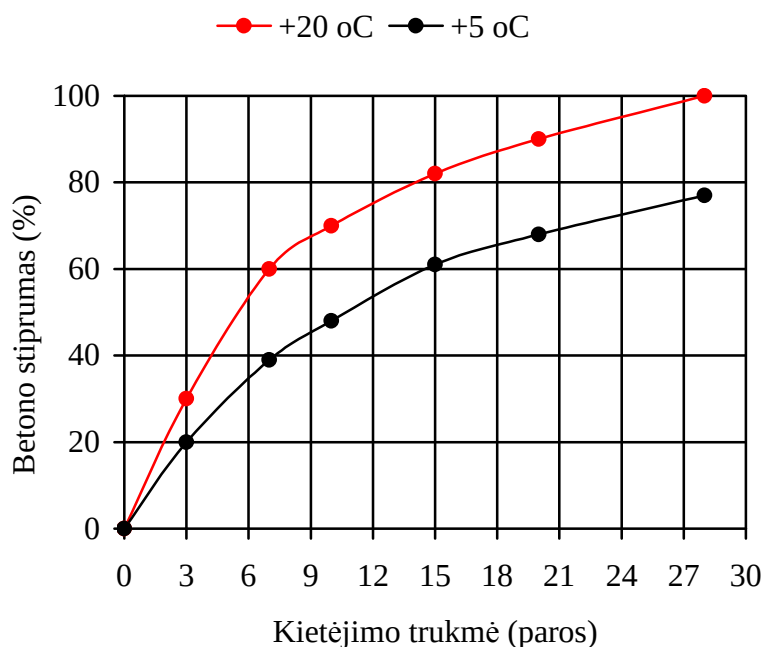
Atlikus daugybę eksperimentinių tyrimų nustatyta, kad betonas konstrukcijoje suyra pagal du modelius: pirmasis – kai užpildų betone yra mažiau, ir jie stipresni už cementinio akmens stiprumą, irimas vyksta per cementinį akmenį; antrasis – kai užpildo stiprumas yra mažesnis už

cemento akmens stiprumą, irimas vyksta suirus cementiniam akmeniui ir užpildui. Betono irimo pobūdžiai pavaizduoti 14 paveiksle [29].



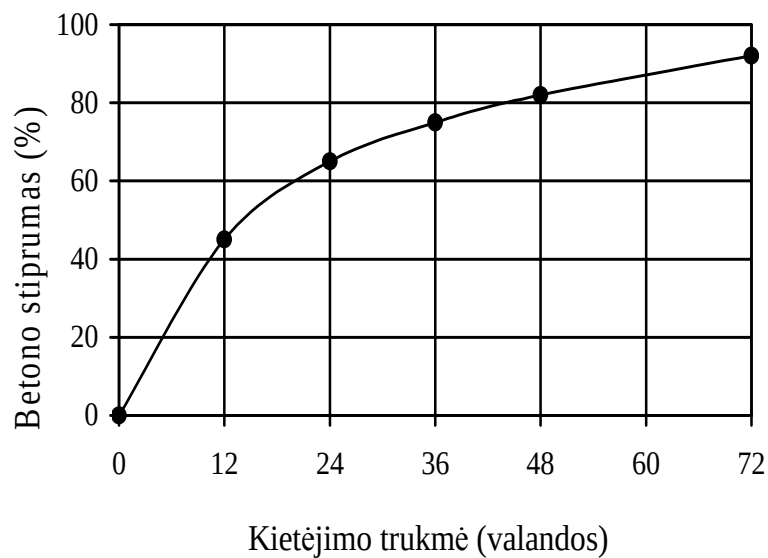
14 pav. Betono irimo pobūdis: a – irimas per cementinį skiedinį, nesuyrant užpildui; b – suyrant užpildo grudeliams; c – mišrus irimas;
 R_s – skiedinio stiprumas; R_u – užpildo stiprumas [29]

Betonas kietėdamas normaliose sąlygose turi maža pradinį stiprumą ir tik po 7–14 parų įgyja 60–80 % savo klasės stiprumo [9]. Betono stiprumas gniuždant nustatomas po 28 parų kietėjimo normaliomis sąlygomis, tačiau per šį laikotarpį stiprumas didėja netolygiai. Betono stiprumo kitimo grafikas priklausomai nuo kietėjimo trukmės pateiktas 15 paveiksle [3].



15 pav. Betono stiprumo kitimas priklausomai nuo kietėjimo trukmės ir aplinkos temperatūros: a – kai aplinkos temperatūra + 20 °C; b – kai aplinkos temperatūra + 5 °C [3, 5]

Žemesnėje temperatūroje betonas kietėja lėčiau. Kai aplinkos temperatūra apie 0 °C, betonas nekietėja. Betono kietėjimas greitinamas, pakeliant aplinkos temperatūrą: suformuoti betono dirbiniai išlaikomi normalaus arba padidinto slėgio garo kameroje, kuriuose betono dirbiniai per 10–15 valandų įgauna nuo 70 % iki 100 % projektinio stiprio. Betono, kietinamo + 80 °C temperatūroje stiprumo kitimo grafikas priklausomai nuo kietėjimo trukmės pateikiamas 16 paveiksle [3].



16 pav. Betono stiprumo kitimas priklausomai nuo kietėjimo trukmės, kai kietėjimo aplinkos temperatūra + 80 °C [3]

2. TYRIMO METODAI IR BETONO SUDĖTIES PARINKIMAS

2.1. Žaliavų ir bandinių tyrimo metodai

2.1.1. Smėlio tyrimo metodai

Granulometrinės sudėties nustatymo metodika

Smėlio granulometrinė sudėtis nustatoma pagal liekamas ant sietų, susidariusias sijoiant sausą užpildą per standartinių sietų rinkinį.

Pagal užpildo didžiausiąjį dalelių stambumą parenkama bandinio masė. Užpildo bandinys išdžiovinamas $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje iki pastovios masės, atsveriamą 1000 g bandinio ir sijoama pro standartinių sietų rinkinį. Sijojama tol, kol per 1 minutę pro kiekvieną sietą persijojama ne daugiau kaip 0,1 % bandinio masės. Pagal formulę (1) skaičiuojama dalinę liekaną ant kiekvieno sieto

Suminė liekana ant kiekvieno sieto A_i skaičiuojama kaip dalinių liekanų ant skaičiuojamojo sieto ir dalinių liekanų ant sietų su stambesnėmis akutėmis suma. Išbira B_i pro kiekvieną sietą skaičiuojamas taip: $B_i = 100 - A_i$, ir sudaroma granulometrinė sudėties kreivė.

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100 \quad (\%); \quad (1)$$

čia: a_i –dalinė liekana ant kiekvieno sieto (%); m_i –liekanos masė ant skaičiuojamojo sieto (g); m –bandinio masė (g).

Smėlio dalelių tankio nustatymas

Smėlio dalelių tankis – tai yra sauso smėlio ir jo dalelių užimamo tūrio santykis, įskaitant dalelėse esančias uždaras ir atviras poras. Norint nustatyti smėlio dalelių tankį, reikia žinoti smėlio masę, piknometro su vandeniu masę, piknometro su smėliu ir vandeniu masę, vandens tankį. Visa tai nustatoma bandymo metu ir pagal formulę (2) apskaičiuoti piltinį tankį.

$$\rho_{s.t.} = \frac{m \cdot \rho_v^*}{m + m_1 - m_2} \quad (\text{g/cm}^3); \quad (2)$$

čia: m –smėlio masė (g); m_1 – piknometro su vandeniu masė (g); m_2 – piknometro su smėliu ir vandeniu masė (g); ρ_v^* – vandens tankis (g/cm^3).

Išdžiovinamas iki pastovios masės smėlis (15 g) supilamas į piknometrą ir pripilama distiliuoto vandens tiek, kad piknometras būtų užpildytas trečdaliu. Tada piknometras pastatomas pasvirai į

smėlio ar vandens vonią ir virinamas 15–20 min., kol iš smėlio grūdelių tarpo pašalinami oro burbuliukai. Po to piknometras ataušinamas iki kambario temperatūros ir pripilama iki žymės distiliuoto vandens. Piknometras su smėliu ir vandeniu pasveriamas 0,05 g tikslumu. Tada visas turinys išpilamas iš piknometro. Išplaunamas piknometras ir iki žymės pripilama distiliuoto vandens ir pasveriamas 0,05 g tikslumu. Gauti tyrimo rezultatai įrašomi į formulę (2) ir apskaičiuojamas smėlio dalelių tankis.

Smėlio piltinio tankio nustatymas

Užpildo piltinis tankis randamas supylus užpildą į žinomos talpos indą. Todėl apskaičiuotas tankis vadinamas piltiniu tankiu. Norint sužinoti užpildo piltinį tankį, reikia bandymo metu nustatyti tam tikrus parametrus ir pagal formulę (3) apskaičiuoti piltinį tankį.

$$\rho_{s.pl.} = \frac{m_1 - m}{V} \quad (\text{g/cm}^3); \quad (3)$$

čia: m_1 – indo su užpildu masė (g); m – tuščio indo masė (g); V – indo tūris (cm^3).

Pasveriamas tuščias, švarus 1 litro talpos indas, kuris pastatomas ant horizontalaus paviršiaus. Išdžiovinto iki pastovios masės smėlis samteliai pilamas į matavimo indą ne didesnio kaip 5 cm aukščio nuo indo viršaus. Pilama tol, kol pradeda byrėti per kraštus. Tada smėlio perteklius nuimamas liniuote. Nesutankintas smėlis su indu pasveriamas, piltinis tankis apskaičiuojamas pagal 3 formulę.

Užpildų tuštymėtumo nustatymas

Tuštymėtumas – tai medžiagos tuštumų, esančių tarp grūdelių, tūrio ir viso tūrio santykis. Tuštymėtumas priklauso nuo medžiagos granulimetrinės sudėties, drėgnumo, dalelių formos. Tuštymėtumas nustatomas pagal formulę (4).

$$T = \frac{\rho_{s.t.vid} - \rho_{s.pl.vid}}{\rho_{s.t.vid}} \cdot 100 \quad (\%); \quad (4)$$

čia: $\rho_{s.t.vid}$ – vidutinis smėlio dalelių tankis (g/cm^3); $\rho_{s.pl.vid}$ – vidutinis smėlio piltinis tankis (g/cm^3).

Smėlio drėgnio nustatymas

Smėlio drėgnis – tai smėlyje esančio vandens masės ir sauso užpildo masės santykis. Atsveriamas 1000 g smėlio bandinys ir supilamas į metalinį indą. Po to smėlis džiovinamas $110 \pm$

5 °C temperatūroje iki pastovios masės. Tada išdžiovintas smėlis pasveriamas, ir pagal formulę (5) apskaičiuojamas smėlio drėgnis.

$$W_s = \frac{m - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad (\%); \quad (5)$$

čia: m – smėlio bandinio masė (g); m_1 – išdžiovinto smėlio masė (g).

2.1.2. Portlandcemenčio tyrimo metodai

Portlandcemenčio tešlos normalaus tirštumo nustatymas

Portlandcemenčio ir vandens mišinys vadinamas portlandcemenčio tešla. Normalaus tirštumo portlandcemenčio tešla apibūdinama vandens kiekiu pagal portlandcemenčio masę, procentais. Tirštumas nustatomas Viko prietaisu. Normalaus tirštumo portlandcemenčio tešla yra tokios konsistencijos, kad Viko prietaiso strypelis per 6 ± 1 mm nepasiekia žiedo dugno.

Į maišyklę supilama 125 g vandens. Pasveriamas 500 ± 1 g cemento ir per $7 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ suberiama į maišyklę jau esantį vandenį, pasižymimas laikas. Subėrus cementą, maišyklė įjungžiama ir maišoma 90 s. Sustabdžius maišyklę, per 15 s cemento tešla nugramdoma nuo maišyklės sienelių ir sukrečiama į maišyklės vidurį. Paskui dar maišoma 90 s. Viko prietaiso žiedas patepamas alyva ir su kaupu pripildomas paruoštos cemento tešlos. Tešlos perteklius nubraukiamas taip, kad žiedas būtų pilnas, o paviršius lygus. Stiklo plokštelė su žiedu padedama po Viko prietaiso strypeliu, ir šis nuleidžiamas, kad liestų žiede esančios cemento tešlos paviršių. Praėjus 4 min nuo bandymo pradžios, strypelis paleidžiamas smigti į tešlą. Po 30 s fiksuojamas atstumas nuo stiklo plokštelės iki strypelio. Šis atstumas turi būti lygus $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Jei atstumas yra mažesnis ar didesnis, bandymas kartojamas atitinkamai didinant ar mažinant vandens kiekį ($\pm 2 \%$) ruošiamoje tešloje. Bandymas baigiamas, kai gaunama normalaus tirštumo tešla.

Portlandcemenčio rišimosi pradžios ir pabaigos nustatymas

Rišimosi pradžia yra laikas nuo tešlos užmaišymo iki to momento, kai Viko prietaiso adata nepasiekia dugno per 4 ± 1 mm. Rišimosi pabaiga – laiko tarpas nuo tešlos užmaišymo pradžios iki to momento, kai adata įsminga į cemento tešlą ne daugiau kaip 0,5 mm gylyje. Portlandcemento tešla turi pradėti rištis ne vėliau kaip po 45 min, o baigti rištis ne vėliau kaip po 12 valandų. Cemento rišimosi laikas nustatomas Viko prietaisu smingant adatai į normalaus tirštumo tešlą.

Portlandcemenčio piltinio tankio nustatymas

Pasveriamas standartinis indas ir pastatomas ant horizontalaus paviršiaus. Cementas į indą pilamas laboratoriniu samteliu iš ne didesnio kaip 5 cm aukščio nuo indo viršaus. Pilama tolygiai į

visą indą tol, kol cementas pradeda byrėti pro indo kraštus. Tada kaupas nubraukiamas metaline liniuote. Indas su cementu pasveriamas ir pagal (6) formulę apskaičiuojamas piltinis tankis.

$$\rho_{c.pl.} = \frac{m_1 - m}{V} \quad (\text{g/cm}^3); \quad (6)$$

čia: m_1 – indo su cementu masė (g); m – tuščio indo masė (g); V – indo tūris (cm^3).

Portlandcemenčio savitojo tankio nustatymas

Į piknometrą supilamas pasirinktas žibalo kiekis. Paskui pasveriamas 3 g cemento miltelių ir supilama į piknometrą. Piknometras pavartomas, kad pasišalintų oras ir 10 min leidžiama nusistovėti. Tada nustatomas žibalo tūrio padidėjimas. Jis atitinka cemento miltelių tūrį. Ir pagal formulę (7) apskaičiuojamas savitasis tankis.

$$\rho_{c.t.} = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (7)$$

čia: m – portlandcementio masė (g); V – portlandcemenčio tūris (cm^3).

2.1.3. Stambiojo užpildo, pagaminto iš betono atliekų tyrimas

Užpildo granulimetrinės sudėties nustatymas

Bandymo metu sutrupinamos betono atliekos. Sutrupinto bandinio masė m buvo 7225 g. Po to sutrupinta žaliava sijojama pro standartinį sietų rinkinį. Sijojama tol, kol per 1 minutę pro kiekvieną sietą persijojama ne daugiau kaip 0,1 % bandinio masės. Tada pagal formulę (8) skaičiuojama dalinę liekaną ant kiekvieno sieto ir sudaroma granulometrinė sudėties kreivė.

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100 \quad (\%); \quad (8)$$

čia: a_i – dalinė liekana ant kiekvieno sieto (%); m_i – liekanos masė ant skaičiuojamojo sieto (g); m – bandinio masė (g).

Stambiojo užpildo dalelių tankio nustatymas

Užpildo dalelių tankis – tai yra sauso užpildo ir jo dalelių užimamo tūrio santykis, įskaitant dalelėse esančias uždaras ir atviras poras. Norint nustatyti užpildo dalelių tankį, reikia žinoti užpildo masę, įmirkyto užpildo masę, vandenyje pasverto užpildo masę, vandens tankį. Visa tai nustatoma bandymo metu.

Bandymo imtis priklauso nuo užpildo dalelių stambumo: jei dalelių stambumas yra 31,5 (40) mm – tai imame 2,5 kg, jei stambumas virš 31,5 (40) mm, tai imame 5 kg. Tada bandinį

išdžioviname džiovykloje, esant $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai. Po to bandiniai mirkomi 2 valandas taip, kad vandens sluoksnis virš užpildo būtų virš 2 cm. Po 2 valandų užpildas išimamas iš vandens ir sveriamas paprastomis svarstyklėmis ir hidraulinėmis svarstyklėmis. Bandymo metu nustačius visus rodiklius, apskaičiuojamas užpildo dalelių tankis pagal formulę (9):

$$\rho_{z.t.} = \frac{m \cdot \rho_v^*}{m_1 - m_2} \quad (\text{g/cm}^3); \quad (9)$$

čia: m –užpildo masė (g); m_1 – įmirkyto užpildo masė (g); m_2 – vandenyje pasverto užpildo masė (g); ρ_v^* – vandens tankis (g/m^3).

Stambiojo užpildo piltinio tankio nustatymas

Užpildo piltinis tankis randamas supylus užpildą į žinomos talpos indą. Todėl apskaičiuotas tankis vadinamas piltiniu tankiu. Norint sužinoti užpildo piltinį tankį, reikia bandymo metu nustatyti tam tikrus parametrus ir pagal formulę (10) apskaičiuoti piltinį tankį.

$$\rho_{z.pl.} = \frac{m_1 - m}{V} \quad (\text{g/cm}^3); \quad (10)$$

čia: m_1 – indo su užpildu masė (g); m – tuščio indo masė (g); V – indo tūris (cm^3).

Stambiojo užpildo tuštymėtumo nustatymas

Tuštymėtumas–tai medžiagos tuštumų, esančių tarp grūdelių, tūrio ir viso tūrio santykis. Tuštymėtumas priklauso nuo medžiagos granulimetrinės sudėties, drėgnumo, dalelių formos. Tuštymėtumas nustatomas pagal formulę (11).

$$T = \frac{\rho_{z.t} - \rho_{z.pl}}{\rho_{z.t}} \cdot 100, \quad \% \quad (11)$$

čia: $\rho_{z.t}$ – užpildo dalelių tankis; (g/cm^3); $\rho_{z.pl}$ – užpildo piltinis tankis, (g/cm^3) [35].

2.1.4. Betono bandinių stipruminių savybių tyrimas

Suformuoti $10 \times 10 \times 10$ cm betono kubeliai po 3, 7 ir 28 parų kietėjimo vandenyje buvo gniuždomi presu. Betono stipris gniuždant buvo nustatomas pagal LST EN 12390–3. Ardančiosios gniuždymo jėgos pridėjimo greitis buvo 5 kN/s. Betono gniuždomasis stipris buvo apskaičiuotas pagal formulę (12):

$$f_{cm} = \frac{F_b}{A_b} \quad (\text{MPa}); \quad (12)$$

čia: F_b – ardančioji gniuždymo jėga (kN); A_b – bandinio skerspjūvio plotas (mm^2) [3, 5, 14, 18].

2.1.5. *Betono struktūrinių savybių tyrimas*

Bandinių įmirkio nustatymas normaliomis sąlygomis

Bandiniai džiovinami iki pastoviosios masės džiovinimo spintoje 110 ± 5 °C temperatūroje. Prieš bandymą bandiniai pasveriami svarstyklėmis ir nustatoma bandinio masė m_0 , paskui bandiniai pamerkiami į vandenį bandinių sotinimo vonioje. Vandens temperatūra 20 ± 5 °C, vandens lygis virš bandinių ne mažesnis nei 2 cm. Bandiniai vandenyje išlaikomi 72 ± 1 h. Paskui jie išimami iš vonios, apšluostomi drėgnu audeklu ir pasveriami techninėmis svarstyklėmis; nustatoma bandinio masė m_1 . Tada pagal formulę (13) apskaičiuojamas bandinių įmirkis normaliomis sąlygomis.

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (\%); \quad (13)$$

čia: m_0 – visiškai sauso bandinio masė (g); m_1 – normaliomis sąlygomis įmirkusio betono bandinio masė (g).

Bandinių sotinimas kapiliarinio pasiurbimo būdu normaliosiomis sąlygomis

Bandiniai džiovinami iki pastoviosios masės džiovinimo spintoje 110 ± 5 °C temperatūroje. Bandiniai darbine plokštuma žemyn sudedami ant padėklo su atramomis, kuris užpildytas vandeniu taip, kad bandinių darbinė plokštuma su juo kontaktuotų. Pasiurbimo trukmė kontroliuojama sekundometru. Po 5 minučių ant kiekvieno bandinio pieštuku fiksuojamas visų jo plokštumų sudrėkimo kontūras ir bandiniai sudedami atgal ant padėklo. Po 30 ± 1 min bandiniai apšluostomi drėgnu audeklu ir pasveriami techninėmis svarstyklėmis; nustatoma bandinio masė m_2 . Tada išmatuojamas anksčiau pieštuku užfiksuotas sudrėkimo kontūras h_{max} ir h_{min} .

Bandinių įmirkio ciklinio vakuumavimo sąlygomis nustatymas

Bandiniai džiovinami iki pastoviosios masės džiovinimo spintoje 110 ± 5 °C temperatūroje. Sausi bandiniai dedami į eksikatorių ir vakuumuojami iki 1,92–2,22 kPa (tai yra nuo 0,98 iki 1,02 atm). Po 50–60 minučių vakuumavimo eksikatorius užpildomas vandeniu taip, kad bandiniai būtų visiškai apsemti. Po 20–30 minučių į sistemą įleidžiamas oras, o praėjus 20–30 minučių sistema vėl vakuumuojama. Pabaigoje sistema užpildoma oru, eksikatorius atidaromas, bandiniai išimami ir 24 valandas perkelti į vonią su vandeniu, kurio temperatūra 20 ± 5 °C. Po mirkymo bandiniai pasveriami hidrostatinėmis svarstyklėmis, taip randama bandinių masė vandenyje m_3 , tada jie apšluostomi drėgnu audeklu ir pasveriami. Taip randama bandinio masė ore m_4 .

Bandinių sotinimas kapiliarinio pasiurbimo būdu vakuume

Bandiniai džiovinami iki pastoviosios masės džiovinimo spintoje $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje. Sausi bandiniai dedami į eksikatorių darbine plokštuma žemyn ant atramų. Eksikatorius uždaromas ir bandiniai vakuumuojami iki 1,92–2,22 kPa (tai yra nuo 0,98 iki 1,02 atm). Taip jie išlaikomi 50–60 minučių. Paskui į eksikatorių įleidžiama tiek vandens, kad jis kontaktų su darbinio paviršiumi. Pasiurbimo procesas turi vykti 10 ± 1 min, išlaikant sistemoje anksčiau minėtą vakuumavimo lygį. Trukmė kontroliuojama sekundometru. Užbaigus bandymą sistema užpildoma oru, eksikatorius atidaromas, bandiniai pasveriami svarstyklėmis ir randamos masės m_5 ir m_6 .

Bandinių tūrio nustatymas

Bandinių tūris nustatomas sveriant bandinius hidrostatinėmis svarstyklėmis po jų įmerkio ciklinio vakuumavimo sąlygomis. Tūris nustatomas pagal formulę (14).

$$V = \frac{m_4 - m_3}{\rho_V} \cdot 100 \text{ (m}^3\text{)}; \quad (14)$$

čia: m_3 – įmirkyto vakuume bandinio masė vandenyje (g); m_4 – įmirkyto vakuume bandinio masė ore (g); ρ_V – vandens tankis (g/cm^3).

Bandinių struktūros išvestinių rodiklių nustatymas

Bandinių struktūrinės charakteristikos buvo tiriamos pagal metodiką atrastą literatūroje [28]. Buvo nustatytas sukietėjusių betono bandinių efektyvusis poringumas W_E , bendras bandinio poringumas W_R , poringos erdvės rezervas R , sąlyginis porų ir kapiliarų storis D , struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis N , kapiliarinis masės srauto greitis G . Pagal metodiką paskaičiuota bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui suirimo pradžia, ciklais.

Struktūros išvestinių rodiklių apskaičiavimo metodika, pateikta 2.1 lentelėje [28].

2.1 lentelė. Struktūros išvestiniai rodikliai ir jų apskaičiavimo metodika

Struktūros rodiklių charakteristika	Skaiciavimo formulė	Struktūros rodiklių aprašymas
Efektyvusis poringumas W_E (%)	$W_E = \frac{m_0}{V} \cdot \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$	Efektyvusis poringumas apibūdina efektyviai dirbančių porų ir kapiliarų procentinį kiekį bandinyje
Bendras bandinio poringumas W_R (%)	$W_R = \frac{m_0}{V} \cdot \frac{m_2 - m_0}{m_0} \cdot 100$	

2.1 lentelės tęsinys

Poringos erdvės rezervas R (%)	$R = \left(1 - \frac{W_E}{W_R}\right) \cdot 100$	Poringos erdvės rezervas lemia tą bandinio poringosios erdvės dalį, kuri iš pradžių nėra užpildyta vandeniu, bet pamažu užsipildo ciklinių bandymo metu. Kuo didesnis poringos erdvės rezervas, tuo medžiaga bus atsparesnė šalčiui
Sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis D (%)	$D = \frac{100 - W_R}{W_R}$	Sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis nusako svarbią medžiagos struktūros ypatybę, kurio įtaka teoriškai yra neabejojama.
Struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis N	$N = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\min}}$	Struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis nusako porų ir kapiliarų netolygumą pagal jų ilgį Kapiliarinis masės srauto greitis apibūdina efektyvų porų ir kapiliarų sąlyginį skersmenį
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi G (g/cm^2)	$G = \frac{m_3 - m_0}{S}$	
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptčiai G (g/cm^2)	$G = \frac{m_4 - m_0}{S}$	
Kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis g (g/cm^2)	$g = \frac{m_5 - m_0}{S}$	

Betono struktūros išvestiniams rodikliams apskaičiuoti buvo taikomi bandymais nustatyti rodikliai:

m_0 – visiškai sauso bandinio masė (g);

m_1 – normaliomis sąlygomis įmirkusio betono bandinio masė (g);

m_2 – įmirkyto vakuume bandinio masė (g);

m_3 – vakuume įsotinto kapiliarinio pasiurbimo būdu bandinio masė, kai sotinimas vyksta per tą plokštumą, kuri eksploatuojant būtų šaldoma (g);

m_4 – vakuume įsotinto kapiliarinio pasiurbimo būdu bandinio masė, kai sotinimas vyksta per tą plokštumą, kuri eksploatuojant būtų statmena šaldomai plokštumai (g);

m_5 – normaliomis sąlygomis įsotinto kapiliarinio pasiurbimo būdu bandinio masė (g);

V – bandinio tūris (cm^3);

$h_{\max}$ – didžiausia kapiliarinio pakilimo pagal sudrėkimo frontą vertė (mm);

$h_{\min}$ – mažiausia kapiliarinio pakilimo pagal sudrėkimo frontą vertė (mm);

S – bandinio darbinio paviršiaus plotas (cm^2).

Atlikus visus bandymus ir nustačius struktūros rodiklius, pagal formules (15) ir (16) apskaičiuojama bandinio suirimo pradžia F_{RE1} ir pabaiga F_{RE2} .

$$F_{RE1} = 0.231 \cdot \frac{R^{1.068} \cdot D^{1.345} \cdot G_1^{0.275} \cdot G_2^{0.663}}{N^{0.285} \cdot g^{1.034}} \quad (\text{sąlyginiai ciklai}); \quad (15)$$

$$F_{RE1} = 0.223 \cdot \frac{R^{1.465} \cdot D^{0.759} \cdot G_1^{0.383} \cdot G_2^{0.852}}{N^{0.168} \cdot g^{1.034}} \quad (\text{sąlyginiai ciklai}). \quad (16)$$

Apskaičiavus betono suirimo pradžią ir pabaigą, pagal empirinę lygtį (17) galima prognozuoti betono ilgaamžiškumą.

$$\tau = e^{3.31981 + 0.00524 \cdot F_{RE}} \quad (\text{sąlygiškai šalti sezonai}) \quad (17)$$

čia: τ – sąlygiškai šalti sezonai; F_{RE} – eksploatacinio atsparumo šalčiui sąlygiški ciklai.

2.2. Betono sudėties projektavimo metodai

Šiame skyriuje išdėstyti betono mišinio iš antrinės skaldos sudėties projektavimo metodai ir principai. Norint gauti reikiamos struktūros betoną, reikia tinkamai parinkti komponentus ir teisingai suprojektuoti betono sudėtį [46]. Betono sudėtis gali būti parenkama skaičiuojamuoju – eksperimentiniu būdu arba naudojantis lentelėmis, grafikais ir nomogramomis [38, 46].

Skaiciuojamasi s– eksperimentinis betono sudėties parinkimas. Norint apskaičiuoti betono sudėtį pagal formules, atliekami tokie veiksmai:

4.3 Nustatomas vandens ir cemento santykis, kuris apytikriai apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V/C = \frac{A \cdot f_c}{f_b + 0,5 \cdot A \cdot f_c} \quad (18)$$

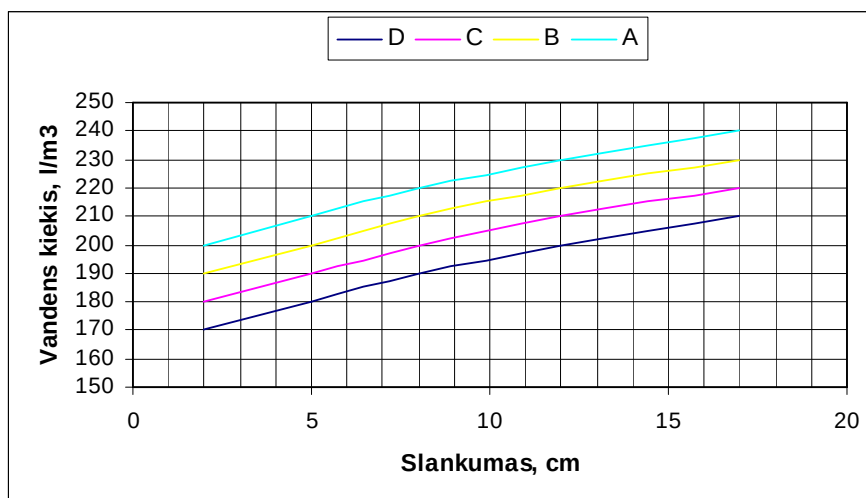
čia: f_b – projektinis betono stipris gniuždant, MPa; f_c – cemento stipris gniuždant nustatomas, MPa; C/V – cemento ir vandens kiekių santykis, vieneto dalimis; A – koeficientas, nusakantis medžiagų kokybę. Koeficientas A nustatomas pagal lentelę 2.2.

2.2 lentelė. Koeficiento A reikšmės

Žaliavų kokybė	Koeficiento A vertė
Aukšta kokybė	0,65
Vidutinė kokybė	0,60
Bloga kokybė	0,55

4.4 Parenkamas vandens kiekis. Jis priklauso nuo mišinio konsistencijos, tai yra nuo mišinio slankumo ir nuo užpildo stambumo. Reikalingas vandens kiekis parenkamas pagal grafiką, pateiktą 17 paveiksle. Vandens kiekis tikslinamas priklausomai nuo smulkaus

užpildo charakteristikų. Jei naudojamas smėlis smulkus papildomai pridedama 10 l vandens, jei smėlis stambus – 10 l vandens iš bendrojo kiekio atimama.



17 pav. Vandens kiekio nustatymo grafikas

Užpildo stambumas: A – 10 mm, B – 20 mm, C – 40 mm, D – 70 mm

4.5 Cemento kiekis C, (kg)

cemento kiekis, kg, apskaičiuojamas žinant vandens cemento santykį ir pagal 16 pav. nustačius mišiniui reikalingą vandens kiekį, pagal 19 formulę:

$$C = \frac{V}{V/C} \quad (19)$$

4.6 Stambiojo užpildo kiekis Ž, (kg)

Stambiojo užpildo kiekis apskaičiuojamas pagal 20 formulę:

$$\check{Z} = \frac{1000}{\frac{T \cdot k}{\rho_{\check{Z},pl}} + \frac{1}{\rho_{\check{Z},t}}} \quad (20)$$

čia: T – užpildo tuštumėtumas; $\rho_{\check{Z},pl}$ – užpildo piltinis tankis (g/cm^3); $\rho_{\check{Z},t}$ – užpildo tankis (g/cm^3); k – užpildo tuštumų perpildymo koeficientas, nustatomas pagal 2.3 lentelę.

2.3 lentelė. Užpildo tuštumų perpildymo koeficientai

Cemento kiekis, kg/m^3	V/C santykis				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	–	–	1,26	1,32	1,38
300	–	1,3	1,36	1,42	–
350	1,32	1,38	1,44	–	–
400	1,4	1,46	–	–	–
500	1,52	1,56	–	–	–
600	1,56	–	–	–	–

4.7 Smėlio kiekis S_m (kg)

Smėlio kiekis apskaičiuojamas gal šią formulę:

$$S_m = \left[1000 - \left(\frac{C}{\rho_{c,t}} + V + \frac{\check{Z}}{\rho_{\check{z},t}} \right) \right] \cdot \rho_{Sm,t}; \quad (21)$$

čia: $\rho_{Sm,t}$ – smėlio dalelių tankis (g/cm^3); $\rho_{c,t}$ – cemento tankis (g/cm^3); C – cemento kiekis (kg); V – vandens kiekis (l); $\check{Z}$ – stambaus užpildo kiekis (kg).

Betono sudėties parinkimas naudojantis lentelėmis, grafikais ir nomogramomis. Norint parinkti betono sudėtį pagal šį parinkimo metodą, reikia atlikti tokius veiksmus:

- **Vandens ir cemento santykis**

Vandens cemento santykis apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$V/C = \frac{A \cdot f_c}{\frac{f_b}{K_1 K_2} + 0,5 \cdot A \cdot f_c}; \quad (22)$$

čia: f_b – projektinis betono stipris gniuždant (MPa); f_c – cemento stipris gniuždant nustatomas (MPa); C/V – cemento ir vandens kiekių santykis, vieneto dalimis; A – koeficientas, nusakantis medžiagų kokybę, nustatomas pagal 2.4 lentelę; K_1, K_2 – koeficientai, nustatomi pagal 2.5 lentelę.

Koeficientas A nustatomas pagal 2.4 lentelę. Koeficientas A priklauso nuo naudojamų užpildų kokybės ir jų švarumo.

2.4 Koeficiento A reikšmės priklausomai nuo naudojamų užpildų

Užpildo rūšis	Molio, įvairių dulkių kiekis ant užpildų (%)	Suminis molio, įvairių dulkių kiekis, esantis 3 kg skaldos ir 1 kg smėlio	Koeficiento A reikšmė, priklausomai nuo naudojamų užpildų		
			Žvirgždas	Gamtinė skalda	Upių arba jūros skalda
Žvirgždas (skalda)	0	0	0,64	0,6	0,57
Smėlis	0				
Žvirgždas (skalda)	0	0,75	0,61	0,56	0,53
Smėlis	3				
Žvirgždas	1	1,5	0,58	0,53	0,5
Smėlis	3				
Žvirgždas (skalda)	2	2,2	0,55	0,5	0,47
Smėlis	3				
Žvirgždas (skalda)	2*	2,8	0,52	0,47	0,44
Smėlis	5*				

* Jeigu ant užpildų yra dulkių apvalkalas, tai tokie užpildai naudojami žemų klasių betono gamybai

2.5 lentelė. Koeficientų K_1 ir K_2 reikšmės

Mineraloginė cemento sudėtis ir gamybos sąlygos	Koeficientų reikšmės	
	K_1	K_2
Betonas, išlaikytas garuose		
Daugiaaliuminatinis ($C_3A > 10, < 15 \%$)	0,88	–
Vidutiniškai aliuminatinis ($C_3A < 10, > 6 \%$)	0,92	–
Mažai aliuminatinis ($C_3A < 6 \%$)	0,99	–
Stipriai alitinis ($C_3S > 55 \%$)	0,92	–
Vidutiniškai alitinis ($C_3S < 55 \%$)	0,94	–
Stipriai belitinis ($C_2S > 40 \%$)	1,02	–
Vidutiniškai belitinis ($C_2S > 25 \%$)	0,98	–
Aliumoferitinis ($C_4AF > 18 \%$)	0,97	–
Betonas, išlaikytas garuose ir kietinamas natūralioje aplinkoje		
Aukštos kokybės gamybos technologija (žaliavų dozavimas pagal masę, kokybiškos formos, visiška betono technologijos kontrolė)	–	0,98
Vidutinės kokybės gamybos technologija	–	0,95
Žemos kokybės gamybos technologija	–	0,92

Apskaičiuoto vandens ir cemento santykio V/C reikšmę palyginame su leistinosiomis reikšmėmis šiai betono rūšiai. Jeigu apskaičiuoto V/C reikšmė yra didesnė už leistiną reikšmę, tai pasirenkame leistiną reikšmę, o jei V/C reikšmė yra mažesnė už leistiną reikšmę, tai priimame apskaičiuotą reikšmę.

▪ Vandens kiekio nustatymas

Vandens kiekis V_1 nustatomas pagal grafikus, pateiktus 16 ir 17 paveiksluose betono sudėties parinkimo metodikoje [46]. Parinkimas pagal grafikus priklauso nuo betono mišinio plastiškumo, skaldos stambumo, kuris gali būti 10, 20, 30, 40, 60, 80 ir 150 mm. Gautas vandens kiekis ir vandens kiekio pataisos koreguojamas pagal pateiktą metodiką [46]. Įvertinus visus vandens kiekio tikslinimus, reikalingas vandens kiekis apskaičiuojamas pagal 23 formulę:

$$V = V_1 + \sum \Delta V . \quad (23)$$

▪ Cemento kiekio nustatymas

Reikalingas cemento kiekis nustatomas pagal 24 formulę:

$$C = \frac{V_1 + \sum \Delta V}{V/C} . \quad (24)$$

Gautas cemento kiekis lyginamas su rekomenduojamuoju cementu kiekiu, kuris yra pateiktas atitinkamame standarte [23].

▪ **Cemento tešlos absoliutaus tūrio nustatymas**

Cemento tešlos absoliutusias tūris nustatomas pagal 25 formulę:

$$V_{c.t} = V + \frac{C}{\gamma_c}; \quad (25)$$

čia: V – vandens kiekis (l); C – cemento kiekis (kg); γ_c – cemento tankis (g/cm^3).

▪ **Užpildų absoliutaus tūrio nustatymas**

Absoliutus užpildų tūris nustatomas pagal 26 formulę:

$$V_{užž.} = 1000 - V_{c.t}; \quad (26)$$

▪ **Skaldos išeigos nustatymas**

Skaldos išeiga nustatoma pagal 27 formulę:

$$\check{Z} = \frac{\gamma_{\check{z}.pl} \cdot 1000}{1 + V_{\check{z}.tušt.}(\alpha - 1)}; \quad (27)$$

čia: $\gamma_{\check{z}.pl}$ – skaldos piltinis tankis (g/cm^3); $V_{\check{z}.tušt.}$ – skaldos tuštumų tūris; α – koeficientas, kuris priklauso nuo betono mišinio formavimo būdo ir nustatomas pagal monogramas.

Santykis tarp skaldos frakcijų nustatomas pagal skaldos mišinius, turinčius didžiausią tankį ir mažiausią tuštymėtumą. Esant dviem frakcijoms, parinkimas atliekamas taip: pirmas mišinys – 40 % smulkios ir 60 % stambios frakcijos; antras mišinys – 50 % smulkios ir 50 % stambios frakcijos; trečias mišinys – 60 % smulkios ir 40 % stambios frakcijos. Parinkus skaldos mišinius, visos frakcijos sumaišomos ir nustatomas mišinio piltinis tankis. Už pagrindą priimamas mišinys, turintis didžiausią piltinį tankį. Esant dviem – keturiom skaldos frakcijoms, jų optimalus santykis nustatomas pagal 2.6 lentelę.

2.6 lentelė. Optimalus skaldos frakcijų santykis

Skaldos frakcijų kiekis	Skaldos stambumas, (mm)	Skaldos dalelių dydis (mm)	Optimalus frakcijos kiekis mišinyje (%)	Orientacinis skaldos mišinio piltinis tankis (kg/m^3)	Skaldos kiekis (%)	
					Smulki	Stambi
2	20	5–10	35	1,4	50	20
		10–20	65		50	80
	40	5–20	45	1,46	60	25
		20–40	55		40	75
	70	5–40	55	1,52	70	37
		40–70	45		30	67
	120	5–70	55	1,54	70	65
		70–120	45		30	35
3	40	5–10	18	1,47	23	12
		10–20	26		40	12
		20–40	56		37	76

	2.6 lentelės tęsinys					
	70	5–20	26	1,53	32	18
		20–40	28		43	18
		40–70	46		25	64
	120	5–40	32	1,55	40	24
		40–70	24		30	16
		70–120	44		30	60
	150	5–40	27	1,57	35	18
		40–70	20		25	12
		70–150	53		40	70
4	70	5–10	12	1,54	16	9
		10–20	14		16	10
		20–40	28		40	17
		4–70	46		28	64
	120	5–20	16	1,56	20	13
		20–40	16		20	10
		40–7	24		30	17
		70–120	44		30	60
	150	5–20	14	1,58	17	11
		20–40	12		18	7
		40–70	20		25	12
		70–150	54		40	70

▪ Smėlio kiekio nustatymas

Smėlio kiekis nustatomas pagal 28 formulę:

$$S = \left[1000 - \left(\frac{\check{Z}}{\gamma_{\check{z}}} + V + \frac{C}{\gamma_c} \right) \right] \cdot \gamma_s ; \quad (28)$$

čia $\gamma_{\check{z}}$ – skaldos tankis (g/cm^3); γ_s – smėlio dalelių tankis (g/cm^3); γ_c – cemento tankis (g/cm^3); C – cemento kiekis (kg); V – vandens kiekis (l); $\check{Z}$ – skaldos kiekis (kg).

Taip pat smėlio kiekis gali būti nustatomas pagal 29 formulę:

$$S = (V_{užp.} - V_{\check{z}}) \cdot \gamma_s . \quad (29)$$

▪ Betono tūrio nustatymas

Betono tūris nustatomas pagal 30 formulę:

$$\gamma_{bet.} = V + C + S + \check{Z} ; \quad (30)$$

čia: V – vandens kiekis (l); C – cemento kiekis (kg); S – smėlio kiekis (kg); $\check{Z}$ – skaldos kiekis (kg).

Tiksliai nustačius betono sudėtinių dalių tankius, faktinis betono tankis turi būti lygus arba artimas teoriniam tankiui. Leidžiama paklaida $\pm 1 \%$. Jei paklaida didesnė nei 1% , tai betono sudėtis tikslinama pagal faktinį betono tankį.

- **Betono absoliutaus komponentų tūrių nustatymas**

Betono absoliutus komponentų tūris nustatomas pagal 31 formulę:

$$V_{bet.} = V + \frac{C}{\gamma_c} + \frac{S}{\gamma_s} + \frac{\check{Z}}{\gamma_{\check{z}}}; \quad (31)$$

čia: V – vandens kiekis (l); C – cemento kiekis (kg); S – smėlio kiekis (kg); $\check{Z}$ – skaldos kiekis (kg); γ_c – cemento tankis (g/cm^3); $\gamma_{s,t}$ – smėlio dalelių tankis (g/cm^3); $\gamma_{\check{z}}$ – skaldos tankis (g/cm^3).

Tiksliai nustačius betono mišinio, kurio plastiškumas didesnis nei 1–2 cm, sudėtinių dalių tankį bendras absoliutusias medžiagų tūris yra 1000 l. Leidžiama paklaida dėl pasiurbto oro – 1 %. Standžiuose mišiniuose dėl įtraukto oro kiekio, absoliutusias medžiagų tūris gali būti nuo 950 l iki 990 l.

2.3. Betono bandinių gamyba

Svarbios betono mišinio gamybos operacijos yra medžiagų dozavimas ir sumaišymas. Medžiagos buvo sveriamos svarstyklėmis. Betono mišiniai maišomi laboratorijoje rankiniu būdu. Betono suklojimas į formas ir sutankinimas viena iš pagrindinių formavimo operacijų. Pirmiausia formos mechaniniu būdu buvo sutepamos alyva, tam kad betonas nesukibtų su formomis. Suformavus 10x10x10 cm bandinius, formose, jie buvo sutankinti ant vibroaikštelės. Vibruojant betono mišinys tankėja dėl betono mišiniui perduodamų dažnai pasikartojančių priverstinių svyravimų. Vibruojamas betono mišinys įgauna tiksotropinių savybių, t.y. laikiną plastiškumą, jo dalelės pajuda, sukrenta į tuštumas, betono mišinys sutankėja. Vibravimo trukmė – 1 min, nes vibruojat per ilgai, betono mišinys gali išsisluoksniuoti. Suformuoti ir sutankinti bandinėliai po 24 valandų išimami iš formų ir laikomi 20 °C temperatūros vandenyje iki bandymų.

3. EKSPERIMENTINĖ – TIRIAMOJI DALIS

3.1. Žaliavų bandymų rezultatai

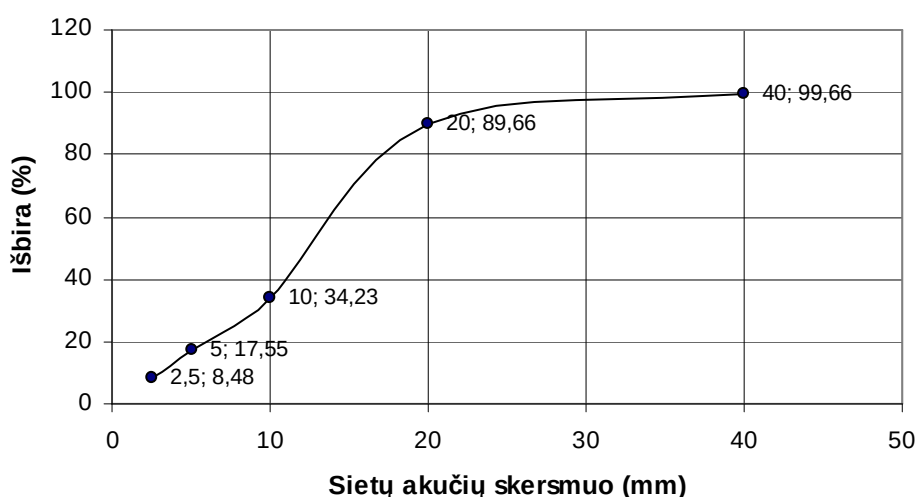
Šiame skyriuje yra išdėstyti žaliavų naudojamų betono gamyboje, tyrimo rezultatai.

Atliekant tyrimus buvo nustatytos skaldos, pagamintos iš betono atliekų, pagrindinės charakteristikos: stambaus užpildo dalelių tankis, piltinis tankis, tuštymėtumas, granulimetrinė sudėtis. 3.1 lentelėje pateiktos nustatytos skaldos iš betono atliekų savybės.

3.1 lentelė. Skaldos iš betono atliekų pagrindinės savybės

Charakteristika	Matavimo vienetas	Vertė
Dalelių tankis $\rho_{z.t.}$	g/cm^3	2,26
Piltinis tankis $\rho_{z.pl.}$	g/cm^3	1,13
Tuštymėtumas T	%	50

Skaldos, pagamintos iš betono atliekų granulimetrinė sudėtis pavaizduota 18 paveiksle.



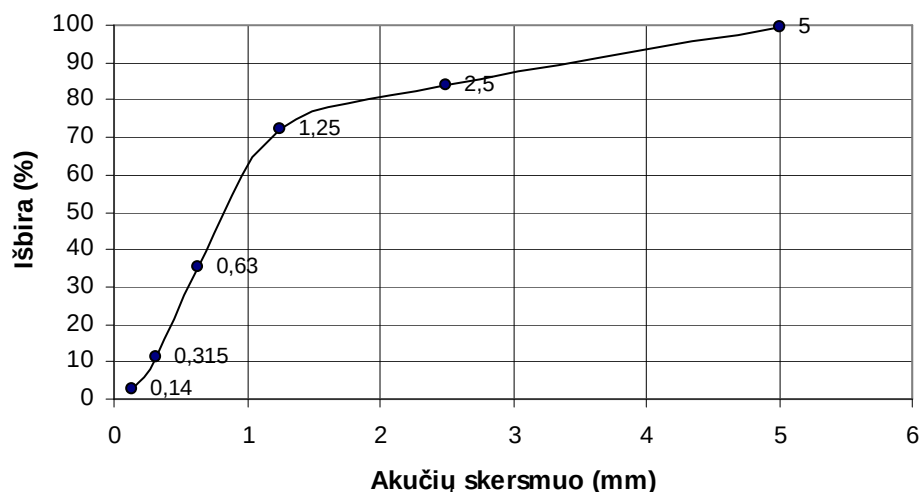
18 pav. Skaldos iš betono atliekų granulimetrinės sudėties kreivė

Etaloniniam bandiniui pagaminti buvo naudota dolomitinės ir granitinės skaldos mišinys, kurio piltinis tankis 1425 kg/m^3 , dalelių tankis 2370 kg/m^3 , stiprumas pagal užpildo dalelių skalumą 13,72 %.

Norint racionaliai parinkti betono sudėtį, reikia nustatyti pagrindines smėlio savybes, reikalingas betono sudėties skaičiavimuose. Darbo metu buvo nustatytos smėlio pagrindinės savybės: smėlio dalelių tankis, piltinis tankis, tuštymėtumas, buvo nustatyta granulimetrinė sudėtis. Visi nustatyti parametrai yra pateikti 3.2 lentelėje. Nustačius smėlio granulimetrinę sudėtį, buvo sudaryta granulimetrinė sudėties kreivė, kuri yra pavaizduota 19 paveiksle.

3.2 lentelė. Pagrindinės smėlio savybės

Charakteristika	Matavimo vienetas	Vertė
Dalelių tankis $\rho_{z.t.}$	g/cm^3	2,68
Piltinis tankis $\rho_{z.pl.}$	g/cm^3	1,64
Tuštymėtumas T	%	38,8
Drėgnumas W	%	0,1



19 pav. Smėlio granulometrinės sudėties kreivė

Gaminant betoną su užpildais iš betono atliekų, buvo naudotas CEM I 42,5 N portlandcementis. Portlandcemenčio, naudojamo betono gamyboje, fizikinės–mechaninės savybės yra pateiktos 3.3 lentelėje, o cheminės portlandcemenčio savybės pateiktos 3.4 lentelėje.

Darbo metu buvo nustatytos pagrindinės portlandcemenčio savybės: savitasis dalelių tankis ir piltinis tankis, rišimosi pradžia ir pabaiga bei buvo nustatytas portlandcemenčio tešlos normalusis tirštumas. Nustatytos portlandcemenčio savybės pateiktos 3.5 lentelėje, o portlandcemenčio tešlos normalaus tirštumo nustatymo rezultatai pateikti 3.6 lentelėje.

3.3 lentelė. Cemento fizikinės – mechaninės savybės

Parametras	Vertė
Ankstyvasis stipris gniuždant po 2 parų (N/mm^2)	19
Standartinis stipris gniuždant po 28 parų (N/mm^2)	49
Savitasis paviršius (cm^2/g)	3200

3.4 lentelė. Cemento cheminės savybės

SO ₃ (%)	Na ₂ O ekvival.	Kaitmenys (%)	Netirpmenys (%)	Cl– (%)
2,5	≤ 0,8	2,8	0,7	0,01

3.5 lentelė. Pagrindinės nustatytosios portlandcemenčio savybės

Charakteristika	Matavimo vienetas	Vertė
Dalelių savitasis tankis $\rho_{c.t.}$	g/cm ³	2,75
Piltinis tankis $\rho_{z.pl.}$	g/cm ³	1,02
Rišimosi pradžia	min	170
Rišimosi pabaiga	min	220

3.6 lentelė. Portlandcemenčio tešlos normalaus tirštumo nustatymo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai			
		1	2	3	4
Portlandcemenčio masė	m (g)	500	500	500	505
Vandens kiekis	V (g)	125	135	145	145
Vandens kiekis	V_1 (%)	25	27	29	28,7
Per kiek strypelis nepasiekė dugno	mm	35	28	3	7

Etaloniniams bandiniams gaminti naudojamo cemento žymuo CEM II 42,5 N A/L. Tai klinties portlandcementis atitinkantis LST EN 197-1:2001 standarto reikalavimus. Jame yra 80–94 % klinkerio, 6–20 % klinties ir 0–5 % papildomųjų komponentų. Portlandcemenčio savitasis tankis 3000 kg/m³. Cemento piltinis tankis – 900 kg/m³. Portlandcemenčio vandens sąnaudos – 27 %. Portlandcemenčio miltelių savitasis paviršius 300 m²/kg.

3.2. Tiriamojo betono sudėtys ir bandinių gamyba

Atliekant tyrimus, pagal antrą betono parinkimo metodiką buvo pagamintas 3 sudėčių betonas: B-I – betono klasė C 25/30, B-II – C 30/37, B-III – C 35/45. Betono mišinių sudėtys pateikiamos 3.7 lentelėje. Betono bandinių charakteristikos buvo lyginamos su etaloninių bandinių charakteristikomis, kurie buvo pažymėti B_E, šio betono klasė C 30/37, šio betono sudėtis: cemento smėlio ir skaldos santykis 1:2,6:3,3 atitinkamai.

B-I, B-II, B-III, B_E betono mišinių slankumas 3 cm. B-I, B-II, B-III betono sudėties stambaus užpildo frakcinė sudėtis tokia (masės dalimis nuo bendrojo užpildų kiekio):

5–10 mm frakcijos stambumo užpildo buvo panaudota viena dalis,

10–20 mm – 2 dalys,

20–40 mm – 2 dalys.

B-I mišinyje vandens ir cemento santykis V/C – 0,52, B-II mišinyje V/C – 0,45, B-III mišinyje V/C – 0,40, o B_E mišinyje V/C – 0,58.

3.7 lentelė. Betono mišinių sudėtys

Sudėties žaliavos		Betono žymuo		
		B-I	B-II	B-III
Stambus užpildas (kg/m ³)	5–10 mm	189	186	183
	10–20 mm	378	372	366
	20–40 mm	378	372	366
Smulkus užpildas (kg/m ³)		726	690	661
Cementas (kg/m ³)		352	407	457
Vanduo (l/m ³)		183	183	183

3.3. Betono stipruminės savybės

Betono stiprumą lemia cemento klasė, vandens ir cemento santykis (V/C), užpildų kokybė.

Betono kubeliai po 3, 7 ir 28 parų kietėjimo vandenyje buvo gniuždomi presu. Betono stipris gniuždant buvo nustatomas pagal LST EN 12390-3. Ardančiosios gniuždymo jėgos pridėjimo greitis buvo 5 kN/s. Betono stipris gniuždant buvo apskaičiuotas pagal formulę (32):

$$f_{cm} = \frac{F_b}{A_b}; \quad (32)$$

čia: F_b – ardančioji gniuždymo jėga (kN); A_b – bandinio skerspjūvio plotas (mm²).

Betono stiprio gniuždant nustatymo rezultatai pateikti 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Betono stiprio gniuždant nustatymo rezultatai

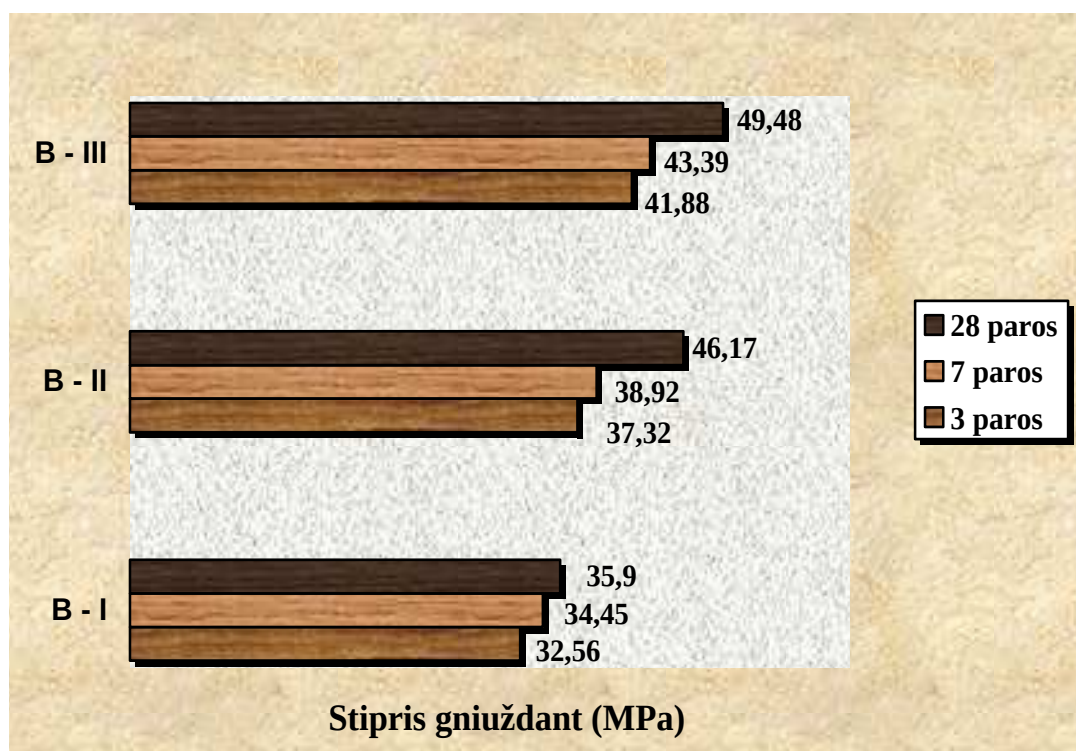
Betono žymuo ir klasė	Stipris (MPa)		
	Po 3 parų	Po 7 parų	Po 28 parų
B-I (C 25/30)	32,58	34,45	35,90
B-II (C 30/37)	37,32	38,92	46,17
B-III (C 35/45)	41,88	43,39	49,48

Skirtingos sudėties betono stipriai priklausomai nuo kietėjimo trukmės didėjo nevienodai. 3.9 lentelėje pateiktas betono stiprio augimas išreikštas procentais, priklausomai nuo kietėjimo trukmės. Visų betono sudėčių betono stipris gniuždant jau po 3 parų kietėjimo pasiekė daugiau nei 80 % savo klasinio stiprio.

3.9 lentelė. Betono stiprio gniuždant didėjimas

Betono žymuo	Stipris išreikštas procentais (%)		
	Po 3 parų kietėjimo	Po 7 parų kietėjimo	Po 28 parų kietėjimo
B-I	91	96	100
B-II	81	84	100
B-III	84	88	100

20 paveiksle pateikta betono bandinių B-I, B-II, B-III stiprio priklausomybė nuo kietėjimo trukmės.



20 pav. Betono stiprio priklausomybė nuo kietėjimo trukmės [autorės]

Projektuojant betono sudėtį buvo numatomi gauti C 25/20, C 30/37 ir C 35/40 klasių betonai. Atlikus stiprio gniuždant tyrimus, pastebėta, jog betono, pagaminto naudojant stambius užpildus iš betono atliekų, stipris yra artimas betono, pagaminto naudojant natūralią skalda, stipriui.

21 ir 22 paveiksluose pateikti betono B-II ir B-III bandinėlių vaizdai po sugniuždymo praėjus 28 kietėjimo paroms.

Pastebėta, kad betono bandiniai, kurių nustatomas stiprumas, suyra dėl skerspjuvyje atsirandančių tempimo įtempimų: gniuždomų kubelių skersiniai matmenys didėja, tarp betono ir atraminių preso plokščių atsirandanti trintis priešinasi poslinkiams. Dėl tos priežasties betoninis bandinys deformuojasi netolygiai. Skersinės deformacijos yra didžiausios bandinio viduryje, mažiausios – prie preso plokščių.



a



b

21 pav. Betono bandiniai po gniuždymo: a – bandinys pažymėtas B_E žymeniu; b – bandinys pažymėtas B-II žymeniu [autorės]



a



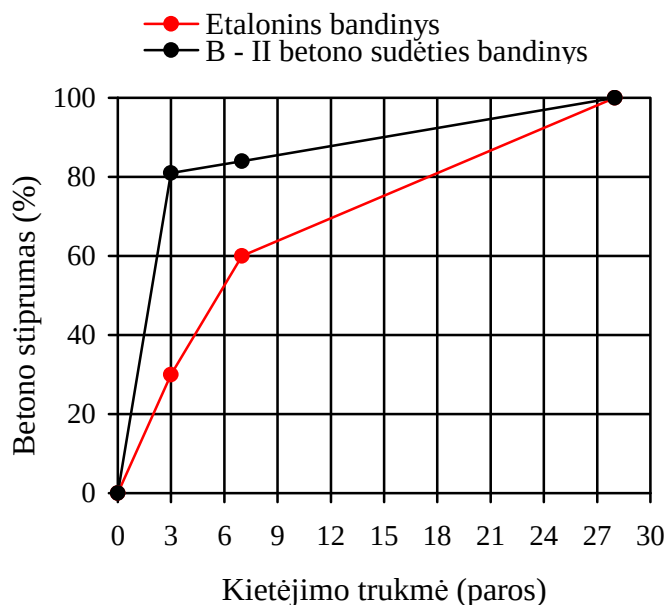
b

22 pav. Betono bandiniai po gniuždymo: a – bandinys pažymėtas B-II žymeniu; b – bandinys pažymėtas B-III žymeniu [autorės]

Betono stiprumas priklauso nuo kietėjimo trukmės. Pirmosiomis kietėjimo paromis, betono stiprumas pasiekia 30 % projektinio stiprio, jau po 7–14 parų įgyja 60–80 % savo klasės stiprumo [5]. Atliekant pagamintų betono bandinių tyrimus, priklausomai nuo betono mišinio sudėties, po 3 parų kietėjimo betono bandiniai (B-I, B-II, B-III) įgijo 81–91 % projektinio stiprio.

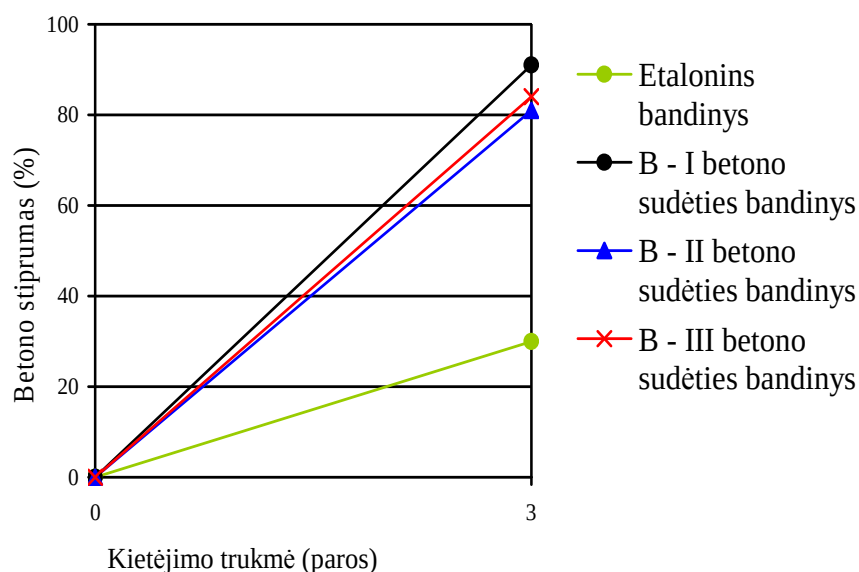
Atliekant tyrimus buvo pastebėta, kad didžiausią ankstyvąjį stiprumą, procentais, įgijo betonas pažymėtas B-I, kurio gamybai buvo panaudotas didžiausias smulkaus ir stambaus užpildo kiekis ir optimalus cemento kiekis, reikalingas tam tikrai betono klasei gauti. B-II ir B-III betono bandiniuose didėjant cemento kiekiui smulkiųjų ir stambiųjų užpildų kiekis buvo mažesnis. 23 paveiksle pavaizduotas betono, kurio klasė C 30/37, stiprio didėjimas jam kietėjant. Etaloninių bandinių (B_E) stipris didėja taip kaip aprašyta literatūroje [5], o betono, kurio žymuo B-II stipris po 3 kietėjimo parų pasiekė 81 % savo klasinio stiprio. Toks staigus stiprio didėjimas pradiniam kietėjimo etape gali būti paaiškinamas tuo, kad gaminant šį betoną buvo naudojama CEM I portlandcemenčio rūšis, kurioje be papildomųjų komponentų yra 95–100 % klinkerio.

Etaloninio bandinio ir bandinių, kurių žymuo B-I, B-II, B-III pagamintų naudojant betono atliekas, stipris gniuždant išreikštas procentais nuo betono klasinio stiprio, po 3 kietėjimo parų pateiktas 24 paveiksle.



23 pav. Etaloninio ir B-II bandinių stiprio priklausomybė nuo kietėjimo trukmės [autorės]

Betono stipris priklauso nuo daugelių veiksnių, tokių kaip: betone esančio cemento kiekio ir aktyvumo, V/C santykio, užpildų kokybės, betono kietėjimo trukmės ir temperatūros, aplinkos drėgnumo ir kt. Nuo cemento aktyvumo ir kiekio betone priklauso jo stipris. Cemento kiekį racionalu didinti, bet tik tai iki tam tikros ribos, nes per didelis jo kiekis blogina betono savybes, betonas daugiau slūgsta, darosi valkus, betone gali pasirodyti slūgimo ir temperatūriniai plyšiai. Didelę reikšmę betono stiprumui turi užpildų kokybė, jų stiprumas, granulimetrinė sudėtis, stambumas, susidėstymas ir sukibimas su cemento akmeniu, mišinio sutankinimo vienodumas. Kuo smulkesnis smėlis tuo didesnis jo lyginamasis paviršius, tuo daugiau reikia vandens ir cemento gaminant betoną. Jei betono gamyboje naudojamas stambus užpildas, kuris neatitinka norminės granulimetrinės sudėties, mišinyje gali susidaryti daug tuštumų, betono stipris sumažėja 5–16%. Kuo didesni stambūs užpildai, tuo mažiau vandens reikia gaminant betoną, tuo stipresnis išeina gaminys. V/C santykio priklausomybė paaiškinama tuo, kad cementas kietėdamas reaguoja tik su dalimi vandens. Likusi vandens dalis išgaruoja, sudaro poringa cementinio akmens struktūrą. Betono stiprėjimo trukmė priklauso nuo V/C santykio. Kuo didesnis V/C santykis, tuo mažesnė betono kietėjimo trukmė. Betonas kietėja greičiau, kylant temperatūrai. Drėgnoje 80–90 °C temperatūros garuose arba autoklavuose betonas kietėja daug greičiau, negu normaliomis sąlygomis.



24 pav. Etaloninio ir B-I, B-II, B-III betono bandinių stipris (procentais nuo klasinio stiprio) po 3 kietėjimo parų [autorės]

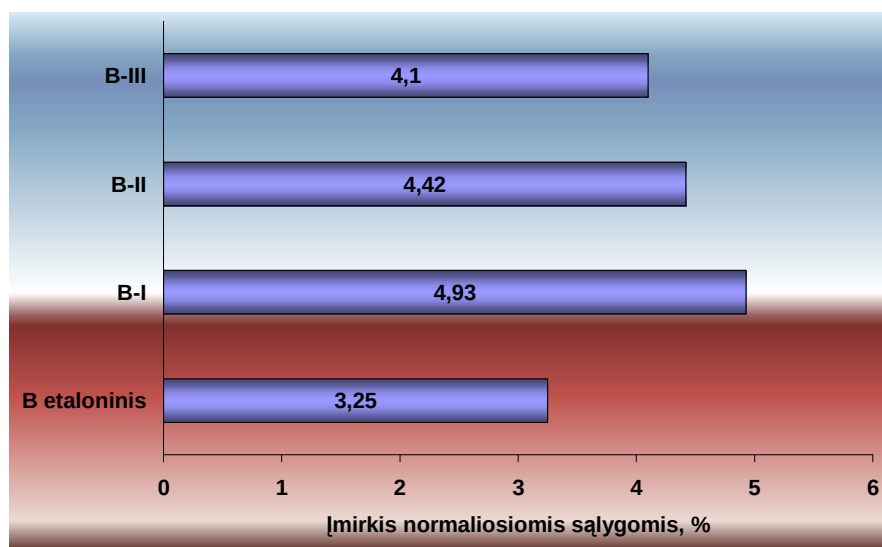
Po gniuždymo apžiūrėjus betono bandinius, kurių gamybai panaudotos betono atliekos matyti, kad betono lūžyje matyti naujai susiformavęs cementinis akmuo, smulkūs užpildai ir betono atliekos. 25 paveiksle pateiktas sugniuždyto betono bandinio fragmentas. Paveiksle gerai matyti, kad pagamintas betonas susideda iš smulkių užpildų ir stambių užpildų sujungtų sukietėjusiu cementiniu akmeniu. Taip pat paveiksle galime išskirti dvi cementinio akmens sritis besiskiriančias spalva; tai sritis pažymėta **1**, kuri susideda iš tamsesnės spalvos sukietėjusio cementinio akmens ir užpildų ir sritis pažymėta **2** susidedanti iš šviesesnės spalvos sukietėjusio cementinio akmens ir užpildų. Sritis pažymėta **2** – tai stambusis užpildas iš trupinto betono. Šis stambus užpildas susideda iš smulkaus, stambaus užpildo ir cemento akmens, kurie trupinimo metu išliko nesutrupinti ir buvo panaudoti kaip stambus užpildas naujo betono mišinio gamybai. Gniuždymo metu, suyrant betono bandiniui, irimas vyko ne tik per užpildų ir cementinio akmens kontakto vietą, bet ir per pačius užpildus.



25 pav. Sugniuždyto betono bandinio fragmentas [autorės]

3.4. Betono bandinių struktūrinės savybės

Medžiagos įmirkis – tai medžiagos savybė įgerti ir sulaikyti tą drėgmę. Priklausomai nuo betono sudėties buvo gautas skirtingas betono įmirkis. 26 paveiksle pateiktas skirtingos sudėties betono bandinių įmirkis normaliomis sąlygomis.



26 pav. Betono bandinių įmirkis normaliomis sąlygomis

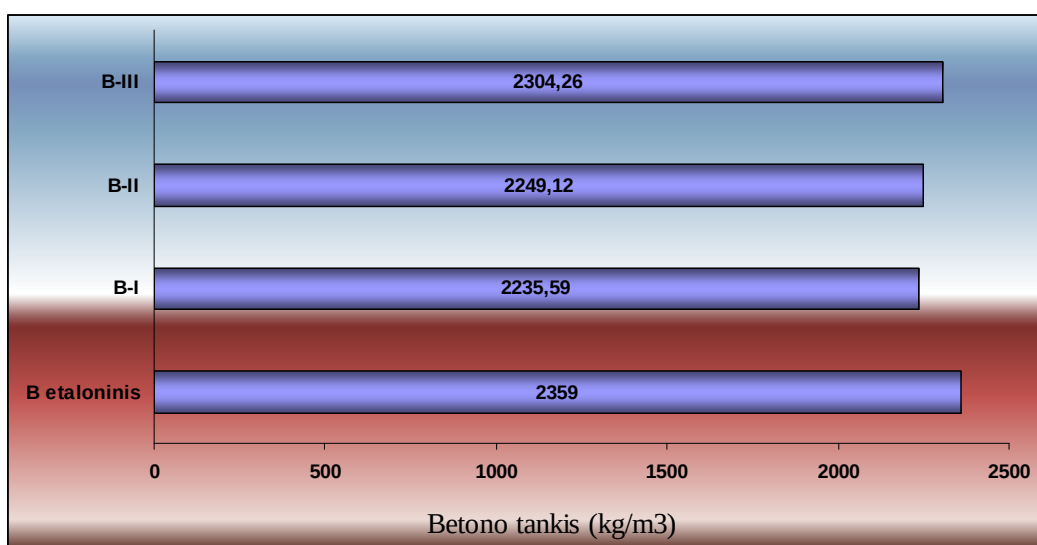
Pagal 26 paveikslo betono bandinių įmirkio normaliosiomis sąlygomis vertes galima teigti, kad betonas pagamintas naudojant stambiuoju užpildu trupintas betono atliekas turi mažesnę įmirkį nei betonas pagamintas naudojant įprastinius standartinius stambiuosius betono užpildus.

Betono tankis – tai natūralios būsenos medžiagos tūrio vieneto masė, išreiškiama absoliučiai sausos medžiagos masės ir tūrio santykiu. Betono tankis, tai nėra pastovus dydis ir jis priklauso nuo naudojamų žaliavų savybių ir gautos medžiagos poringumo. Betono tankis buvo apskaičiuotas pagal formulę (33):

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_b}; \quad (33)$$

čia: m_0 – visiškai sauso bandinio masė (g); V – bandinio tūris (cm³).

Etaloninio bandinio ir bandinių, kurių žymuo B-I, B-II, B-III pagamintų naudojant betono atliekas, tankiai pateikti 27 paveiksle.



27 pav. Betono bandinių tankis

Pagal 27 paveiksle betono tankio vertes galima teigti, kad betono, kurio gamybai buvo panaudotos betono atliekos, tankis yra artimas betono, pagaminto su natūralia skalda, tankiui. B-I betono bandinių gamybai buvo panaudotas didžiausia užpildų kiekis ir optimalus cemento kiekis. Tokio betono tankis buvo mažiausias. Mažėjant užpildų kiekiui ir didėjant cemento kiekiui, betono bandinių tankiai didėjo.

Bandinių struktūrinės charakteristikos buvo tiriamos pagal metodiką atrašytą literatūroje [25]. Buvo nustatytas sukietėjusių betono bandinių efektyvusis poringumas W_E , bendras bandinio poringumas W_R , poringos erdvės rezervas R , struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis N , kapiliarinis masės srauto greitis G . Pagal metodiką paskaičiuota bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui suirimo pradžia, ciklais.

Betono ilgaamžiškumą apibūdina eksploatacinis atsparumas šalčiui. Betono atsparumas šalčiui priklauso nuo betono poringumo, nes esant žemesnei temperatūrai į poras patekęs vanduo virsta ledu, kurio slėgis į betono sienelės ir plastiško ledo judėjimas užšalimo ir atitirpimo metu ardo betono karkasą. Betono poros, kapiliarai susisiečia tarpusavyje. Jų susijungimo vietoje yra oras arba vanduo. Kai poros ir kapiliarai nesusisiečia tarpusavyje ir yra atskirti kietais karkasais, tada poros ir kapiliarai yra užpildyti dujomis [28].

Darbo metu buvo nustatyti visi išvestiniai bandinių struktūros rodikliai, pagal bandinių efektyvų poringumą, apskaičiuota bandinių suirimo pradžia ir pabaiga. Pirmiausia buvo ištirtas etaloninis betono bandinys B_E , kurio klasė C 30/37. Buvo surasti etaloninio bandinio struktūros rodikliai, kurie yra pateikti 3.10 lentelėje.

3.10 lentelė. Etaloninio bandinio B_E struktūros išvestiniai rodikliai

Struktūros rodiklių charakteristika	Vertė
Efektyvusis poringumas W_E (%)	7,25
Bendras bandinio poringumas W_R (%)	10,40
Poringos erdvės rezervas R (%)	30,28
Sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis D (%)	8,62
Struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis N	2,5
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi G_1 (g/cm ²)	1,17
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptčiai G_2 (g/cm ²)	1,24
Kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis g (g/cm ²)	0,68

Vėliau buvo nustatyti betono B-II bandinių struktūros išvestiniai rodikliai. Buvo pasirinktas betonas, kurio sudėtis B-II, nes tokio betono stiprumas yra artimas betono, pagaminto su natūralia skalda, stiprumui, o jo klasė tokia pati C 30/37. Nustatyti betono B-II bandinių struktūros rodikliai pateikti 3.11 lentelėje.

Palyginus charakteristikų vertes pateiktas 3.10 ir 3.11 lentelėse matyti, kad efektyvusis ir bendrasis poringumas yra didesnis bandiniuose, kurie pagaminti naudojant trupintas betono atliekas. Tačiau apskaičiavus poringos erdvės rezervas, kuris lemia tą bandinio poringosios erdvės dalį, kuri iš pradžių nėra užpildyta vandeniu, bet pamažu užsipildo ciklinių bandymo metu, matyti, kad jis didesnis bandiniuose pagamintuose naudojant įprastinius betono užpildus. Iš literatūros [25] aišku, kad kuo didesnis poringos erdvės rezervas, tuo medžiaga bus atsparesnė šalčiui. Dėl to galima teigti, kad bandiniai pagaminti naudojant betono atliekas bus ne tokie atsparūs šalčiui, lyginant su bandiniais pagamintais naudojant standartinius stambiuosius užpildus.

3.11 lentelė. B-II betono bandinių struktūros išvestiniai rodikliai

Struktūros rodiklių charakteristika	Vertė
Efektyvusis poringumas W_E (%)	10,03
Bendras bandinio poringumas W_R (%)	12,03
Poringos erdvės rezervas R (%)	15,95
Sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis D (%)	15,37
Struktūros kryptingumo netolygumo rodiklis N	3
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi G_1 (g/cm ²)	0,76
Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptčiai G_2 (g/cm ²)	0,52
Kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis g (g/cm ²)	0,186

Įvertinus etaloninių bandinių struktūros rodiklius ir pritaikant medžiagų ilgaamžiškumo prognozavimo empirinę lygtį, buvo nustatyta, kad betonas B_E atlaikys 269 sąlygiškai šaltus sezonus.

Pagal atliktus skaičiavimus, galima teigti, kad betonas pagamintas pagal B-I sudėtį vidutiniškai išlaikys 205 sąlygiškai šaltus sezonus, B-II – 249, o B-III – 281 sąlygiškai šaltus sezonus.

IŠVADOS

1. Betoninių ir gelžbetoninių atliekų perdirbimo ir tvarkymo problemos aktualios šiais laikais, nes miestuose statoma vis daugiau naujų pastatų ir griunami seni, netinkantys eksploatuoti statiniai. Europos šalyse antrinis betono panaudojimas yra labai išvystytas, kadangi naudojama apie 90 % visų betono atliekų, o Lietuvoje antrinio betono panaudojimas sudaro apie 10–15 %. Mūsų šalyje, norint išvystyti betono ir gelžbetonio atliekų panaudojimą betono mišiniuose, reikia tirti betono atliekas ir jų panaudojimo galimybes.

2. Pagaminus skaldą iš betono atliekų, buvo nustatytos visos medžiagų charakteristikos, reikalingos betono sudėties projektavimui. Pagal tyrimų rezultatus matyti, kad stambaus užpildo pagaminto iš betono atliekų tuštymėtumas yra gana didelis ir siekia 50 %. Gaminant betono mišinius iš tokių užpildų reikalingas didesnis smulkiųjų užpildų kiekis, kurie užpildytų tuštumas tarp stambiųjų užpildų.

3. Pagal pasirinktą betono sudėties skaičiavimo metodiką, buvo apskaičiuota betono mišinių sudėtis, pagaminti, suformuoti ir sutankinti 10×10×10 cm dydžio kubo formos betono bandiniai. Suformuoti kubeliai po 3, 7 ir 28 parų kietėjimo vandenyje buvo gniuždomi presu. Betono, kurio gamyboje buvo panaudota skalda pagaminta iš betono atliekų, stiprumas po 28 parų kietėjimo buvo artimas betono stiprumui, kuris gaminamas su natūralia skalda. Visi betono bandiniai pagaminti naudojant betono atliekas pasiekė savo klasinį stiprumą.

4. Naudojant betono mišiniams CEM I portlandcementį pasiekiamas gana didelis ankstyvasis betono stiprumas. Jau po 3 parų kietėjimo betonas pasiekia virš 80 % savo klasinio stiprio. Naudojant CEM II portlandcementį betono mišiniui, po 3 parų kietėjimo betonas pasiekia tik 30 % savo klasinio stiprio.

5. Betono mišiniams gaminti naudojant trupintas betono atliekas, gaunamas didesnis bandinių įmirkis normaliosiomis sąlygomis. Lyginant tos pačios klasės betono bandinių įmirkį normaliosiomis sąlygomis nustatėme, kad betono bandiniai pagaminti su įprastiniais betono užpildais (skalda) turi 1,2 % mažesnį įmirkį nei betono bandiniai pagaminti naudojant trupintas betono atliekas.

6. Betono bandiniai, pagaminti naudojant stambiuoju užpildu betono atliekas turi mažesnę poringosios erdvės rezervą, jis tesudaro 16 %, tai yra žymiai mažesnė vertė nei tirtąjo etaloninio bandinio, kuriame poringosios erdvės rezervas siekia 30 %. Darbo metu buvo nustatyti išvestiniai bandinių struktūros rodikliai, pagal juos apskaičiuotas betono bandinių ilgaamžiškumas. Betono bandinių, pagamintų naudojant betono atliekas, ilgaamžiškumas panašus į etaloninių bandinių ilgaamžiškumą.

LITERATŪRA

1. B a s h e e r P. A. M., B a i Y. Strenght and durability of concrete with ash agregate. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures & Buildings 158, 191–199 p.
2. C h a n D., P o o n C. S. Using recycled construction waste as aggregates fo paving blocks in Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Waste ant Resource Management, 2006.195, 83–91 p.
3. D e l t u v a J., G a i l i u s A. Statybinės medžiagos. Vilnius: Mokslas, 1982. 300 p.
4. D e l t u v a J. 1998. Heterogeninių statybinių mišinių sandara ir savybės [Heterogeneous constructional mix structure and properties]. Kaunas: Technologija. 263 p. ISBN 9986–13–658–X.
5. G r i g a l i ū n a s B. Statybinės medžiagos ir gaminiai. Vilnius: Mintis, 1974. 311 p.
6. H o s s a i n K. M. A. Development of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. Magazine of Concrete Research, 2004. 56(2): 99 – 109.
7. <http://archyvas.vz.lt/news.php?strid=1002&id=49902>. Prieiga per Internetą. Žiūrėta 2009–03–25.
8. <http://masters.donntu.edu.ua/2007/feht/stepanovm/diss/index.htm>. Prieiga per internetą. Žiūrėta 2009–04–03.
9. <http://www.allbeton.ru>. Prieiga per Internetą. Žiūrėta 2008–01–07
10. <http://www.brigadas.ru/useful/rebeton/>. Prieiga per Internetą. Žiūrėta 2007–10–15
11. <http://www.chippings.ru/ves-shcheben-i-pesok/betonnaya-kroshka-azmerom-menee-20-mm>. Prieiga per Internetą. Žiūrėta 2009–01–12
12. <http://www.stroi.ru/tsch/d827dr423492.htm>. Prieiga per internetą. Žiūrėta 2008–02–22.
13. <http://www.stroi.ru/tsch/d827dr423492.html>. Prieiga per internetą. Žiūrėta 2008–02–20.
14. J o k ū b a i t i s A., J u r k š a A., Z. K a m a i t i s., K i v i l š a J., K u d z y z A., K u d z y z A. ir kt. Gelžbetoninės ir mūrinės konstrukcijos. Vilnius: Mokslas, 1992. 391 p.
15. K a z r a g i s A., G a i l i u s A. 2006. Kompozicinės medžiagos ir dirbiniai su gamtiniais organiniais užpildais. Vilnius: Technika. 184 p. ISBN 9955–28–060–3.
16. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas dėl statybinių atliekų tvarkymo taisyklių patvirtinimo 2006 m. gruodžio 29 d. Nr. D1–637.
17. Lietuvos statybos inžinierių sąjunga. Statybos inžinieriaus žinynas. Vilnius: Technika, 2004. 1095 p.
18. LST 1428.18:1997 Betonai. Bandymo metodai. Vandens įgeriamumo nustatymas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.

19. LST EN 1008 : 1997 Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant grąžinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti.
20. LST EN 1097–2 Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai.
21. LST EN 12620:2003 Betono užpildai.
22. LST EN 197–1 Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai.
23. LST EN 206–1:2002 Betonai. 1 dalis. Techniniai reikalavimai savybės, gamyba ir atitiktis.
24. LST EN 933–1 Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas.
25. Mačiulaitis R. Fasadinės keramikos atsparumas šalčiui ir ilgaamžiškumas. Vilnius: Technika, 1996. 132 p. ISBN 9986–05–283–1.
26. Nagrockienė D., Žurauskienė R. Statybinės medžiagos ir jų gaminiai. Vilnius: Technika, 2007. 182 p.
27. Nagrockienė D. Poringų statybinių gaminių ir apdailos elementų eksploatacinis atsparumas šalčiui: daktaro disertacijos santrauka: technologijos mokslai: medžiagų inžinerija (08T) / Džigita Nagrockienė: Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika, 2003. 32p.
28. Nagrockienė D., Žurauskienė R., Mačiulaitis R., Kičaitė A., Ravnaličevs V. Medžiagų mokslas. Vilnius: Technika, 2005. 100p.
29. Naujokaitis, A.; Statybinės medžiagos. Betonai. Vilnius: Technika, 2007. 355 p.
30. Naujokaitis, A.; Statybinės medžiagos. Užpildai. Vilnius: Technika, 2006. 247 p.
31. Navickas A. A., Skripkiūnas G., Gečys R. Medžiagotyros ir statybinių medžiagų laboratoriniai darbai. Kaunas: Technologija, 2007. 109 p.
32. Nisnevich M., Sirotn G., Eshel Y. Lightweight concrete containing thermal Power station and stone quarry waste. Magazine of Concrete Research, 55 (4). 2003. 313–320.
33. Petrella A., et al. Recycled waste glass as aggregate for lightweight concrete, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Construction Material. 160. 2007. 165–170 p.
34. Soutos M. N., Millard S. G., et al. Using recycled demolition waste in concrete building blocks, In Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Engineering Sustainability 157, 2004. 134–148p.

35. Žurauškienė R., Nagrockienė D., Mačiulaitis R., Kičaitė A. Statybinės medžiagos. Laboratoriniai darbai. I dalis. Vilnius: Technika, 2007. 134p.
36. Žurauškienė R., Nagrockienė D. Statybinių medžiagų ir dirbinių technologija. Vilnius: Technika, 2008. 185 p.
37. А х в е д о в И. Н. Высокопрочный бетон. Москва: Издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам 1961, 160 с.
38. Б а ж е н о в М., Г о р ч а к о в Г. И. и др. Получение бетона заданных свойств. Москва: Стройиздат, 1978. 52 с.
39. Г о л о в и н Н. 2004. Использование продуктов переработки железобетонных конструкций сносимых зданий и сооружений. [Žiūrėta 2008 spalio 11 d.]. Prieiga per internetą: <<http://recyclers.ru/modules/section/item.php?itemid=132>.
40. Г о ч а к о в Г. И. Строительные материалы. Москва: Стройиздат, 1986. 686 с.
41. Д а м о к е е в А. Т. Строительные материалы. Москва: Высшая школа, 1989. 495с.
42. И ц к о в и ч С. Заполнители для бетона. Минск: Вышэйшая школа, 1983. 210 с.
43. К о м а р А. Г., Б а ж е н о в Ю. М., С у л и м е н к о Л. М. Технология производства строительных материалов. Москва: Высшая школа, 1990. 448 с.
44. М а ч ю л а й т и с Р. Морозостойкость и долговечность изделий фасадной керамики. Вильнюс: Техника, 1997. 307 с.
45. П о п о в Л. Н. Строительные материалы и детали. Москва: Стройиздат, 1986. 335 с.
46. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. Москва, стройиздат, 1979 г.
47. С и н я к о в В. К. Строительные материалы и работы. Москва: Стройиздат, 1986. 430 с.
48. С к р а м т а е в Б. Г., Щ у б е н к и н П. Ф., Б а ж е н о в М. Способы определения состава бетона различных видов. Москва: Издательство литературы по строительству, 1966. 157 с.
49. Ф р е н к е л ь И. М. Основы технологии тяжелого бетона. Москва: Издательство литературы по строительству, 1966. 147 с.
50. Я н е в Г. А. Комплексное использование и переработка отходов строительства и сноса в Московском регионе// Экономика природопользования, 2006, №1, с. 57–77 (реферируемый журнал ВАК Минобразования России).
51. Я н е в Г. А. 2007. Эколого – экономическое обоснование мероприятий по переработке отходов строительства и сноса ветхого жилищного фонда. [Žiūrėta 2008 kovo 6 d.]. Prieiga per internetą: <http://portal.rea.ru/portal/main.nsf/Sections/nstpub>.

PRIEDAS