



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Padangų perdirbimo atliekų panaudojimo kompozicinėse
konstrukcijose tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Inga Valčiukaitė

Projekto autorė

Doc. Rėda Bistrickaitė

Vadovė

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Padangų perdirbimo atliekų panaudojimo kompozicinėse konstrukcijose tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6211EX008)

Inga Valčiukaitė

Projekto autorė

Doc. Rėda Bistrickaitė

Vadovė

Prof. Danutė Vaičiukynienė

Recenzentė

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Inga Valčiukaitė

Padangų perdirbimo atliekų panaudojimo kompozicinėse konstrukcijose tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Ingos Valčiukaitės, baigiamasis projektas tema „Padangų perdirbimo atliekų panaudojimo kompozicinėse konstrukcijose tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

Inga Valčiukaitė

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
KOMPOZITINĖS KONSTRUKCIJOS HIDROTECHNINĖJE STATYBOJE

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: 2020 m. lapkričio 30 d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):
PADANGŲ PERDIRBIMO ATLIEKŲ PANAUDOJIMO KOMPOZICINĖSE KONSTRUKCIJOSE
TYRIMAS

(anglų k.):
ANALYSIS OF UTILIZATION OF RECYCLED TYRE WASTE IN COMPOSITE
CONSTRUCTIONS

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Baigiamojo projekto dalys:

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

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas: Doc. Rėda Bistrickaitė parašas
(indėlis 95 %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: Doc. Algirdas Augonis parašas
(indėlis 5 %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: _____ parašas
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Studentas: Inga Valčiukaitė parašas
vardas, pavardė

Valčiukaitė, Inga. Padangų perdirbimo atliekų panaudojimo kompozicinėse konstrukcijose tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. Rėda Bistrickaitė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: padangų perdirbimo atliekos, kompozicinis betonas, dispersinis armavimas, plieninės fibros.

Kaunas, 2021. 53 p.

Santrauka

Magistriniame darbe apžvelgiamos antrinių žaliavų panaudojimo galimybės statybos inžinerijos srityje. Nagrinėjamas kompozitinis betonas, pagamintas įprasto betono mišinyje naudojant padangų gumos ir plieninių kordų bei vielos atliekas.

Literatūros apžvalgoje aptariama gumos įtaka pagrindinėms betono fizikinėms savybėms: tankiui, poringumui, vandens absorbcijai, atsparumui ugniai ir šalčiui bei mikrostruktūros pokyčiai. Mechaninių savybių skyriuje apžvelgiama gumos įtaka betono gniuždomajam, tempiamajam bei lenkiamajam stipriams, tamprumo modulio pokyčiai bei gumos priemaišų poveikis betono atsparumui smūgiams. Remiantis literatūra, apžvelgiamas plieninių fibrų panaudojimas betoninėse ir gelžbetoninėse konstrukcijose bei tokio betono pagrindinės mechaninės savybės.

Tiriamojame dalyje tiriama bandiniai, pagaminti iš kompozitinio bei dispersiškai armuoto betono su antrinėmis žaliavomis, gautomis padangų perdirbimo metu. Atlikti bandinių gniuždomojo, lenkiamojo, skeliamojo stiprio bandymai bei atsparumo šalčiui ir tamprumo modulio nustatymo tyrimai. Taip pat papildomai atliktas plieninių kordų ir vielų tempimo bandymas.

Atlikus gniuždymo bandymą pastebėta, jog gniuždomas stipris pasiekiamas mažesnis gumos turinčio betono bandiniuose negu kontrolinio betono elementuose. Tamprumo modulio nustatymo rezultatai rodo, kad gumos panaudojimas betono mišinyje nežymiai sumažina tokio betono tamprumo modulį. Bandinių atsparumas šalčiui tirtas bandinius veikiant 200 ir 275 šalčio ciklais. Visi betono bandiniai atlaikė šalčio ciklus, tačiau pastebėta, kad gumos turintis betonas pasižymi didesniu atsparumu šalčiui. Gumos turinčio betono tyrimai apibendrinami galimu gumos panaudojimu betono mišiniuose, tačiau didesnis kiekis gumos gali lemti žymų betono elementų mechaninių savybių pablogėjimą.

Plieniniais padangų kordais ir vielomis armuotų bandinių lenkiamasis stiprumas įvertintas atlikus sijų triašio lenkimo bandymą, kuriuo nustatyta, kad lenkiamų betono bandinių armavimas plieniniais kordais ir vielomis yra nemažiau efektyvus negu naudojant sertifikuotas plienines fibras. Siekiant tiksliau nustatyti plieninių padangų kordų racionalumą naudojant juos dispersiniam betono armavimui, atliekamas kordų tempiamojo stiprio nustatymas. Tempimo bandymo rezultatai parodė, kad plieniniai padangų kordai ir vielos yra nemažesnio tempiamojo stiprumo kaip sertifikuotas plieno plaušas. Iš šių tyrimų rezultatų pasiekta išvada, kad plieniniai kordai ir vielos gali būti racionaliai naudojami kaip rinkoje vyraujančių plieninių fibrų pakaitalas.

Darbo struktūra: lentelių skaičius – 17 vnt.; paveikslėlių skaičius – 39 vnt.; bibliografinių įrašų skaičius – 39 vnt.

Valčiukaitė, Inga. Analysis of Usage of Recycled Tyre Waste in Composite Constructions / supervisor doc. Rėda Bistrickaitė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: recycled tyre waste, composite concrete, dispersed reinforcement, steel fibres.

Kaunas, 2021. 53 pages.

Summary

The master's thesis reviews the possibilities of using secondary raw materials in civil engineering field. Test object – composite concrete produced by using ordinary concrete mixture incorporating rubber and steel cords as well as steel wires from tire waste. In order to investigate the efficiency and rational usage of such concrete, a literature review and experimental tests were completed.

The literature review discusses the influence of rubber on the main physical properties of concrete: density, porosity, water absorption, fire and cold resistance, as well as microstructural changes. Mechanical properties section discusses the impact of rubber on the compressive, tensile and bending strengths of concrete, changes in the modulus of elasticity. Based on the literature, the use of steel fibres in concrete and reinforced concrete structures and mechanical properties are discussed.

The testing part examines samples made of composite and depressively reinforced concrete with secondary raw materials obtained during tire utilization process. Compressive, bending, cracking strength tests and tests for determination of frost resistance as well as modulus of elasticity of the samples were performed. An additional tensile test of steel cords and wires was also performed.

It was observed that the compressive strength is lower in rubber-containing concrete specimens than in the control mix concrete specimens. Determination of the modulus of elasticity show that the use of rubber in the concrete mix slightly reduces the modulus of elasticity of such concrete. The cold resistance tests were performed by subjecting the samples to 200 and 275 freeze-thaw cycles. All tested concrete specimens withstood the cycles, but it was observed that rubber-containing concrete has higher frost resistance. Conducted experiments of rubber-containing concrete are summarized that it is effective to use of tire waste rubber in concrete mixes, but higher amounts of rubber can lead to a deterioration in the mechanical properties of such concrete elements.

The flexural strength of steel tire cord and wire reinforced specimens was evaluated by a beam triaxial bending test, which results showed that, under bending conditions, the reinforcement of concrete specimens with steel cords and wires is no less effective than with the use of certified steel fibres. In order to more accurately determine the rational usage of steel tire cords when using them for dispersive concrete reinforcement, the tensile strength of the cords is determined. Tensile test results showed that steel tire cords and wires have none the less tensile strength as certified steel fibre. The results of these studies suggest that steel cords and wires can be rationally used as a substitute for the prevailing steel fibres on the market.

Thesis structure: number of tables – 17; number of pictures – 39; number of bibliographic records – 39.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Padangų perdirbimo ir atliekų pritaikymo galimybės betono mišiniuose	13
1.2. Gumos įtaka pagrindinėms betono savybėms	16
1.2.1. Fizikinės savybės.....	17
1.2.2. Mechaninės savybės	22
1.3. Betono armavimas fibromis	24
1.3.1. Plieniniai plaušai bei jų pritaikymas.....	24
1.3.2. Plieninio plaušo savybės betono konstrukcijose	26
1.4. Skyriaus apibendrinimas	28
2. Tyrimų metodologija.....	30
2.1. Gniuždomasis stipris	30
2.2. Lenkiamasis stipris	31
2.3. Skeliamasis stipris	33
2.4. Fibrų tempiamasis stipris.....	34
2.5. Tamprumo modulis	37
2.6. Atsparumas šalčiui.....	38
3. Tyrimų rezultatai.....	39
3.1. Medžiagos ir bandiniai	39
3.1.1. Medžiagos.....	39
3.1.2. Bandinių paruošimas	39
3.2. Gniuždomasis stipris	44
3.3. Lenkiamasis stipris	47
3.4. Skeliamasis stipris	50
3.5. Fibrų tempiamasis stipris.....	51
3.6. Tamprumo modulio nustatymas	52
3.7. Atsparumo šalčiui bandymas.....	53
Išvados	55
Literatūros sąrašas	56
1 Priedas. Gniuždymo įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivės.....	60
2 Priedas. Lenkimo bandymo apkrovos ir CMOD priklausomybės kreivės	64

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Dūmų, susidariusių dėl padangos atviro degimo, sudėtis	11
2 lentelė. Tipiniai gumos užpildo dydžiai	15
3 lentelė. Betono su guma bandinių tankis.....	17
4 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai.	22
5 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai	22
6 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai.....	23
7 lentelė. Teorinė betono mišinio sudėtis.....	39
8 lentelė. Gautų betono mišinių sudėtys.	39
9 lentelė. Pagamintų bandinių sąrašas.....	42
10 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai	44
11 lentelė. Bandinių tankio ir gniuždomojo stiprio vidurkiai	45
12 lentelė. Triašio lenkimo bandymo rezultatai.....	47
13 lentelė. Tamprumo modulio nustatymo rezultatai	50
14 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai.....	52
15 lentelė. Tamprumo modulio nustatymo rezultatai	52
16 lentelė. Atsparumo šalčiui bandymo rezultatai po 200 ir 275 šalčio ciklą	53
17 lentelė. Gniuždomojo stiprio sumažėjimas po šalčio ciklą.....	54

Paveikslų sąrašas

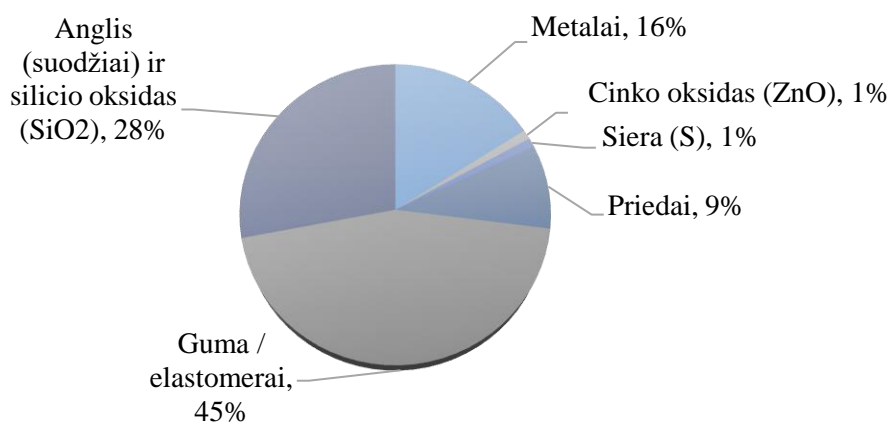
1 pav. Tipinių lengvųjų automobilių padangų sudėtis	10
2 pav. Tipinė padangų konstrukcija: dešinėje – radialinė, kairėje – diagonalinė	11
3 pav. Padangų gumos atliekų panaudojimas JAV (2017)	13
4 pav. Padangų gyvavimo ciklas	14
5 pav. Pramoninis padangų atliekų apdirbimo technologinis procesas	14
6 pav. Gumos užpildas: (A) pjaustytas, (B) trupintas, (C) granuliuotas ir (D) pluoštinis	15
7 pav. Padangų atliekų plieniniai kordai	16
8 pav. Tūrinio tankio ir tūrinio poringumo priklausomybė.....	18
9 pav. Šiluminis laidumas (k) trupintos gumos (CR) ir guma padengtų pluoštų (FCR) turinčiame betone, kuomet guma pakeičiama dalis užpildų.....	19
10 pav. Termogravimetrinio bandymo rezultatai, tiriant didelio stiprumo betono bandinius, turinčius skirtingą kiekį gumos atliekų.....	20
11 pav. Užšalimo-atšilimo bandymų rezultatai.....	21
12 pav. Mikrostruktūrnė modifikuoto betono analizė, kai gumos pelenai sudaro 20 %, o v/c santykis 0,45. Padidinimas: (a) 1000x ; (b) 5980x	21
13 pav. Gumos pelenų (kairėje) ir gumos pelenų bei plaušo (dešinėje) betono tamprumo modulis	23
14 pav. Pirmajam įtrūkimui reikalinga smūgio energija.....	24
15 pav. Dažniausiai naudojamos plieno plaušo formos.....	25
16 pav. Tipinės betono ir dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės	26
17 pav. Gniuždomojo betono deformacijos stadijos	27
18 pav. Betono įtempių ir deformacijų priklausomybė.....	27
19 pav. Tempiamojo betono deformavimosi stadijos: a) be plieno plaušo; b) su plieno plaušu	28
20 pav. Gniuždymo bandymo schema (a) ir tinkamo bandinių suirimo pavyzdžiai (b).....	30
21 pav. Lenkimo bandymo schema.....	31
22 pav. Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“, naudotas lenkimo bandymui	32
23 pav. Skėlimo bandymo schema sluoksnių kontakto zonoje (a) ir atskirų sluoksnių viduryje (b) 33	
24 pav. Plieninių kordų ir vielų tempimo bandymo schema.....	35
25 pav. Mažaaanglio plieno tiesioginė tempimo diagrama (a) ir sąlyginė tempimo diagrama (b)	35
26 pav. Tamprumo modulio nustatymo bandymas	37
27 pav. Naudojamos fibros	40
28 pav. 300g skirtingų diametrų fibrų tūrinis palyginimas.....	41
29 pav. Iš smulkių fibrų susiformavę “ežiai”	41
30 pav. Naudojama smulkinta padangų atliekų guma	42
31 pav. Gautų bandinių pavyzdžiai	44
32 pav. Bandinių gniuždomais stipris po 28 dienų	46
33 pav. Tempiamasis stipris, prie kurio atsiveria plyšiai fibromis ir kordais armuotos sijos	48
34 pav. Tempiamasis stipris, prie kurio atsiveria plyšiai sluoksniuotos sijos.....	48
35 pav. Liekamojo tempiamojo stiprio ir CMOD priklausomybės kreivės (skirtingo skersmens kordais armuotos sijos	49
36 pav. Liekamojo tempiamojo stiprio ir CMOD priklausomybės kreivės (sertifikuotomis fibromis ir kordais armuotos sijos).....	49
37 pav. Skėlimo per sluoksnių kontakto zoną rezultatai.....	51
38 pav. Skėlimo per sluoksnių vidurį rezultatai.....	51
39 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po šalčio ciklų poveikio	54

Įvadas

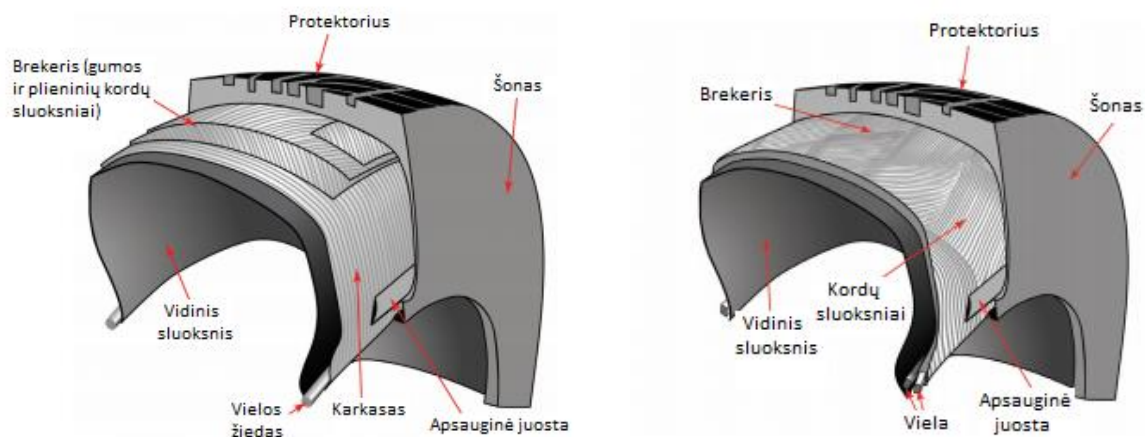
Atliekų tvarkymas yra vienas iš svarbiausių šiuolaikinės visuomenės klausimų. Daugelyje pasaulio vietovių vis dažniau stengiamasi sumažinti susidarančių atliekų kiekį, ekonominės ir politinės pasaulio šalių bendrijos nustato vis daugiau bendrų standartų, skirtų sumažinti įvairių pramonės sektorių poveikį gamtai. Tačiau didėjant transporto priemonių ir automobilių paklausai, kasmet auga ir atliekų, susidarančių iš pasenusių transporto priemonių, skaičius [1]. Panaudotų padangų šalinimas šiuo metu yra viena iš pagrindinių aplinkosaugos ir ekonomikos problemų, susijusių su nuolat besivystančia transporto pramone [2].

Nuolatinė automobilių pramonės plėtra stabiliai didina padangų gamybą, tuo pačiu daugėjant panaudotų ir susidėvėjusių padangų, kurios turi būti tinkamai panaudotos pasibaigus jų naudojimo laikui [1]. Remiantis Europos padangų ir gumos gamintojų asociacijos (angl. *European tyre & rubber manufacturers' association, ETRMA*) ataskaita, kasmet pagaminama 1,4 milijardo padangų, siekiant patenkinti pasaulinės pramonės poreikius [3]. Apskaičiuota, kad 2013 m. Europoje (ES 28 + Norvegija + Šveicarija + Turkija) panaudotos padangos sudarė 3,6 milijono tonų atliekų. Remiantis JAV padangų gamintojų asociacijos duomenimis, 2015 m. Jungtinėse Amerikos Valstijose buvo pagaminta 246,4 mln. padangų, t. y. maždaug 4,0 mln. tonų [4]. Didelė naujų padangų paklausa lemia ir pasenusių ar panaudotų padangų bei jų atliekų skaičių. Tačiau dėl savo cheminės sudėties padangos yra labai patvarios, nėra natūraliai suardomos biologinių procesų metu, yra degios, todėl jų šalinimas sąvartynuose kelia pavojų aplinkai dėl gaisro pavojaus ir sukuria veisimosi vietą žiurkėms, pelėms ir uodams [4].

Transporto priemonių padangos susideda iš gumos mišinio, paprastai sutvirtinto plieniu ir tekstile. Padangoms naudojama guma turi būti tvirta ir elastinga, todėl neapdorota guma vulkanizuojama, taip tarp molekulių sudarant tvirtus ryšius. Tokiu būdu guma tampa atspari dilimui ir nepralaidi vandeniui, taip pat nereaguoja į cheminių medžiagų, šilumos ir elektros poveikį. Kita šio apdorojimo – vulkanizacijos – pasekmė yra didelis atsparumas mikroorganizmų veikimui, todėl reikia daugiau nei 100 metų prieš padangoms pradėdant natūraliai irti [5]. Technologiniai padangų gamybos procesai ir jų sudedamosios dalys labai apsunkina šio produkto utilizavimą po jo naudojimo laiko pabaigos.



1 pav. Tipinių lengvųjų automobilių padangų sudėtis [1]



2 pav. Tipinė padangų konstrukcija: dešinėje – radialinė, kairėje – diagonalinė [6]

Europos Sąjungoje draudžiama senas padangas šalinti sąvartynuose, todėl padangos dažniausiai naikinamos jas deginant, tačiau deginamų padangų išskiriami teršalų kiekiai griežtai ribojami. Priklausomai nuo dydžio ir naudojimo, padangos skiriasi pagal konstrukciją ir bendrą svorį, tačiau pastebėta, kad visose jose iš viso yra apie 1,5 % masės pavojingų atliekų junginių, kurie išsiskiria degimo metu [7].

1 lentelė. Dūmų, susidariusių dėl padangos atviro degimo, sudėtis [1]

Sudedamoji dalis	Emisija, g/1kg deginamos padangos
Anglies dioksidas (CO ₂)	1450
Anglies monoksidas (CO)	35
Diazoto monoksidas (N ₂ O)	0,9
Azoto monoksidas (NO)	3,2
Sieros oksidas (SO)	15
Cianidai / Ciano vandenilis (HCN)	4
Druskos rūgštis	neaptikta
Nesudegusios organinės medžiagos (tolueno (metilbenzeno) ekvivalentai)	23
Dulkės	285
Metalai (iš viso), įskaitant aliuminį ir cinkas > 99%	31,9
Policikliniai aromatiniai angliavandeniliai	0,0633
Polichlorinti bifenilai (iš viso)	2,66 × 10 ⁻⁴
Dioksinai / furanai (iš viso)	6,44 × 10 ⁻⁷

Dėl normuojamo padangų deginimo metu išskiriamų teršalų kiekio bei sudėtingo padangų perdirbimo proceso imta vis plačiau ieškoti būdų efektyviam padangų atliekų panaudojimui. Viena iš galimų pritaikymo sričių – statybų sektorius. Šiame sektoriuje kone kiekvienais metais juntami technologiniai perversmai bei inovacijos, siekiančios efektyviai panaudoti gamtinius išteklius, mažinti poveikį gamtai, o statybų ir statinių eksploatavimo metu kurti tvarios ir darnios statybos koncepciją.

Viena iš plačiausiai naudojamų medžiagų statybose – betonas. Išlaidų optimizavimas ir betono stiprumo bei ilgaamžiškumo didinimas kartu su betono konstrukcijos ekologiškumo didinimu yra vieni ryškiausių dabartinių globalių statybų sektoriaus iššūkių. Šis klausimas reikalauja pažangių žaliavų, kurios gali pakeisti tradicinius betono komponentus. Atsižvelgiant į geras padangų atliekų stiprumo, lankstumo ir deformacijų kontrolės savybes, tam tikras jų atliekas galima naudoti kaip betono mišinių komponentų pakaitalą [8]. Padangų perdirbimo metu gaunami gumos milteliai, kuriuos, priklausomai nuo pasirinkto pakeitimo lygio ir frakcijos, būtų galima naudoti kaip dalinį betono sausų užpildų pakaitalą. Skirtingų automobilių (keleivinių ir krovininių) padangose naudojami įvairaus skersmens plieniniai kordai ir vielos, skirti padangų stiprumui ir ilgaamžiškumui užtikrinti, galėtų būti efektyviai naudojami pakeičiant sertifikuotos gamybos plieno puoštus betono ir gelžbetonio konstrukcijose. Šiuo tiriamuoju darbu siekiama ištirti galimą perdirbtų padangų atliekų pritaikymą kuriant kompozitinį betoną su gumos priemaisomis bei plieninių padangų kordų racionalų panaudojimą armuojant betono konstrukcijas.

Magistro baigiamojo projekto darbo tikslas – atliekant eksperimentinius tyrimus nustatyti galimą padangų perdirbimo atliekų – smulkintos gumos bei plieninių kordų (vielų) – panaudojimą betono elementuose.

Uždaviniai:

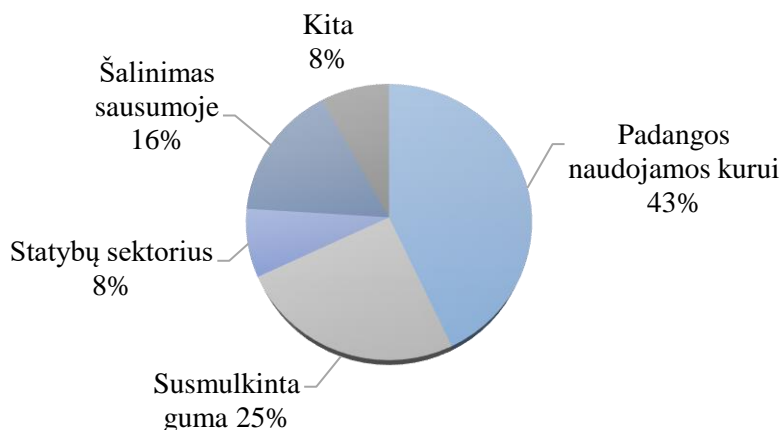
- naudojantis literatūra, apžvelgti smulkintos gumos panaudojimo betono mišiniuose įtaką pagrindinėms betono gaminių fizikinėms ir mechaninėms savybėms;
- apžvelgti literatūroje skelbiamų plieno plaušu armuotų lenkiamų betoninių ir gelžbetoninių elementų tyrimų duomenis;
- ištirti kompozitinio betono, kurio sudėtyje yra naudojama smulkinta guma, pagrindines mechanines savybes bei palyginti jas su įprasto betono savybėmis;
- ištirti perdirbtų padangų plieninių kordų ir vielų efektyvumą naudojant minėtus kordus ir vielas kaip plieno plaušo pakaitalą dispersiniam betoninių elementų armavimui bei palyginti gautus rezultatus su betono elementais, armuotais sertifikuotu plieniu plaušu.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Padangų perdirbimo ir atliekų pritaikymo galimybės betono mišiniuose

Didėjantis padangų atliekų kiekis ir nesuderinta apdirbimo ar perdirbimo sistema kelia vis didesnę šios medžiagos atliekų tvarkymo susirūpinimą. Dėl pasaulinio problemos pripažinimo ir didelio susirūpinimo aplinka daugelis valdžios institucijų nustatė griežtas taisykles ir reglamentus, susijusius su šiuo atliekų produktu, kad būtų išvengta perteklinių sąvartynų ir didelio neigiamo poveikio aplinkai. Įdiegus sankcijas ir apribojimus, tyrėjams buvo suteikta galimybė ištirti tvarias priemones ir alternatyvius panaudotų padangų bei jų atliekų antrinio panaudojimo būdus [9].

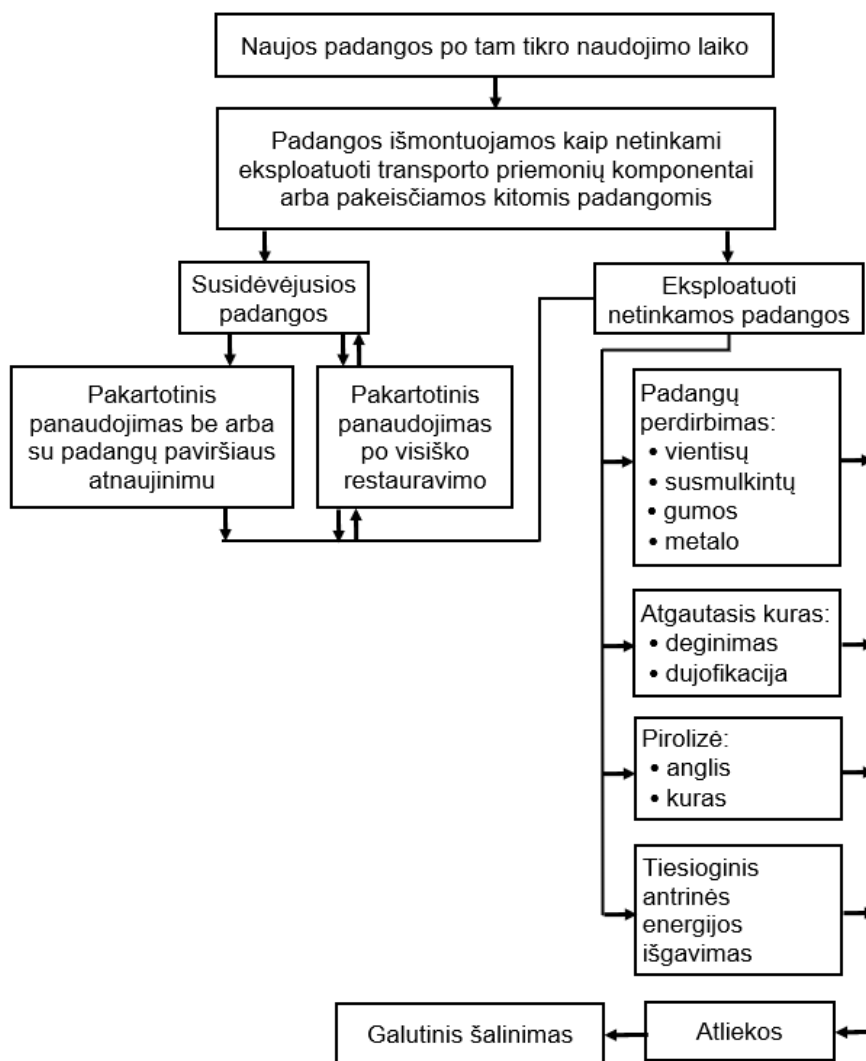
Remiantis 2015 m. duomenimis, JAV apie 49 % panaudotų padangų buvo naudojamos kaip kuras, 26 % buvo susmulkintos į trupinius, 11% buvo sunaikintos sąvartynuose, o 6 % buvo perdirbtos ir pritaikytos statybos inžinerijos srityje [4]. Pagal 2019 m. statistiką, padangų gumos atliekų antrinis panaudojimas statybų pramonėje siekė 8 % [10].



3 pav. Padangų gumos atliekų panaudojimas JAV (2017) [10]

Viena iš pastarųjų metų tyrimų krypčių, lėmusių didesnę padangų atliekų panaudojimą statybose, yra panaudotų padangų gumos įtraukimas į betono gamybos technologiją [3]. Betonai yra labiausiai naudojama statybinė medžiaga pasaulyje, kurios gamybos proceso metu naudojami senkantys gamtiniai išteklių tokie kaip cementas, smėlis, žvyras ir kt. Betonai gamybos bei eksploatavimo išlaidų optimizavimas ir stiprumo bei ilgaamžiškumo didinimas kartu su betono gamybos proceso ekologiškumo didinimu laikomi vienomis svarbiausių globalių statybų sektoriaus problemų. Šis klausimas reikalauja pažangių medžiagų, kurios gali pakeisti tradicinius senkančius gamtinius betono komponentus [8].

Išplėtojus padangų perdirbimo technologijas nuo paprastų mechaninių mašinų, naudojamų padangų presavimui ir pjaustymui, iki sudėtingos daugiapakopės mechaninio-cheminio ir (arba) terminio apdorojimo atsirado naujos padangų atliekų rūšiavimo galimybės [11]. Perdirbtose padangų atliekose yra gumos ir plieno pluoštų, kuriuos galima atskirti nuo kitų padangos komponentų taikant skirtingus metodus ir kurie gali būti inžinerinių medžiagų žaliavų alternatyvos. Perdirbta smulkinta guma ir plieno pluoštai padaro betoną tvaresnį ir atsparesnį smūgiams bei šalčio poveikiui. Galimas plieno pluoštų panaudojimas betono ir gelžbetonio konstrukcijų armavimui pagerina betono lenkimo ir pleišėjimo savybes [8].



4 pav. Padangų gyvavimo ciklas [12]



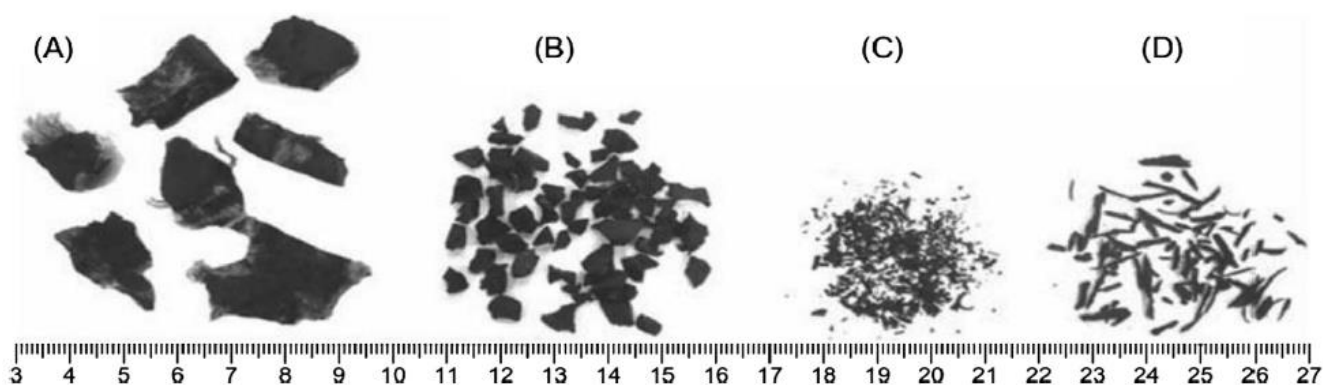
5 pav. Pramoninis padangų atliekų apdirbimo technologinis procesas [13]

Atsižvelgiant į geras padangų gumos atliekų stiprumo, lankstumo ir deformacijų kontrolės savybes, jas galima naudoti kaip betoninių komponentų pakaitalą. Guma gali būti lydoma ir tepama ant betono,

naudojama pakeičiant smulkius ir stambius užpildus arba naudojama kaip rišiklis betono mišiniuose. Trupinės gumos įdėjimas į bet kurį cementinį kompozitą taip pat sumažina gamybos metu išmetamo CO₂ kiekį, taip sumažinant neigiamą poveikį aplinkai ir padidinant betono gamybos proceso ekologiškumą [8].

Pažangios perdirbimo technologijos leido išplėsti padangų gumos perdirbimo atliekų antrinį panaudojimą. Tam tikrų frakcijų trupinta guma naudojama kaip priedas gaminant: naujas padangas (iki 10–15 % gumos atliekų); techninius gumos gaminius (iki 25 % gumos atliekų); guminius vamzdžius (pridedama iki 40 % gumos atliekų); stogo dangų medžiagas (iki 40 % gumos atliekų); žaidimo aikštelių ir grindų kilimėlius (10–100 % gumos atliekų); avalynės padus (10–100 % gumos atliekų); teniso kortų grindis; pritaikoma kelių tiesimui; naudojama statybiniame betone [11].

Gumos užpildas betono mišiniuose gali būti naudojamas įvairaus dydžio. Smulkinta guma paprastai naudojama stambiam užpildui pakeisti, netaisyklingos formos trupinta guma naudojama kaip smulkus užpildas, o gumos milteliai gali būti naudojami kaip užpildas, rišiklis arba smulkus smėlis betone. Skirtingi perdirbtų gumos užpildų tipai parodyti 6 paveiksle, o tipiniai jų dydžiai pateikti 2 lentelėje.



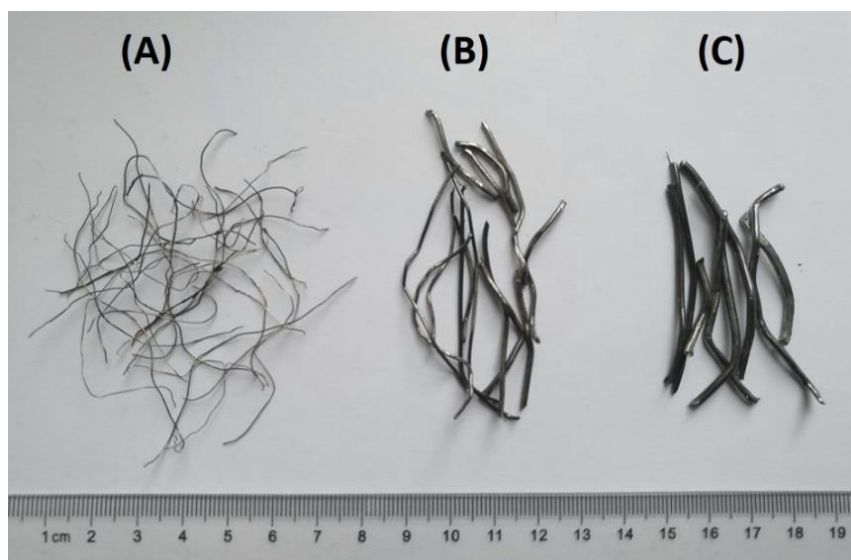
6 pav. Gumos užpildas: (A) pjaustytas, (B) trupintas, (C) granuliuotas ir (D) pluoštinis [8]

2 lentelė. Tipiniai gumos užpildo dydžiai [8]

Užpildo dalelės dydis, mm			
Pjaustyta guma	Trupinta guma	Malta guma	Pluoštinė guma
25–30	3–10	<1	
13–76	0,425–4,750	0,075–0,0475	
13–76	0,5–5	0,15–19	8,5–21,5

Padangų sudėtyje esantys plieniniai kordai ir vielos gali būti išskiriami į dvi pagrindines grupes: gaunamus iš automobilių padangų arba iš sunkvežimių padangų. Automobilių padangose yra plieniniai kordai, suformuoti iš 0,15–0,32 mm skersmens plieno pluošto – kordo, sunkvežimių padangose naudojami ir didesnio skersmens (dažniausiai iki 2,5 mm) plieno pluoštai (vielos). Sunkvežimių padangose taip pat naudojamas didesnis plieno pluošto kiekis pagal svorį: 15 % lengvųjų automobilių masės sudaro plieniniai elementai ir 25 % kordų sunkvežimių padangose. Šie

plieniniai pluoštai, gauti iš padangų atliekų, gali būti naudojami kaip armatūra betone dėl jų gero sukibimo su betono matrica ir betono ar gelžbetonio konstrukcijos atsparumo tempimui padidinimo [14].



7 pav. Padangų atliekų plieniniai kordai: (A) skerspjūvis 0,30–0,35 mm; (B) skerspjūvis 0,70–1,40 mm; (C) skerspjūvis 1,45–2,10 mm

Nustačius, kad padangų atliekų plieno kordai atitinka sertifikuotų fibrų ir pluoštų mechanines savybes, šių kordų antrinis panaudojimas būtų pritaikomas daugelyje laikančiųjų ir nelaikančiųjų gelžbetoninių monolitinių bei surenkamų konstrukcijų: grindų, pakilimo takų, stovėjimo aikštelių ir kelių plokštėse, išlyginamuosiuose, skiriamuosiuose ir torkretinio betono sluoksniuose, tvorų elementuose, šulinių žieduose, hidrotechniniuose statiniuose, plonasienėse kevalinėse konstrukcijose, sprogimui ir smūgiams atspariose konstrukcijose, tiltų konstrukcijose, įtempto gelžbetonio sijose, gelžbetoniniuose tunelių elementuose ir kt. Plaušas naudojamas siekiant pagerinti gelžbetonio eksploatacines savybes ir ilgaamžiškumą. Gelžbetoninius elementus papildomai armuojant plieno plaušu yra sumažinamas plyšių plotis, padidinamas taip armuotų elementų standumas, sumažinamas žalingas dinaminių apkrovų poveikis ir paviršių dėvėjimasis. Taip pat kai kuriais atvejais galima net sumažinti būtinos armatūros kiekį [15].

1.2. Gumos įtaka pagrindinėms betono savybėms

Užpildai betone užima apie 80 % jo tūrio ir turi didelę įtaką jo savybėms bei ilgaamžiškumui. Užpildų savybės daro didelę įtaką visoms eksploatacinėms konstrukcijos savybėms [16]. Panaudojant padangų gumos atliekas betone kaip dalinį pakaitalą užpildams betono mišinyje, gaunama kompozitinė medžiaga. Kompozitais vadinamos medžiagos, sudarytos iš dviejų ar kelių medžiagų (komponentų) ir pasižyminčios savybėmis, kurios nėra būdingos kiekvienam atskirai paimtam komponentui [17]. Šio kompozito medžiagos savybių tyrimai buvo atlikti daugelyje pasaulio šalių universitetuose ir kituose statybos inžinerijos departamentuose. 1.2 skyriuje apžvelgiamos literatūroje pateiktos guma modifikuoto betono pagrindinės fizikinės bei mechaninės savybės, nustatytos eksperimentiniais, empiriniais ir analitiniais tyrimų metodais.

1.2.1. Fizikinės savybės

Betono fizikinės savybės priklauso nuo naudojamų užpildų, jų dalelių stambumo, pasirinktos rišamosios medžiagos ir užpildų savybių bei kiekio, vandens ir cemento santykio, gamybos būdo, betono klojimo ir tankinimo būdų bei kietėjimo sąlygų.

Tankis

Libano universitetų tyrėjai, tyrę guma modifikuoto betono cilindrinį bandinių mechanines ir dinamines savybes, nustatė, kad dalinis smulkių užpildų pakeitimas gumos atliekų milteliais betono mišinyje lemia galutinio betono elemento tankio sumažėjimą [18]. Panašios išvados priėjo ir Indijos mokslininkai, tyrę gumos pelenų ir gumos pluoštų įtaką betonui. Tyrimų metu nustatyta, kad gumos pelenų ar gumos pluoštų įdėjimas į betoną daro įtaką tankiui. Pastebėta, kad gumos pelenų turinčio betono ir gumos pluoštu modifikuoto betono tankis mažėja didėjant gumos pelenų ar atitinkamai gumos pluošto procentinei daliai betono mišinyje [19].

3 lentelė. Betono su guma bandinių tankis [14]

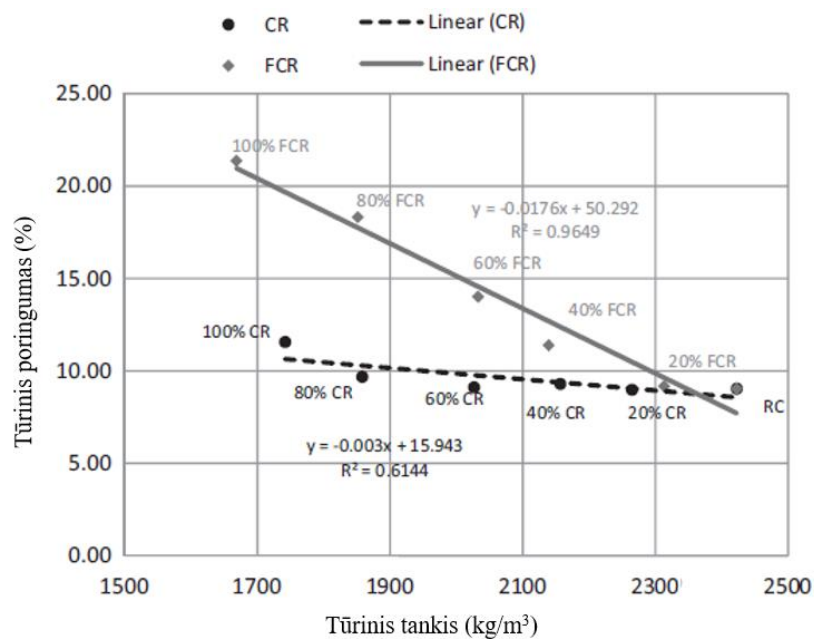
Betono mišinys	Užpildo pakeitimo guma lygis	Tūrinis tankis, kg/m ³
Kontrolinis mišinys	0 %	2422
Betonas su smulkinta guma	20 %	2264
Betonas su smulkinta guma	40 %	2156
Betonas su smulkinta guma	60 %	2026
Betonas su smulkinta guma	80 %	1858
Betonas su smulkinta guma	100 %	1742
Betonas su guma padengtais plastiko pluoštais	20 %	2313
Betonas su guma padengtais plastiko pluoštais	40 %	2139
Betonas su guma padengtais plastiko pluoštais	60 %	2032
Betonas su guma padengtais plastiko pluoštais	80 %	1851
Betonas su guma padengtais plastiko pluoštais	100 %	1668

Gumos dalelių savitasis svoris yra mažesnis nei įprastų smulkių užpildų, todėl smulkintos gumos ar gumos pelenų turinčio betono ir gumos pluoštu modifikuoto betono tankis mažėja didėjant užpildo pakeitimo guma lygiui.

Poringumas

Iš Indijos mokslininkų atliktų tyrimų buvo pastebėta, kad betono bandiniuose esančių porų kiekis didėja, kai į betono mišinį įdedama trupintos gumos. Tyrimai atlikti tiriant bandinius iš savaimės susitankinančių ir vibravimo būdu tankinto betono mišinių, savo sudėtyje turinčių trupintos gumos su plieno pluoštais arba be jų. Pastebėta, kad porų skaičius betono bandiniuose proporcingai didėja didinant gumos dalelių kiekius mišiniuose. Didesnis guma modifikuoto betono bandinių poringumas, lyginant su įprasto betono bandiniais, tiesiogiai susijęs ir su bandinių tankio sumažėjimu [20].

Tai, kad gumos užpildai padidina betono tūrinį poringumą, pastebėjo ir Ispanijos tyrėjai, tyrę patvaraus betono, kuriame yra trupintos gumos ir plieno arba plastiko pluoštų, iš dalies padengtų guma. Padaryta išvada, jog plieno ar plastiko pluoštai, padengti guma, padidina betono poringumą daugiau nei trupintos gumos dalelės, nors jų tankis yra toks pats [14].



8 pav. Tūrinio tankio ir tūrinio poringumo priklausomybė trupintos gumos (CR) ir guma padengtų plastiko pluoštų (FCR) turinčiame betone, kuomet guma pakeičiama dalis užpildų [14]

Vandens įgeriamumas

Indijos statybos inžinerijos srities mokslininkai taip pat atliko vandens įgeriamumo tyrimą betono bandiniams, kuriuose bandyta panaudoti padangų gumos atliekas kaip dalinį smulkų užpildą betone.

Bandymai atlikti naudojant gumos pelenus ir gumos pluoštus (kombinuotu pavidalu), bandiniai paruošti naudojant tris vandens/cemento santykius (0,35, 0,45 ir 0,55) mišiniuose. Vandens ir cemento santykis bei gumos kiekis turi įtakos betono akytumui, o tai turi įtakos betono vandens absorbcijos galimybėms. Tyrimo metu bandiniai 24 valandoms buvo dedami į vandens vonią. Užregistruvus pradinius ir galutinius bandinių svorius nustatytas procentinis vandens absorbcijos kiekis [19].

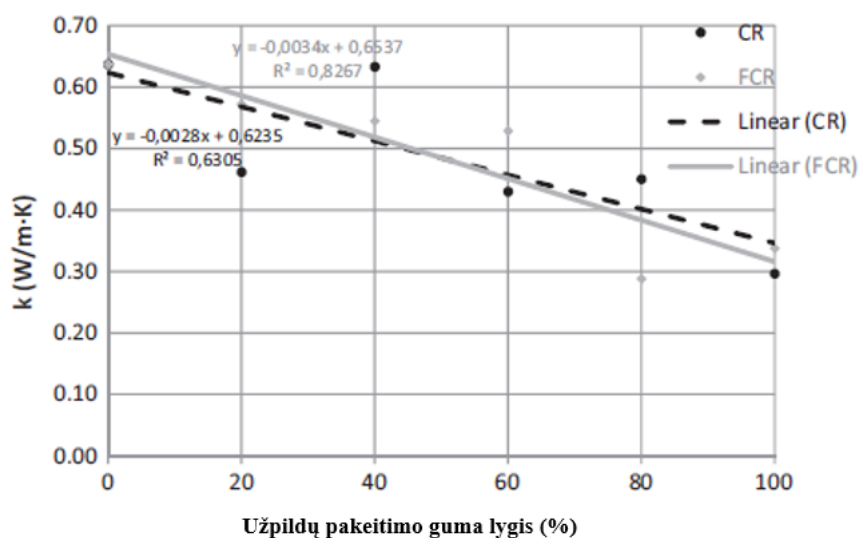
Pastebėta, kad gumos pelenų turinčio betono vandens absorbcijos lygis procentas padidėja esant didesnei gumos pelenų procentinei daliai. Gumos pelenų turinčio betono (28 parų) vandens absorbcija yra 1,26, kai 20 % smulkaus užpildo pakeičiama gumos pelenais ir vandens/cemento santykis lygus 0,45. Tuo tarpu to paties vandens ir cemento santykio atveju vandens absorbcija yra 1,08, jei smulkaus užpildo pakeitimo lygis guma yra 0 % [19].

Panašūs rezultatai gaunami ir betono mišiniuose papildomai naudojant gumos pluoštus. Tyrimų rezultatai rodo, kad guma modifikuoto betono vandens įgeriamumo lygis procentas taip pat didėja didėjant gumos pelenų ir pluošto procentinei daliai. Modifikuoto betono procentinė vandens absorbcija lygi 1,23, kai pakeičiama 25 % smulkaus užpildo gumos dalelėmis ir vandens/cemento (V/C) santykis yra 0,45. Tuo tarpu to paties V/C santykio atveju vandens absorbcija lygi 1,18, esant 0 % gumos pakeitimo lygiui [19, 21].

Todėl mokslininkai priėmė išvadą, kad gumos pelenų betono ir gumos pluoštu modifikuoto betono vandens absorbcija padidėja didėjant smulkaus užpildo pakeitimo gumos pelenais arba dalelėmis lygiui [19, 21].

Šiluminis laidumas

Ispanijos tyrėjai 2017 m. pateikė analizę apie tvaraus betono, kuriame yra trupintos gumos dalelių ir plieno arba plastiko pluoštų, iš dalies padengtų guma, šiluminės savybės. Trupintos gumos dalelės dažniausiai naudojamos kaip užpildas betone, o pluoštai, padengti guma, yra gana naujo tipo užpildas. Tyrimuose naudotas guma padengtus pluoštus sudaro plieniniai arba plastikiniai pluoštai, kurių paviršius iš dalies padengiamas trupinta guma, gauta padangų perdirbimo metu, granuliuojant ją dar prieš visišką gumos atskyrimą. Šiluminių tyrimų rezultatai parodė, kad padidėjus gumos, naudojamos kaip užpildo, procentinei daliai betono mišiniuose, betono šilumos laidumas k sumažėja. Betono su trupintos gumos užpildu (įprastas užpildas pakeičiamas 100 % gumos dalelėmis) ir 100 % užpildo pakeitimo lygiui plieno arba plastiko pluoštais, iš dalies padengtais guma, šilumos laidumo k reikšmės buvo pastebimai mažesnės negu mažesnio užpildo pakeitimo lygio arba visai nenaudojant gumos betono mišiniuose. Be to, gumos dalelių įtaka didesniai betono poringumui padidino oro įsiskverbimą į betoną ir tai dar labiau sumažino šilumos laidumo k reikšmes. Rezultatai rodo, kad esant tinkamam procentiniam pakeitimui šilumos laidumas k gali sumažėti 45 % lyginant su etaloninio betono su akmens užpildais etaloninėms šilumos laidumo vertėms [14].



9 pav. Šiluminis laidumas (k) trupintos gumos (CR) ir guma padengtų pluoštų (FCR) turinčiame betone, kuomet guma pakeičiama dalis užpildų [14]

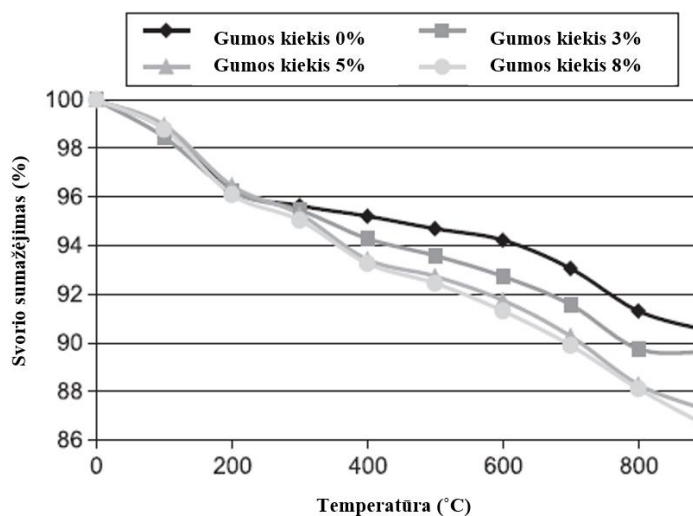
Atsparumas ugniai

2003 metais Ispanijos konstrukcijų ir technologijų departamentų mokslininkai pateikė bandymų ataskaitas, kurių metu tirtos didelio stiprumo betono ir silicio dioksido dūmų modifikuoto betono, turinčio sunkiasvorio transporto padangų gumos atliekų dalelių, atsparumo ugniai savybės.

Tiriant didelio stiprumo betono, turinčio perdirbtos padangos gumos dalelių, elgseną gaisro metu buvo atliktas ugnies poveikio bandymas pagal ISO 834 „Atsparumo ugniai bandymai“. Tyrimai buvo atliekami tol, kol eksponuojamoji bandinių pusė pasiekė 1000 °C temperatūrą. Atlikti atsparumo ugniai testai parodė, kad didelio stiprumo betoną papildomai modifikuojant guma, pagerėja atsparumo ugniai savybės, o ugnies paveiktas paviršius yra mažiau pažeidžiamas [22].

Termogravimetrinė analizė buvo atlikta mėginiams, paimtiems iš ugnies paveiktų bandinių, skirtingais atstumais nuo paveikto paviršiaus. Buvo paimti iš 1, 2, 3 ir 4 cm gylio mėginiai, kurie kaitinti 0–900 °C temperatūroje, 100 °C intervalais, ir po kiekvieno etapo buvo sveriami. Iš rezultatų

galima pastebėti, kad kuo didesnis gumos pluošto kiekis betone, tuo žemesnė temperatūra pasiekiamama tame pačiame gylyje [22].



10 pav. Termogravimetrinio bandymo rezultatai, tiriant didelio stiprumo betono bandinius, turinčius skirtingą kiekį gumos atliekų [22]

2013 m. Lisabonos technikos universiteto tyrėjai taip pat atliko bandymus, tiriančius aukštos temperatūros poveikį betonui, pagamintam iš perdirbtos gumos užpildo. Buvo paruošti keturi skirtingi betono mišiniai: etaloninis betonas, pagamintas iš natūralaus smulkaus ir stambaus užpildo, ir trys betono mišiniai, kuriuose perdirbta padangų guma pakeista 5 %, 10 % ir 15 % natūralaus smulkaus ir stambaus užpildo. Po to, kai bandiniai buvo šildomi pagal ISO 834 laiko ir temperatūros kreivę, bandiniai 1 valandą buvo veikiami 400 °C, 600 °C ir 800 °C temperatūroje. Atvėsus iki aplinkos temperatūros, buvo įvertintas gniuždymo stipris ir skilimo tempiamasis stiprumas bei palygintas su pamatinėmis vertėmis, gautomis prieš ugnies poveikį. Gauti rezultatai rodo, kad betono, pagaminto iš perdirbtos gumos užpildo, šiluminis atsparumas yra maždaug panašus į etaloninio betono [23].

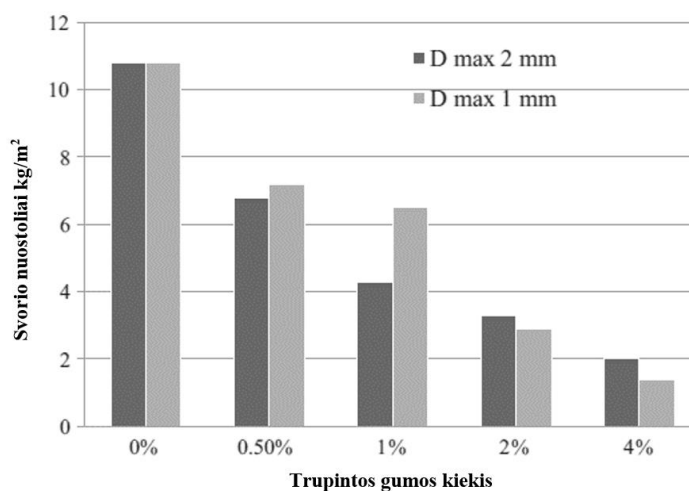
Atsparumas šalčiui

Lietuvių mokslininkai iš KTU ir VGTU universitetų, tyrę trupintos gumos įtaką betonui, nustatė pagrindines užšalimo ir atšilimo modifikuoto betono savybės. Tyrimo rezultatai atskleidė, kad trupinta guma, sudaranti 20 % bandinio masės, padidina numatomą betono gaminių atsparumą užšaldymui ir atitirpimui – net 89 %, kai gumos trupinių frakcija yra 2/4. Gumai sudarant 27,46 % masės šis rezultatas pasiekiamas, jei gumos trupinių frakcija yra 4/6 [11].

Kitų lietuvių tyrėjų atliktuose tyrimuose pasiektas panašus rezultatas. Atlikti betono tyrimai su fr. 0/0,5 mm, fr. 0/1 mm, fr. 0/3 mm gumos priedais ir be gumos priedo, buvo nustatomas atsparumas šalčiui pagal LST 1428.17 standartą vadinamuoju „pagreintu“ metodu. Atlikus 610 užšaldymo bei atšildymo 5 % druskos NaCl tirpale ciklą, vizualiai apžiūrėjus bandinius, bandiniuose su gumos priedais jokių irimo požymių nepastebėta, o bandiniuose be gumos priedų pastebėtas betono kubelių kampuose išsivystęs plyšių tinklas, kuris rodo betono elemento irimo pradžią [24].

Turkijos mokslininkų publikuotame straipsnyje teigiama, kad padidėjus gumos, naudojamoms betono mišiniuose, kiekiui pastebimas reikšmingas masės nuostolių sumažėjimas po šalčio ciklo poveikio.

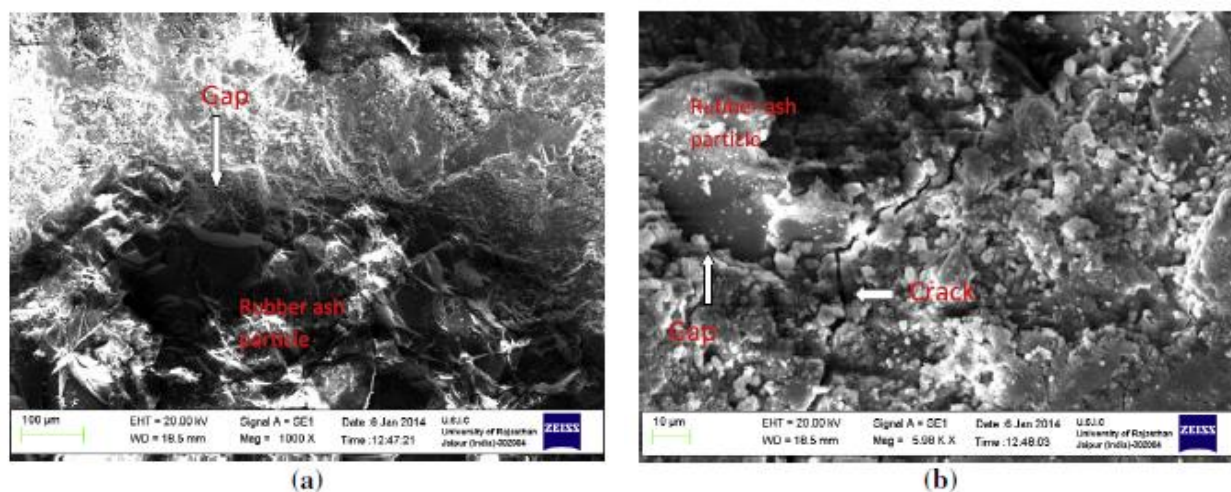
Padidinus padangų atliekų kiekį iki 4 %, pastebima, kad masės nuostoliai po 200 užšalimo – atšilimo ciklų sumažėja 80 %. Naudojant didesnę gumos kiekį ir bei esant didesniai gumos dalelių skersmeniui D , pastebimas lėtesnis plyšių ir pažeidimų susidarymas betono bandiniuose, veikiamuose šalčio ciklų [25].



11 pav. Užšalimo-atšilimo bandymų rezultatai [25]

Mikrostruktūra

Indijos mokslininkų, tyrusių gumos pelenų ir gumos pluoštų įtaką betonui, atliktos mikrostruktūrinės analizės vaizdai rodo, kad gumos pelenų dalelės turi gana netaisyklingą formą (tamsios spalvos dalelės). Gumos pelenų turinčiame betone pastebėti gumos pelenų ir cemento matricos sąsajoje atsiradę įtrūkimai, kurie galit turėtų įtakos betono stiprumo sumažėjimui [19].



12 pav. Mikrostruktūrinė modifikuoto betono analizė, kai gumos pelenai sudaro 20 %, o v/c santykis 0,45. Padidinimas: (a) 1000x ; (b) 5980x [19]

Gumos užpildo ir cemento sąsajos pažeidimai pastebėti visuose mokslininkų tirtuose bandiniuose, su skirtingai vandens ir cemento santykiais bei skirtingais gumos pakeitimo lygiais. Šie tarpai ir įtrūkimai atspindi silpną gumos dalelių jungtį su cemento skiediniu ir yra viena iš galimų betono mechaninio suirimo priežasčių. Mokslininkų teigimu, gumos dalelių sukibimą su cemento pasta galima pagerinti papildomai apdorojant gumos daleles [19].

1.2.2. Mechaninės savybės

Gniuždomais stipris

Libano universitetų tyrėjai, tyrę guma modifikuoto betono cilindrinų bandinių mechanines ir dinamines savybes, nustatė, kad betono, savo sudėtyje turinčio trupintos gumos, gniuždomasis stipris mažėja didėjant gumos kiekiui mišinyje. Jei projektinio mišinio stipris svyruoja nuo 30 MPa iki 50 MPa, gniuždomojo stiprio mažėjimas yra pastovus ar beveik pastovus santykis su gumos dalelių procentinės dalies padidėjimu. Stiprumas sumažėja vidutiniškai 30, 35, 50 ir 63 %, kai gumos miltelių mišinyje procentinė dalis atitinkamai yra 5, 10, 15 ir 20 % [18].

4 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai [18].

Gumos kiekis (%)	Betono mišinio nr.	Vidutinis f_c , MPa	Betono mišinio nr.	Vidutinis f_c , MPa	Betono mišinio nr.	Vidutinis f_c , MPa
0	6	37,19	11	43,42	16	51,54
5	7	26,88	12	30,07	17	39,95
10	8	24,13	13	28,15	18	34,63
15	9	19,53	14	22,13	19	23,96
20	10	13,65	15	16,30	20	18,93

Panašūs gniuždomojo stiprio pokyčių rezultatai gauti tiriant kombinuotą gumos pelenų ir gumos pluošto panaudojimą betone. Sistemingas gniuždomojo stiprio sumažėjimas stebimas didėjant gumos pluošto procentinei daliai [19].

Kinijos mokslininkų apskaičiuotas vidutinis savaime susitankinančio lengvojo betono su gumos užpildais (toliau SCRLC) gniuždymo stipris, apskaičiuotas iš trijų bandymų verčių, pateikiamas 5 lentelėje.

5 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai [26]

Bandinys	SCLC	SCRLC10	SCRLC20	SCRLC30	SCRLC40	SCRLC50
Vienaašis gniuždomasis stipris (MPa)	37,3	35,2	31,2	29,8	24,1	20,5

Padidėjus gumos dalelių procentinei daliai, matomas SCRLC gniuždomojo stiprio sumažėjimas [26]. Ši išvada sutampa su kitų mokslininkų gautais rezultatais, kad gumos naudojimas betono mišinyje sumažina betono gniuždomąjį stiprį. Mokslininkai priėjo išvadą, kad stiprumo sumažėjimas gali būti susijęs su dviem priežastimis. Pirma, dėl to, kad gumos dalelės yra daug minkštesnės (tampriai deformuojamos) nei aplinkinės mineralinės medžiagos dalelės, o apkraunant bandinius, aplink gumos daleles greitai atsiranda įtrūkimų, taip paspartinant gumos – cemento mišinio irimą. Antra, minkštos gumos dalelės gali būti laikomos poromis betone, nes trūksta sukibimo tarp gumos dalelių ir cemento pastos, taip sumažinant betono gniuždomąjį stiprumą [18].

Tempiamasis stipris

Tempiamojo stiprio tyrimų metu nustatyta, kad naudojant gumos miltelius betone, betono tempimo stipris šiek tiek pagerėja įvairiomis gumos procentinėmis dalimis betono mišinyje. Tačiau įvertinus neigiamą gumos dalelių poveikį gniuždomajam betono stipriui šis tempiamojo stiprio padidėjimas yra sąlyginai nepaisomas [18].

6 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai [18].

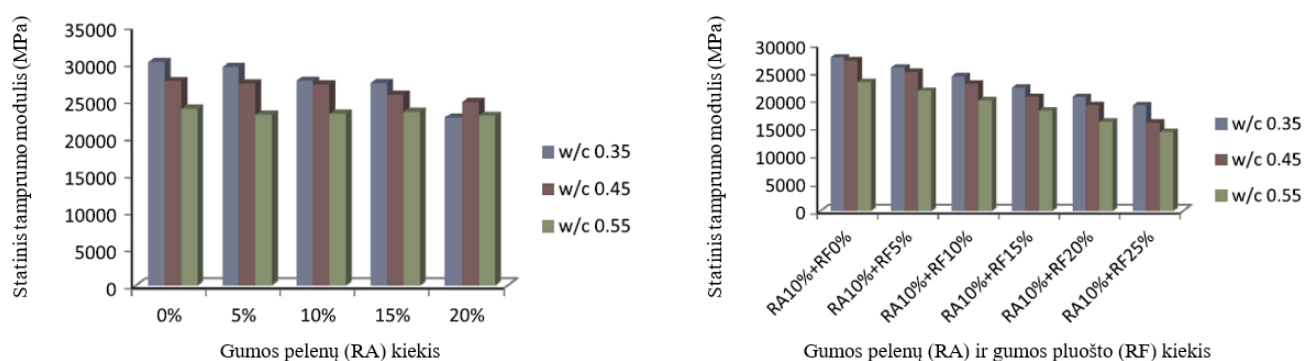
Gumos kiekis (%)	Betono mišinio nr.	Vidutinis f_{ct} , MPa	Betono mišinio nr.	Vidutinis f_{ct} , MPa	Betono mišinio nr.	Vidutinis f_{ct} , MPa
0	6	3,635	11	4,339	16	5,285
5	7	2,675	12	3,393	17	4,327
10	8	2,491	13	3,215	18	3,656
15	9	2,295	14	2,837	19	3,015
20	10	2,066	15	2,392	20	2,361

Lenkiamasis stipris

Eksperimentiniai lenkiamų didelio masto betono sijų, turinčių gumos trupinių ir plieno pluoštus, elgsenos tyrimai, atlikti 2017 m. kanadiečių mokslininkų M. K. Ismail'o bei A. A. Hassan'o, rodo, kad padidėjus gumos trupinių kiekiui betone, sumažėjo įtrūkimų plotai, sumažėjo sijų standumas ir savaiminis svoris. Betono mišiniuose naudojant nuo 15 % iki 35 % trupintą gumą smulkiam užpildui pakeisti buvo sukurtas ekologiškas pusiau lengvas betonas, kurio tankis svyruoja nuo 2014 kg/m³ iki 2128 kg/m³. Standartiškai armuota betoninė sija, turinti 15 % dalinio gumos užpildo, pasiekia 87–105 % didžiausio apkrovos vertės, kurią pasiekia kontrolinė sija. Tai rodo potencialų gumos panaudojimą betono mišiniuose, skirtuose laikančiosios konstrukcijoms gaminti. Tačiau didesnis negu 35 % gumos kiekio didinimas lemia lankstumo ir tvirtumo sumažėjimą. Plieno pluoštų derinimas su gumos dalelėmis betone kompensuoja sumažėjusias bandytų sijų lenkimo galimybes, didina elastingumą ir tvirtumą. Mokslininkų teigimu, racionaliausia betono mišiniuose pakeisti ne daugiau kaip 20–25 % smulkaus užpildo guma, siekiant tik nežymiai sumažinti gniuždomosios zonos stiprumą [27].

Tamprumo modulis

Tamprumo modulis turi įtakos betoninių konstrukcijų tinkamumui naudoti. Tamprumo moduliui siekiama įvertinti gumos turinčio betono deformacinių savybių pokyčius. Gumos pelenų betono ir kombinuotu būdu guma modifikuoto betono (10 % gumos pelenų ir įvairaus % gumos pluošto) tamprumo modulis parodytas 14 pav. Galima pastebėti, kad betonai su gumos pelenais ir gumos pluoštu yra mažiau tvirti negu kontroliniai ar tik gumos pelenų turintys betonai. Dėl šios savybės betono elastingumo modulis mažėja didėjant gumos pelenų/pluošto kiekiui [19].

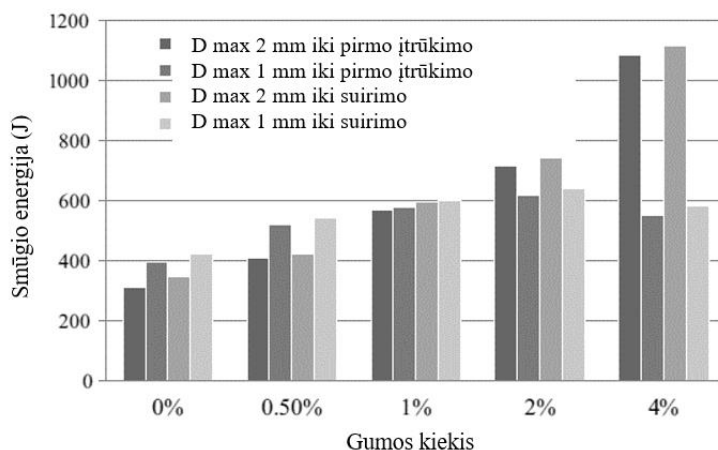


13 pav. Gumos pelenų (kairėje) ir gumos pelenų bei plaušo (dešinėje) betono tamprumo modulis [19]

Gumos pelenu/pluošto užpildai turi mažą tamprumo modulį mineralinių užpildų atžvilgiu, todėl jie veikia kaip didelės poros ir nedaro didelės įtakos betono atsparumui išorinių apkrovų poveikiui. Dėl šios priežasties gumos pluošto betonas praranda savo stiprumą ir yra priklausomas nuo gumos pelenu ir pluošto kiekio betono mišinyje. Statinio tamprumo modulio sumažėjimas rodo didesnę tokio betono konstrukcijų lankstumą, kuris gali būti vertinamas tiek teigiamai, tiek neigiamai, priklausomai nuo konstrukcijos panaudojimo sąlygų [19].

Atsparumas smūgiams

Ušako universiteto (Turkija) statybos inžinerijos departamento mokslininkai tirdami atsparumą smūgiams nustatė, kad rezultatai priklauso nuo naudojamos trupintos gumos atliekų dalelių skersmens ir kiekio betono mišiniuose. Didėjant dalelių skersmeniui ir užpildo pakeitimo guma santykiui, žymiai padidėjo atsparumas smūgiams [25].



14 pav. Pirmajam įtrūkimui reikalinga smūgio energija [25]

Dėl šios priežasties buvo padaryta išvada, kad smulkias gumos atliekas būtų naudinga panaudoti betoniniuose elementuose, tokiuose kaip betoninio grindinio elementuose, betoninėms užtvarams kelkraščiuose ir šaligatvio bortams bei betoninėms trinkelėms, kurie nėra naudojami kaip laikantieji elementai ir kurie turės didelį atsparumą smūgiams, ypač kai jie yra veikiami šalčio ciklų [25].

1.3. Betono armavimas fibromis

1.3.1. Plieniniai plaušai bei jų pritaikymas

Dėl gerų gniuždomųjų savybių betonas tapo viena plačiausiai naudojamų medžiagų statybose. Tačiau dėl mažo tempiamojo stiprio ir trapiumo pobūdžio, betono konstrukcijos tampa sunkiau pritaikomos tempimo ir didelio lenkimo apkrovų veikiamose konstrukcijose. Dėl medžiagos trapumo betono konstrukcijose eksploataavimo metu pradeda vertis plyšiai, kurie gali pasiekti ribines leistinas eksploatuojamos konstrukcijos plyšių plokštumų vertes. Plyšių atsivėrimas turi įtakos ir betono konstrukcijos atsparumui korozijai. Per plyšius iki armatūros patenka drėgmė ir prasideda sparti armatūros korozija bei toliau ardoma betono struktūra. Siekiant pagerinti betono ir gelžbetonio konstrukcijų tinkamumą eksploatacijai, vienas iš moderniausių pasiūlytų sprendimo variantų –

dispersinis betono armavimas pluoštais. Tinkamas betono ir gelžbetonio konstrukcijų armavimas plieno ar kitų medžiagų pluoštais sumažina betono pleišėjimą bei pakeičia suirimo pobūdį iš trapiaus į plastinį. Betono konstrukcijoje naudojamos fibros (pluoštai) suvaržo plyšių plotį ir perima dalį tempimo zonoje esančių apkrovų. Dėl šių priežasčių dispersinis armavimas pagerina mechanines betono ir gelžbetonio konstrukcijų savybes, o tinkamai suprojektuoto konstrukcijos tampa plačiau pritaikomos bei pailgėja konstrukcijų eksploataavimo trukmė [28].

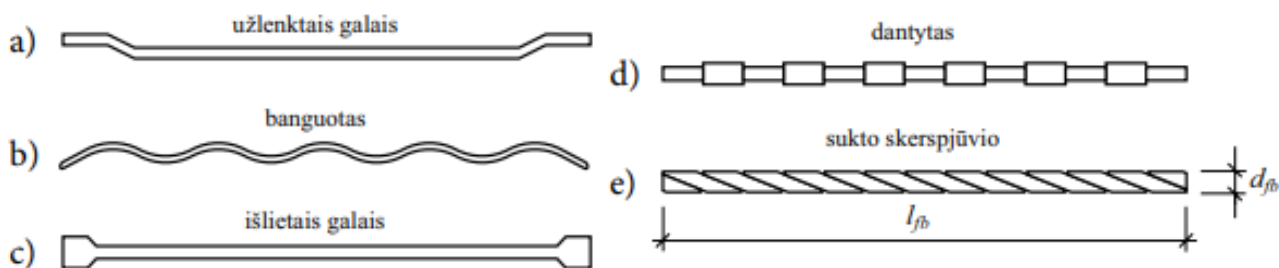
Betono savybių pagerinimui ir konstrukcijų armavimui gali būti naudojamas įvairių rūšių bei medžiagų plaušas (fibros). Literatūroje fibros klasifikuojamos įvairiai: pagal medžiagą, gamybos pobūdį, fizikines-chemines savybes, mechanines savybes, dydį, skerspjūvio formą, tipą, paskirtį ir kt. [15].

Pagal medžiagą fibros dažniausiai klasifikuojamos į:

- plieno fibras – dažniausiai pagamintas iš anglinio plieno, tačiau siekiant sumažinti galimą plieno koroziją gali būti gaminamos ir iš nerūdijančio plieno;
- mineralines fibras – pagamintas iš asbesto ar stiklo pluošto;
- natūralaus pluošto – pagamintas iš medienos, lapų, vilnos, plaukų, šilko ir kt.;
- sintetines fibras – pagamintas iš sintetinių polimerų (akrilo, nailono, poliesterio, polipropileno ir kt.).

Fibras klasifikuojant pagal fizikines ir chemines savybes dažnai išskiriamas tankis, paviršiaus šiurkštumas, cheminis aktyvumas, atsparumas ugniai ir kt. Dažniausiai išskiriamos mechaninės savybės yra tempiamasis stipris, tamprumo modulis, standumas, plastiškumas, santykinis pailgėjimas iki suirimo ir kt. [15].

Plaušai taip pat dažnai klasifikuojami pagal gamybos pobūdį arba formą. Skirtingos formos fibros turi skirtingą sukibimą su betonu, todėl plaušai užlenktais galais, banguotos ar sukto skerspjūvio formos labiausiai paplitę dėl gero sukibimo ir nesudėtingos gamybos technologijos.



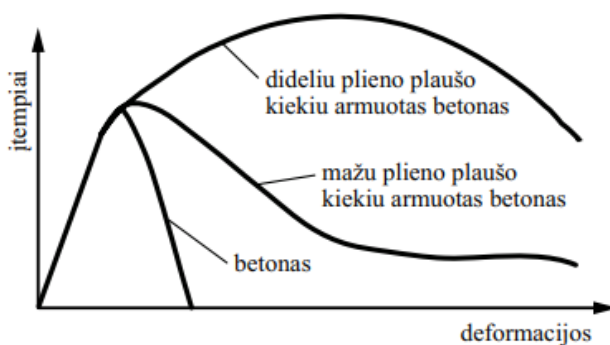
15 pav. Dažniausiai naudojamos plieno plaušo formos [29]

Nepaisant didelės plaušo rūšių gausos, ne visų jų panaudojimas yra vienodas. Tai labai priklauso nuo medžiagos savybių ir paties plaušo parametų. Polipropilėninis mikroplaušas veiksmingai varžo mikroplyšius betono kietėjimo stadijoje, tačiau dėl mažų matmenų ir nedidelio tamprumo modulio šis plaušas neturi didesnės įtakos makroplyšiams. Santykinai ilgas, stiprus ir turintis didelį tamprumo modulį plieno plaušas yra daug efektyvesnis varžant makroplyšius. Čia plyšį kertantis plieno plaušas efektyviai perima tempimo įtempius, taip suirimo pobūdį pakeisdamas iš trapiaus į plastišką.

Atsižvelgiant į šį veiksnių bei santykinai nesudėtingą gamybos technologiją, plieno plaušas yra plačiausiai naudojamas plaušas konstrukciniam ir nekonstrukciniam armavimui. Pagal gamybos technologiją plieno plaušo skerspjūvis gali būti apvalus, stačiakampis, trikampis bei sudėtingesnių formų. Siekiant pagerinti sukibimą su betonu, plieno plaušas gali būti deformuojamas – galai užlenkiami arba suplojami, plaušas subanguojamas, padaromos įspaudos ir kt. [15].

1.3.2. Plieninio plaušo savybės betono konstrukcijose

Tempiamas nearmuotas betonas, pasiekęs tempiamąjį stiprį, suyra trapiai. Nors plieno plaušas neturi didesnės įtakos betono tamprumo moduliui ir tempiamajam stipriui, tempiamojo plieno plaušu armuoto betono suirimas tampa daug plastiškesnis [30].



16 pav. Tipinės betono ir dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės [29]

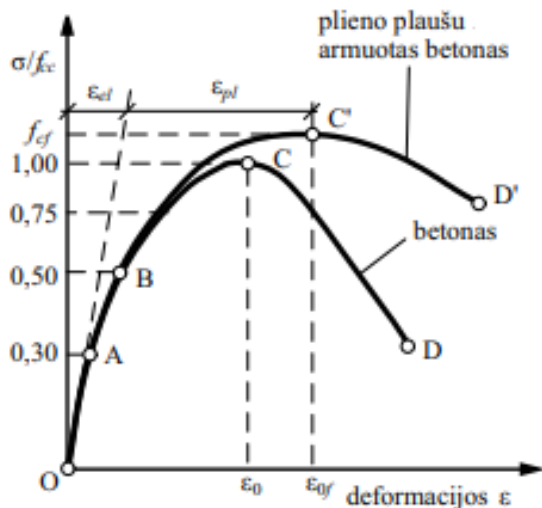
Lenkiamų betono konstrukcijų, dispersiškai armuotų plaušais, darbas gali būti apibūdinamas trimis stadijomis. Pirmoji stadija – tampriųjų deformacijų stadija. Šioje stadijoje plieno plaušas neįtakoja konstrukcijos elgsenos bei neperima jokių įtempimų. Tempimo ir gniuždymo įtempius perima betonas tol, kol pasiekiamas betono tempiamasis stipris. Antroji stadija – plyšių atsivėrimo pradžia. Ši stadija pasiekama, kai betono konstrukcijos deformacijos tampa didesnės negu ribinės betono tempimo zonos deformacijos. Toliau veikiamoje lenkimo apkrovų konstrukcijoje pradeda vertis vis didesni plyšiai, mikroplyšiai jungiasi į makroplyšius, tempimo įtempius perima plaušai, kurie riboja ir plyšių pločio didėjimą. Trečia stadija – irimo stadija. Šioje stadijoje kompozitinė konstrukcija suyra. Kai konstrukcijos įtempiai viršija medžiagos ribinius įtempius, įvyksta medžiagos suirimas. Esant didelėms deformacijoms, konstrukcija gali suirti ir nepasiekus stiprumo ribos, pavyzdžiui, dėl prasto plaušo ir betono sukibimo fibros yra ištraukiamos iš betono arba fibros yra tiesiog nutraukiamos [31].

Plieno plaušas priklausomai nuo kiekio ir jo parametrų šiek tiek pakeičia betono savybes – gniuždomąjį ir tempiamąjį stiprius bei tamprumo modulį. Vis dėl to labiausiai plaušas pakeičia betono suirimo pobūdį – betono suirimas dėl tempimo įtempimų iš trapaus tampa plastišku. Po plyšio atsivėrimo betonas vis dar gali atlaikyti apkrovas. Priklausomai nuo plaušo ir betono parametrų bei nuo plaušo kiekio šios apkrovos gali būti didesnės arba mažesnės nei betono tempiamasis stipris [32].

Naudojant 1,5 % plieninių fibrų nuo elemento tūrio, gali būti pasiektas 150% lenkiamojo stiprio padidėjimas ir 40 % tempiamojo betono stiprio padidėjimas. Atliekant gniuždymo bandymus nustatyta, jog fibrų naudojimas gali padidinti betono gniuždomąjį stiprį nuo 0 % iki 15 %. Tyrimais įrodyta, jog plieninių fibrų kiekio ir betono mechaninių savybių priklausomybė yra ne tiesinė. Labai didelis fibrų kiekis gali sumažinti betono gniuždomąjį ir lenkiamąjį stiprį [29].

Gniuždomasis stipris

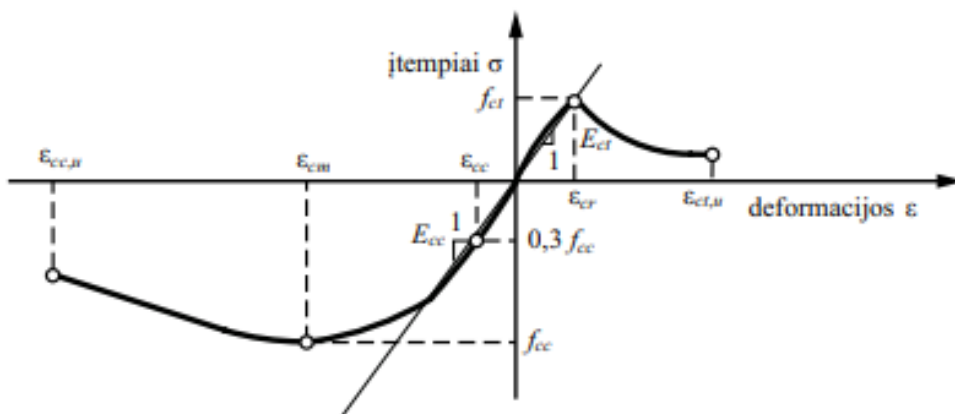
Plieno plaušu armuoto betono gniuždomasis stipris nustatomas tokiu pačiu būdu kaip ir įprastojo betono. Nustatyta, kad plieno plaušas beveik neturi įtakos gniuždomojo betono stipriui. Dispersiškai armuoto betono gniuždomasis stipris gali padidėti iki 15 %, kai elementas armuojamas apie 1,5 % plieno plaušo kiekiu. Šis padidėjimas gali būti siejamas su plieno plaušo savybe varžyti plyšių vystymąsi betono mikrostruktūros lygmeniu [29].



17 pav. Gniuždomojo betono deformacijos stadijos [29]

Tamprumo modulis

Nustatyta, kad dispersinis armavimas neturi didesnės teigiamos įtakos betono tamprumo moduliui. Tačiau pažymima, kad dėl netobulos dispersiškai armuoto betono mišinio gamybos technologijos tamprumo modulis gali ir sumažėti [29].



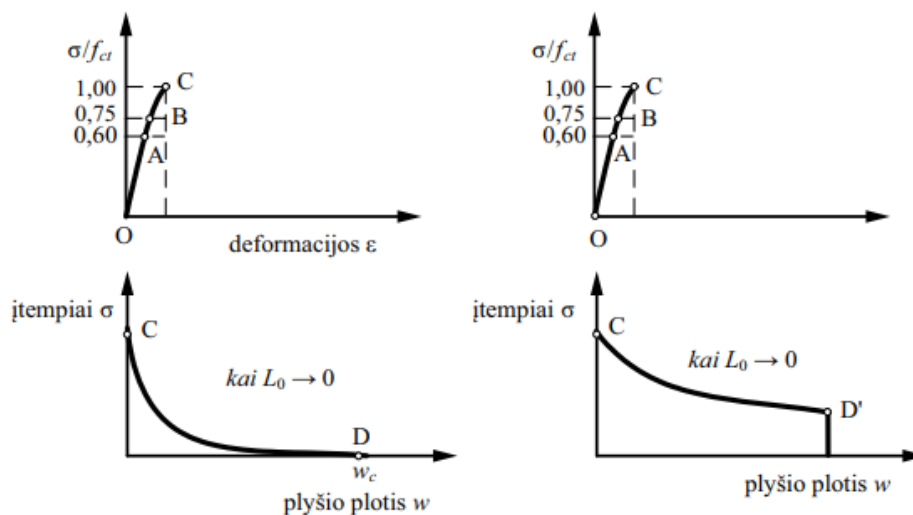
18 pav. Betono įtempių ir deformacijų priklausomybė [29]

Kerpamasis stipris

Betono ir gelžbetonio konstrukcijų kerpamasis stipris priklauso nuo užpildo sukibimo, trinties bei armatūros kiekio, esančių kirpimo plokštumoje. Tai pastebima ir dispersiškai armuotuose elementuose. Plieno plaušas suvaržo atsiveriančius plyšius ir taip išlaiko betono vientisumą, o tai padidina ir elemento kerpamąją galią [29].

Tempiamasis stipris

Tempiamo betono deformavimosi procesą galima suskirstyti į charakteringas stadijas. Kai tempimo įtempiai sudaro iki 60 % tempiamojo stiprio f_{ct} , nauji mikroplyšiai betone nesudaro ir deformavimosi procesas praktiškai yra tiesinis (OA diagramos dalis). Įtempiams viršijus $0,6f_{ct}$ ribą, prasideda vertis nauji mikroplyšiai, kurių plitimas betono elemente nėra varžomas, todėl sparčiai greitėja naujų mikroplyšių vėrimasis ir didėjimas (diagramos BC dalis) [29].



19 pav. Tempiamojo betono deformavimosi stadijos: a) be plieno plaušo; b) su plieno plaušu [33]

Plyšiai betone formuojasi statmenai tempimo įtempių veikimo kryptčiai. Kiekvienas naujai susiformavęs mikroplyšys sumažina tempimo zonoje dirbančio betono plotą. Mikroplyšiai toliau jungiasi tarpusavyje į stambesnius – makroplyšius ir įvyksta staigus konstrukcijos suirimas (CD diagramos dalis). Plieno plaušas pradeda efektyviai veikti tuomet, kai veriasi makroplyšiai. Plieno plaušas kerta atsiveriančius plyšius, suvaržo jų plitimą ir perima tempimo įtempius. Iš įtempių ir plyšio pločio priklausomybių kreivių matyti, jog betono mišinyje naudojant plienines fibras, tokio betono suirimo pobūdis tampa žymiai plastiškesnis [29].

1.4. Skyriaus apibendrinimas

Apžvelgiant literatūroje pateiktus mokslinių tyrimų, atliktų tiriant gumos įtaką betono savybėms, rezultatus, galima teigti, jog gumos naudojimas betono mišiniuose sumažina betono tankį ir tuo pačiu padidina poringumą dėl mažesnio gumos dalelių vienetinio svorio. Tankio sumažėjimas proporcingai didėja didėjant gumos kiekiui betono mišiniuose. Dėl didesnio tokio kompozitinio betono poringumo padidėja vandens įgeriamumas, tačiau pastebimai sumažėja šilumos laidumo koeficientas. Taip pat pastebėta, kad guma turi teigiamą poveikį betono atsparumui ugniai bei šalčiui. Tačiau gumos dalelių naudojimas betono mišiniuose sumažina betono gniuždomąjį stiprumą. Naudojant didesnę kiekį gumos pastebimas didesnis gniuždomojo stiprio sumažėjimas. Nors tempiamasis stiprumas nežymiai padidėja, gumos įtaka betono tempiamajam stiprumui yra sąlyginiai nedidelė, todėl dažniausiai nevertinama. Gumos dalelių įtaka betono lenkiamajam stiprumui priklauso nuo naudojamo gumos kiekio, tačiau pastebima, kad geriausi rezultatai pasiekiami naudojant ne daugiau 15 % gumos betono mišinyje. Guma modifikuoto betono tamprumo modulis sumažėja, tačiau naudojant didesnę kiekį gumos nustatytas didesnis atsparumas smūgiams.

Betono elementus dispersiškai armuojant plieno plaušu, lenkiamų elementų suirimo pobūdis pasikeičia iš trapios į plastinę suirimo būdą. Betono ir gelžbetonio elementuose naudojamas plaušas suvaržo plyšių atsivėrimą ir perima tempimo zonoje veikiančius tempimo įtempius, taip padidindamas lenkiamos konstrukcijos stiprumą. Plaušu armuotų elementų tempiamasis stiprumas labiausiai priklauso nuo naudojamo plieno plaušo kiekio. Naudojant didesnį kiekį dažniausiai pasiekiamas didesnis konstrukcijos stiprumas, tačiau konkretų stiprumą gana sunku prognozuoti dėl galimo netolygaus plaušo pasiskirstymo betono ar gelžbetonio elementuose.

Padangų perdirbimo metu gaunami gumos milteliai, kuriuos, priklausomai nuo pasirinkto pakeitimo lygio ir frakcijos, būtų galima naudoti kaip dalinį betono sausų užpildų pakaitalą. Skirtingų automobilių (keleivinių ir krovininių) padangose naudojami įvairaus skersmens plieniniai kordai ir vielos, skirti padangų stiprumui ir ilgaamžiškumui užtikrinti, galėtų būti efektyviai naudojami pakeičiant sertifikuotos gamybos plieno puoštus betono ir gelžbetonio konstrukcijose. Šiuo tiriamuoju darbu siekiama ištirti galimą perdirbtų padangų atliekų pritaikymą kuriant kompozitinį betoną su gumos priemaišomis bei plieninių padangų kordų ir vielų racionalų panaudojimą armuojant betono konstrukcijas. Norint tiksliai nustatyti, ar pagrindines padangų perdirbimo atliekas racionalu naudoti betono konstrukcijose, taip mažinant taršą ir sprendžiant ekologines bei saugaus atliekų tvarkymo problemas, būtina įvertinti padangų plieninių kordų ir vielų efektyvumą dispersinio armavimo elementuose. Šiam tikslui pasiekti, tiriamojoje dalyje tiriami bandiniai, pagaminti iš kompozitinio bei dispersiškai armuoto betono su antrinėmis žaliavomis, gautomis padangų perdirbimo metu. Atlikti bandinių gniuždomojo, lenkiamojo, skeliamojo stiprio bandymai bei atsparumo šalčiui ir tamprumo modulio nustatymo tyrimai. Taip pat papildomai atliktas plieninių kordų ir vielų tempimo bandymas.

2. Tyrimų metodologija

2.1. Gniuždomasis stipris

Tiriamajame darbe bandinių gniuždomasis stipris nustatomas pagal betono gniuždymo stiprio standartą LST EN 12390-3:2009 „Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris“.

Bandymo mašinos

Gniuždymo bandymui naudojamas hidraulinis presas „Toni Technik 2020“. Naudojamos gniuždymo bandymo mašinos atitinka EN 12390-4 standartą.

Naudojami bandiniai

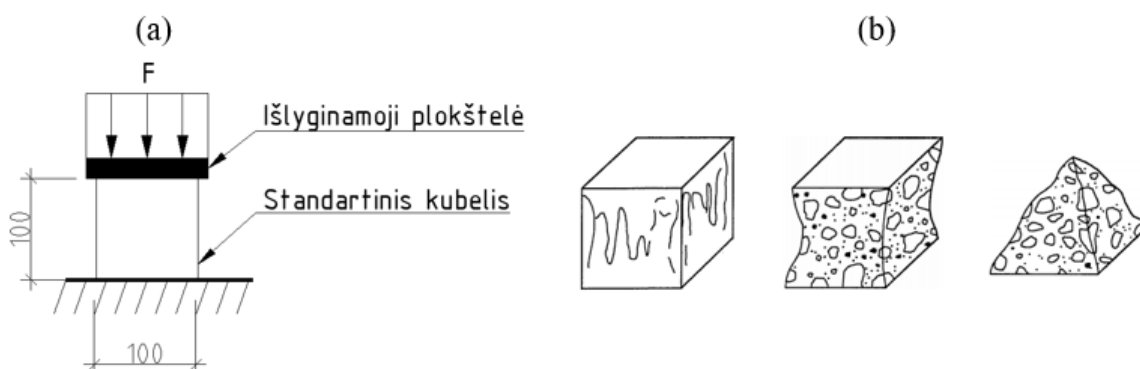
Tyrimo bandinys – kubas, atitinkantis, EN 12390-1 reikalavimus ir neviršijantis standarte nurodytų bandinio matmenų neatitikimo dydžio tolerancijų. Tiriamajame darbe naudojami kubai, kurių matmenys 100x100x100 mm. Pažeistiems arba labai tuštytiems bandiniams gniuždymo bandymas neatliekamas.

Bandymo metodika (pagal LST EN 12390-3:2009)

Prieš pradėdant gniuždymo bandymus, užtikrinamas tinkamas bandymo mašinos atramų ir bandinio paviršių sąlytis. Nuo bandymo mašinos atraminių paviršių, turinčių sąlytį su bandiniu, nuvalomos pašalinės medžiagos, bandinys švariai nušluostomas ir, jeigu reikia, nusausinamas nuo perteklinės drėgmės [34].

Bandiniai dedami taip, kad bandymo metu apkrova veiktų statmenai bandinio formavimo krypties ir bandinio centras sutaptų su apatinės plokštės centru $\pm 1\%$ nurodyto kubo kraštinės arba nurodyto cilindro skersmens dydžio tikslumu.

Parentamas pastovus apkrovos didinimo nuo 0,2 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$) iki 1,0 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$) greitis. Apkrova bandiniui perduodama be smūgių ir nepertraukiamai didinama parinktu pastoviu $\pm 10\%$ greičiu tol, kol toliau nedidėja.



20 pav. Gniuždymo bandymo schema (a) ir tinkamo bandinių suirimo pavyzdžiai (b)

Bandiniai gniuždomi iki suirimo. Suirus bandiniams užrašoma didžiausia parodyta ardančioji apkrova.

Stipris gniuždant yra apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$f_c = \frac{F}{A} \cdot \beta \quad (1)$$

čia: f_c – bandinio stipris gniuždant [N/mm^2];

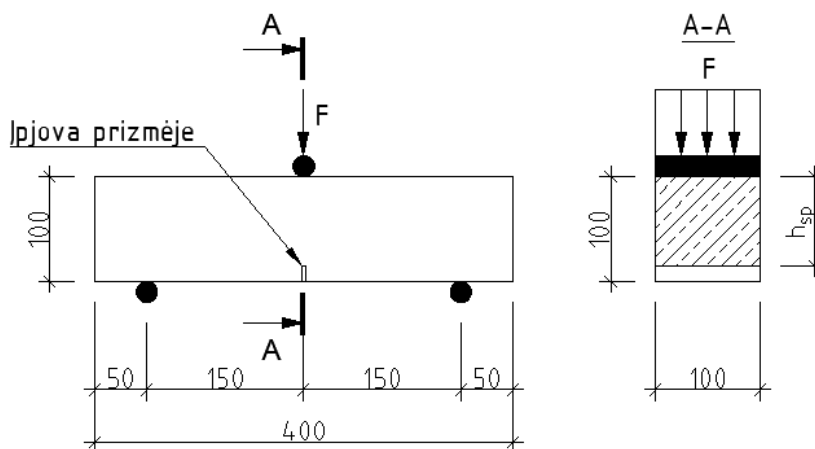
F – didžiausia ardančioji gniuždymo jėga [N];

A – bandinio gniuždomo paviršiaus plotas [mm^2];

β – koeficientas bandinių dydžiui įvertinti. Kai bandomas kubas, kurio kraštinė 100 mm, tai $\beta = 0,95$.

2.2. Lenkiamasis stipris

Fibromis armuotų sijų triašio lenkimo bandymas atliekamas vadovaujantis EN 14651:2005+A1:2007 „Betono su metaliniu pluoštu bandymo metodas. Tempiamojo stiprio lenkiant matavimas (porcingumo riba (*LOP*), liekiamasis stipris)“ standartu. Plieniniu pluoštu armuoto betono tempiamasis stipris vertinamas pagal liekamojo lenkiamojo tempimo stiprumo vertes, nustatytas pagal apkrovos – pleišėjimo kreivę arba apkrovos ir deformacijos kreivę, gautą taikant bandinio centre koncentruotos apkrovos ant paprasčiausiai atremtos įpjautos prizmės [35].



21 pav. Lenkimo bandymo schema

Bandymo mašinos

Lenkimo bandymui naudojamas hidraulinis presas „Toni Technik 2020“. Naudojamos bandymo mašinos atitinka EN 12390-4 standartą.

Bandiniams atremti ir perduoti apkrovai naudojami pailgi, lygaus paviršiumi metaliniai cilindrai, kurių skersmuo $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, o ilgis 10 mm ilgesnis už bandomos prizmės plotį. Vienas iš atraminių cilindrų yra įtvirtinamas (atitinka nepaslankią šarnyrinę atramą), kitas atraminis cilindras ir viršutinis cilindras, perduodantis apkrovą į bandinį, paliekami laisvi pasisukti (atitinka paslankius šarnyrus). Atstumas tarp atramų – 300 mm.



22 pav. Hidraulinis presas „Toni Technik 2020“, naudotas lenkimo bandymui

Lenkimo deformacijoms fiksuoti naudojami keitikliai ir poslinkio davikliai WA50

Naudojami bandiniai

Tyrimas tinka bandiniams, kurie armuoti fibromis, ne ilgesnėmis negu 60 mm. Bandymui naudojamos sijos, kurių skerspjūvis 100x100 mm, ilgis 400 mm. Sijos įpjautos visu bandinio pločiu per sijos vidurį, įpjovimo aukštis 7–8 mm.

Bandymo metodika (pagal EN 14651:2005+A1:2007)

Bandinys nuvalomas nuo perteklinės drėgmės ir pašalinių medžiagų. Prie bandinio pritvirtinami daviklių laikikliai iš abiejų įpjovos pusių nurodytais atstumais pagal EN 14651:2005+A1:2007.

Bandinys centruojamas bandymo mašinoje, kad apkrova būtų perduota bandomos prizmės tarpatramio viduryje. Fiksuojami davikliai, matuojantys įpjovos praplatėjimą *CMOD* bandymo metu.

Nustatomas apkrovimo greitis – 0,6 mm/min. Bandymas atliekamas tol, kol *CMOD* reikšmė pasiekia daugiau negu 5 mm.

Pagal EN 14651:2005+A1:2007 reikalavimus, fiksuojami tokie parametrai: tempiamasis stipris *LOP*, prie kurio atsiveria plyšiai; liekamasis tempimo stipris lenkiant $f_{R,i}$, kai *i* – matavimo numeris esant konkrečiam įlinkiui arba *CMOD* reikšmei. Bandymo metu fiksuojami matavimai, kurių metu pasiekiamos tokios *CMOD* reikšmės: kai *i*=1, tai *CMOD*=0,5 mm; kai *i*=2, tai *CMOD*=1,5 mm; kai *i*=3, tai *CMOD*=2,5 mm; kai *i*=4, tai *CMOD*=3,5 mm.

Liekamasis tempimo stipris $f_{R,i}$ apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{R,i} = \frac{3 \cdot F_{R,i} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2)$$

čia: $f_{R,i}$ – liekamasis tempimo stipris [N/mm^2];

$F_{R,i}$ – apkrova, esant fiksuotai $CMOD_i$ reikšmei [N];

L – bandomos prizmės tarpatramis [mm]. Tyrimo metu visų bandinių tarpatramis $L=300mm$;

b – bandomos prizmės skerspjūvio plotis [mm];

h_{sp} – bandomos prizmės skerspjūvio aukštis iki įpjovos [mm].

2.3. Skeliamasis stipris

Baigiamajame darbe skeliamasis stipris nustatomas vadovaujantis LST EN 1338:2003+AC:2006 „Betoninės grindinio trinkelės. Reikalavimai ir bandymo metodai“ standartu.

Bandymo mašinos

Skėlimo bandymui naudojamas hidraulinis presas „Toni Technik 2020“. Naudojamos skėlimo bandymo mašinos atitinka EN 12390-4 standartą.

Naudojami du metaliniai cilindrai, vienas bandinio viršuje, kitas – apačioje. Cilindrai atitinka apkrovos paskirstymo juostas, atremtas į standžias hidraulinio presu atramas.

Naudojami bandiniai

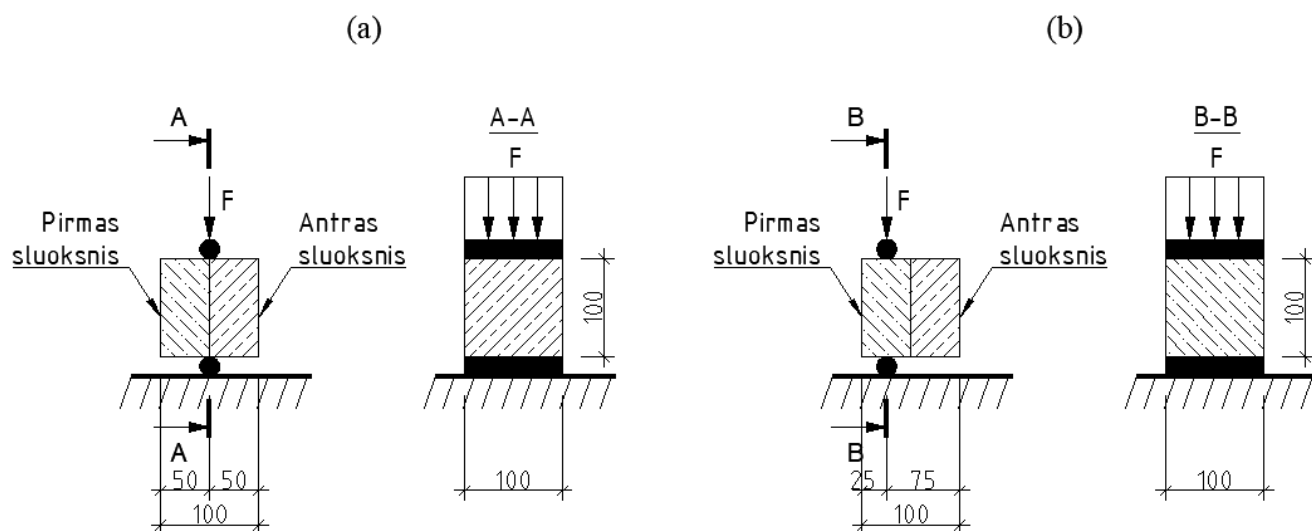
Tyrimo bandinys – kubas atitinkantis, EN 12390-1 reikalavimus ir neviršijantis standarte nurodytų bandinio matmenų neatitikimo dydžio tolerancijų. Tiriamajame darbe naudojami kubai, kurių matmenys 100x100x100 mm.

Bandymo metodika (pagal LST EN 1338:2003+AC:2006)

Nuo bandinio pašalinami iškilimai, pašalinės medžiagos ir kt. Jei paviršius šiurkštus ar kreivas, jis turi būti nušlifuotas ar kitaip išlygintas [36].

Bandinys dedamas į bandymo mašiną su apkrovos paskirstymo cilindrais ant viršutinio ir apatinio paviršių, kad jie liestųsi su hidraulinio presu atramomis. Patikrinama, ar cilindro ašys yra vienoje linijoje su bandinio skėlimo pjūviu (skėlimo pjūvis priimamas bandinio viduryje).

Skėlimo bandymas atliekamas skeliant bandinius per atskirų sluoksnių kontakto zoną išilgai sluoksnių sankirtos bei kiekvieno sluoksnio viduryje.



23 pav. Skėlimo bandymo schema sluoksnių kontakto zonoje (a) ir atskirų sluoksnių viduryje (b)

Bandinys apkraunamas didinant apkrovą pastoviu greičiu iki bandinio suirimo. Suirimo apkrova fiksuojama.

Apskaičiuojamas bandinio irimo plokštumos plotas:

$$S = l \cdot t \quad (3)$$

čia: S – bandinio irimo plotas [mm^2];

l – bandinio suirimo plokštumos ilgio dviejų matavimų vidurkis: vienas bandinio viršuje, kitas bandinio apačioje [mm];

t – bandinio suirimo plokštumos storio (aukščio) trijų matavimų vidurkis: vienas bandinio viduryje ir po du iš kraštų [mm].

Bandinio stipris skeliant T apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$T = 0,637 \cdot \frac{F}{S} \cdot k \quad (4)$$

čia: T – bandinio stipris skeliant [N/mm^2];

S – bandinio irimo plotas [mm^2];

F – didžiausia ardančioji jėga [N];

k – bandinio storio koregavimo koeficientas ($k=1,11$, kai bandinio storis $t=100mm$).

2.4. Fibrų tempiamasis stipris

Baigiamajame darbe atlikti betono bandinių dispersiniam armavimui naudojamų plieninių padangų kordų ir vielų tempiamojo stiprio nustatymo bandymai. Bandymai atlikti vadovaujantis LST EN ISO 15630-1:2019 „Plienas betonui armuoti ir įtempti. Bandymo metodai. 1 dalis. Armatūriniai strypai, virbai ir viela“ standartu.

Bandymo mašinos

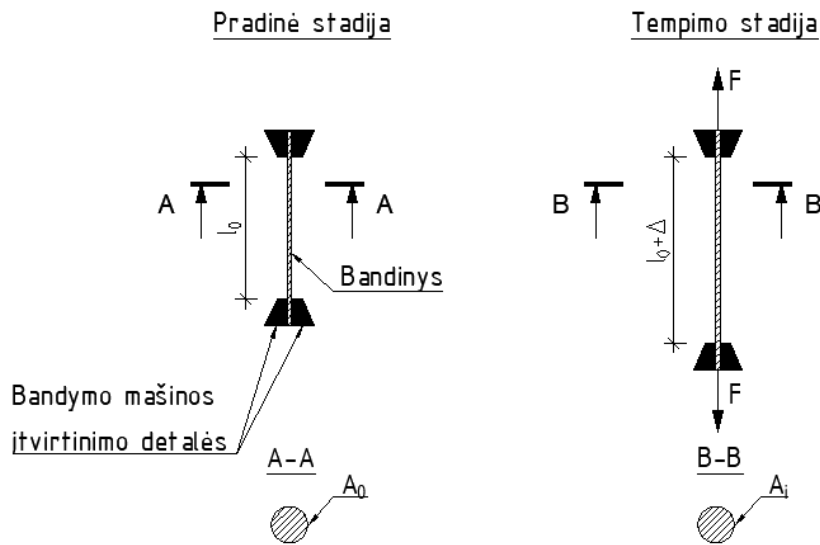
Padangų kordų ir vielų tempiamajam stipriui bei įtempių-deformacijų priklausomybei nustatyti naudojamas universalus tempimo presas P-50 (vertikalus tempimas).

Naudojami bandiniai

Tyrimams naudojami padangų perdirbimo metu gauti plieniniai padangų kordai ir vielos. Bandomų kordų ir vielų ilgis 5–7 cm, skerspjūvio forma – apvali. Plieniniai kordai ir vielos pagal skerspjūvį išskirstomi į tris grupes: 1) $2,2 \text{ mm} > \varnothing > 1,4 \text{ mm}$; 2) $1,4 \text{ mm} \geq \varnothing \geq 0,7 \text{ mm}$; 3) $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$. Bandymas atliekamas su kiekvienos grupės kordais arba vielomis. Testuojama po du bandinius iš kiekvienos bandinių grupės.

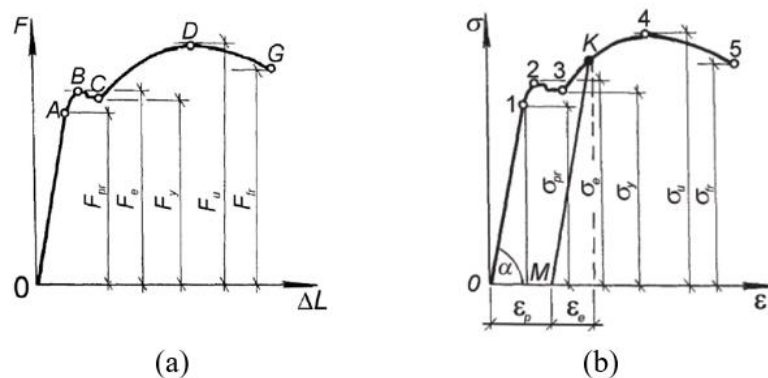
Bandymo metodika

Tempimo bandymas atliekamas kambario temperatūroje ($10-35^\circ\text{C}$), rekomenduojama temperatūra $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. Bandinys įvirtinamas tempimo mašinoje ir tempiamas iki suirimo (stiprumo ribos) [37].



24 pav. Plieninių kordų ir vielų tempimo bandymo schema

Tempiant bandinį automatiškai braižoma tiesioginė įtempių diagrama, vaizduojanti priklausomybę tarp bandinį veikiančios jėgos F ir bandinio ilgio pokyčio (absoliutinės išilginės deformacijos) ΔL . Gauta diagrama gali būti pakeičiama įtempių-deformacijų priklausomybės kreive [37].



25 pav. Mažaanglio plieno tiesioginė tempimo diagrama (a) ir sąlyginė tempimo diagrama (b) [37]

Pagal gautą tempimo diagramą apskaičiuojama: proporcingumo, tamprumo, takumo, stiprumo ir trūkimo ribos.

Proporcingumo riba – didžiausias įtempis, iki kurio įtempiai kinta tiesiškai:

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0} \quad (5)$$

čia: σ_{pr} – proporcingumo ribos įtempis [N/mm^2];

F_{pr} – proporcingumo ribos jėga [N];

A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas [mm^2].

Tamprumo riba – didžiausias įtempis, iki kurio bandinyje neatsiranda jokių liekamųjų deformacijų:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (6)$$

čia: σ_e – tamprumo ribos įtempis [N/mm^2];

F_e – tamprumo ribos jėga [N];

A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas [mm^2].

Takumo riba – mažiausias įtempis, kuriam veikiant bandinio deformacija didėja, esant beveik pastoviai apkrovai:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \quad (7)$$

čia: σ_y – takumo ribos įtempis [N/mm^2];

F_y – takumo ribos jėga [N];

A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas [mm^2].

Stiprumo riba – didžiausio apkrovos, kurią gali atlaikyti bandinys, įtempis:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \quad (8)$$

čia: σ_u – stiprumo ribos įtempis [N/mm^2];

F_u – stiprumo ribos jėga [N];

A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas [mm^2].

Trūkimo riba – įtempis, kai bandinys nutrūksta:

$$\sigma_{fr} = \frac{F_{fr}}{A_1} \quad (9)$$

čia: σ_{fr} – trūkimo ribos įtempis [N/mm^2];

F_{fr} – trūkimo ribos jėga [N];

A_1 – bandinio skerspjūvio plotas trūkimo vietoje [mm^2].

Santykinė bandinio deformacija apskaičiuojama pagal santykinį liekamąjį bandinio ilgio pokytį:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100 \% \quad (10)$$

čia: δ – santykinė bandinio deformacija [%];

L_0 – pradinis bandinio ilgis [mm];

L_1 – bandinio ilgis po bandymo [mm].

2.5. Tamprumo modulis

Siekiant nustatyti gumos turinčio betono tamprumo modulį ir palyginti su kontrolinio betono tamprumo moduliu, atliekamas neardantis tamprumo modulio nustatymo bandymas. Bandymas atliktas vadovaujantis ISO 1920-10:2010 „Testing of concrete Determination of static modulus of elasticity in compression“ standartu.

Bandymo mašinos

Naudojamas hidraulinis presas „Toni Technik 2020“ bei tamprumo modulio matavimo davikliai.

Naudojami bandiniai

Tamprumo modulis nustatomas gumos turinčio betono bei kontrolinio betono, armuoto sertifikuotomis fibromis, prizmėms. Prizmių ilgis 400 mm, skerspjūvis 100x100 mm. Abiejų prizmių ilgis gali būti mažinamas priklausomai nuo naudojamo gniuždymo preso aukščio tarp gniuždymo mechanizmo plokščių, bet ne mažesnis negu 300 mm.

Bandymo metodika

Pagal gniuždymo bandymo rezultatus ir ISO 1920-4 „Testing of concrete Strength of hardened concrete“ standartą, apskaičiuojama jėga, prie kurios bus bandomas tamprumo modulis:

$$F_c = f_c \cdot 0,81 \cdot 0,3 \quad (11)$$

čia: F_c – jėga, prie kurios bandomas tamprumo modulis [kN];

f_c – bandinio stipris gniuždant [N/mm^2];

k – bandinio skerspjūvio formą įvertinantis koeficientas, priimamas 0,81;

t – bandinio tamprios zonos dalis, priimama 0,3.

Laboratorine įranga matuojamas F_c apkrova veikiamo bandinio statinis modulis. Apkrovimas kartojamas tris kartus, prietaisu matuojant gautų tamprumo modulio verčių vidurkį.



26 pav. Tamprumo modulio nustatymo bandymas

2.6. Atsparumas šalčiui

Tiriamajame darbe bandinių atsparumas šalčiui nustatomas pagal betono tūrinį užšaldymo ir atšildymo metodą vadovaujantis LST L 1428.17:2005 „Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu“ standartu.

Bandymo mašinos

Bandinių atsparumo šalčio tyrimui naudojama šaldymo kamera KHC-2 N10032, kurioje galima palaikyti priverstinę oro konvekciją. Žemiausia pasiekiamą temperatūrą naudojamose šaldymo kameroje $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Naudojami bandiniai

Tyrimo bandinys – kubas atitinkantis, EN 12390-1 reikalavimus ir neviršijantis standarte nurodytų bandinio matmenų neatitikimo dydžio tolerancijų. Tiriamajame darbe naudojami kubai, kurių matmenys $100\times 100\times 100\text{ mm}$.

Bandymo metodika

Betono bandiniai, pasiekę projektinį stiprį, įdedami į vonele, pripildytą vandeniu (be druskos tirpalo), kurio temperatūra $(18 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bandiniai mirkomi vandenyje 4 paras, keičiant vandens lygį bandinio aukščio atžvilgiu: pirmą parą vandens lygis turi apsemti $1/3$ bandinių aukščio, antrą para – $2/3$ bandinio aukščio, vėliau 48 h bandinys laikomas visiškai pasemtas vandenyje [38].

Po bandinių įmirkimo vandeniui nustatomas pradinis gniuždomasis stipris pagal LST EN 12390-3 standartą.

Bandiniai, skirti atsparumo šalčiui nustatymui, sudedami į šaldymo kamerą kaip nustatyta LST L 1428.17:2005 standarte. Šaldymo kameroje bandiniai yra veikiami užšalimo ir atšilimo ciklų. Per parą naudojamose šaldymo kameroje atliekami 3 šalčio ciklai. Bandiniai apžiūrimi po 150, 200 ir 250 šalčio ciklų. Praėjus nustatytam šalčio ciklų skaičiui, bandiniai apžiūrimi, jeigu reikia, pasveriami masės nuostoliui nustatyti, ir atliekamas gniuždomojo stiprio nustatymo bandymas pagal LST EN 12390-3 standartą. Jeigu bandinių vidutinis gniuždomasis stipris po reikiamo užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus atitinka arba ne daugiau kaip 5 % mažesnis už kontrolinių bandinių gniuždomojo stiprį, laikoma, kad betonas atitinka atsparumo šalčiui reikalavimus pagal užsiduotą šalčio ciklų skaičių.

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

$$\Delta f = \frac{f_s - f_k}{f_k} \cdot 100 \quad (12)$$

čia: Δf – betono bandinių gniuždomojo stiprio sumažėjimas procentais lyginant su kontrolinių bandinių stipriais [%];

f_s – bandinių gniuždomojo stiprių vidurkis po tam tikro užšalimo – atšilimo ciklų skaičiaus [N/mm^2];

f_k – kontrolinių bandinių gniuždomojo stiprio verčių vidurkis prieš atsparumo šalčiui bandymą [N/mm^2].

3. Tyrimų rezultatai

3.1. Medžiagos ir bandiniai

3.1.1. Medžiagos

Cementas. Kaip rišamoji medžiaga naudojamas portlandcementis CEM II/A-LL 42.5 N Standard. Cementas atitinka LST EN 197-1:2011 reikalavimus.

Užpildai. Naudojamas smulkus užpildas – smėlis (frakcija 0/4). Stambus užpildas – dolomitinė skalda (frakcija 4/16). Naudojami užpildai atitinkantys LST EN 12620:2003+A1:2008 reikalavimus.

Vanduo. Naudojamas geriamas vandentiekio vanduo, kuriame nėra normalų betono kietėjimą stabdančių priemaišų bei atitinka keliamus reikalavimus.

Superplastiklis. Naudojamas superplastiklis Sika Viscocrete D187 (18 %).

Fibros. Betono mišiniuose naudojamos sertifikuotos fibros ($\emptyset = 1$ mm, ilgis 50 mm) bei padangų perdurbimo metu išrūšiuoti plieniniai padangų kordai. Kordai suskirstomi į tris grupes pagal skerspjūvio diametrą: 1) $2,2 \text{ mm} > \emptyset > 1,4 \text{ mm}$; 2) $1,4 \text{ mm} \geq \emptyset \geq 0,7 \text{ mm}$; 3) $\emptyset \approx 0,35 \text{ mm}$. Padangų kordų ir vielų ilgis 6-7 cm.

Guma. Mišiniuose naudojama smulkinta padangų guma, kurios dalelių skersmuo – 0,05 mm. Guma naudojama kaip dalinis smulkaus užpildo pakaitalas ir betono mišiniuose neviršija 2,5 % mišinio užpildų masės kiekio.

3.1.2. Bandinių paruošimas

7 lentelė. Teorinė betono mišinio sudėtis.

	1 m ³	10 l
Cementas	340 kg/m ³	3400 g
Stambus užpildas	970 kg/m ³	9700 g
Smulkus užpildas	870 kg/m ³	8700 g
Vanduo	170 kg/m ³	1700 g
Superplastiklis (0,8%)	2,7 kg/m ³	27 g
Fibros (30 kg/m ³)	30 kg/m ³	300 g
Guma (0,05mm)	2,5 % nuo užpildų masės	178 g

Pastaba: gumos kiekis skaičiuotas 2,5 % nuo bendros užpildų masės, bet pakeičiamas tik smulkus užpildas. Mišinyje su guma fibros nenaudojamas.

8 lentelė. Gautų betono mišinių sudėtys.

	1	2	3	4	5	6	7 (15 l)
Cementas	3404 g	3406 g	3402 g	3404 g	3411 g	3407 g	5106 g
Stambus užpildas	9706 g	9701 g	9702 g	9701 g	9707 g	9706 g	14550 g
Smulkus užpildas	8706 g	8704 g	8706 g	8708 g	8699 g	8708 g	12426 g
Vanduo	1700 g	1702 g	1712 g	1717 g	1707 g	1698 g	2559 g

Superplastiklis (0,8%)	270 g	269 g	270 g	271 g	273 g	271 g	406 g
Fibros (30 kg/m ³)	301 g ^a	300 g ^b	301 g ^c	302 g ^{d*}	300 g ^{d**}	-	-
Guma	-	-	-	-	-	-	268 g

Paaškinimai: *a* – sertifikuotos fibros, $\varnothing = 1$ mm;

b – padangų kordai, $1,4 \text{ mm} < \varnothing < 2,1$ mm;

c – padangų kordai, $0,7 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1,4$ mm;

d – padangų kordai, $\varnothing \approx 0,35$ mm;

* – į mišinį dėta 302 g padangų kordų, maišymo metu iš mišinio išimta 80 g fibrų dėl sušokimo į „ežius“ (302 – 80 = 222 g realus fibrų kiekis betono mišinyje)

** – į mišinį dėta 300 g kordų, maišymo metu išimta 71 g fibrų dėl sušokimo į „ežius“, papildomai įdėta 107 g mažesnio ilgio kordų, po pakartotinio maišymo išimta dar 106 g fibrų (300 – 71 + 107 – 106 = 230 g realus fibrų kiekis betono mišinyje)



27 pav. Naudojamos fibros (kairėje viršuje – sertifikuotos fibros, $\varnothing = 1$ mm; dešinėje viršuje – padangų kordai, $1,4 \text{ mm} < \varnothing < 2,1$ mm; kairėje apačioje – padangų kordai, $0,7 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1,4$ mm; dešinėje apačioje – padangų kordai, $\varnothing \approx 0,35$ mm;)

Gauti betono mišiniai atitinka S2-S3 standumo klases. Pastebėta, kad naudojant smulkesnes fibras betono mišinys gaunamas standesnis. Tai lemia didesnis smulkių fibrų tūris ir mažesnis vienetinis svoris lyginant su stambesnėmis fibromis.



28 pav. 300g skirtingų diametrų fibrų tūrinis palyginimas (kairėje viršuje – padangų kordai, $0,7 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1,4 \text{ mm}$; kairėje apačioje – sertifikuotos fibros, $\varnothing = 1 \text{ mm}$; dešinėje viršuje – padangų kordai, $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$; dešinėje apačioje – padangų kordai, $1,4 \text{ mm} < \varnothing < 2,1 \text{ mm}$;))

Naudojant smulkiausias padangų kordus, šie dėl savo ilgio ir įsismagnetinimo betono maišymo metu sušoka į „ežius“. Pasvėrus sušokusių fibrų masę 4 ir 5 mišiniuose gauta, kad apie trečdalis naudotų fibrų kiekio netinkamai įsimašo į betono mišinį ir turi būti išimamas iš jo (4 mišinys: $80 \text{ g} / 302 \text{ g} \times 100 \% = 26,5 \%$; 5 mišinys: $(71 \text{ g} + 106 \text{ g}) / (30 \text{ g} + 107 \text{ g}) \times 100 \% = 26,3 \%$).



29 pav. Iš smulkių fibrų susiformavę „ežiai“



30 pav. Naudojama smulkinta padangų atliekų guma

Naudojant pagamintus betono mišinius suformuoti 18 standartinių kubelių (100x100x100 mm), 9 standartinės prizmės (100x100x400 mm) bei 4 dvisluksnės sijos, kurių apatinis sluoksnis – betonas su smulkiomis fibromis $\varnothing \approx 0,35$ mm, viršutinis sluoksnis – betonas su gumos atliekomis arba kontrolinis betono mišinys.

9 lentelė. Pagamintų bandinių sąrašas

Bandinio žymuo	Bandinio forma ir matmenys	Betono mišinio numeris*	Naudoto betono mišinio aprašymas
K _{kf,1}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	1	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis (fibrų $\varnothing = 1$ mm)
K _{kf,2}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	1	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis (fibrų $\varnothing = 1$ mm)
S _{kf,1}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	1	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis (fibrų $\varnothing = 1$ mm)
S _{kf,2}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	1	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis (fibrų $\varnothing = 1$ mm)
K _{stpk,1}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	2	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $1,4 \text{ mm} < \varnothing < 2,1 \text{ mm}$)
K _{stpk,2}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	2	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $1,4 \text{ mm} < \varnothing < 2,1 \text{ mm}$)
S _{stpk,1}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	2	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $1,4 \text{ mm} < \varnothing < 2,1 \text{ mm}$)
S _{stpk,2}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	2	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $1,4 \text{ mm} < \varnothing < 2,1 \text{ mm}$)
K _{vpk,1}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	3	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $0,7 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1,4 \text{ mm}$)
K _{vpk,2}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	3	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $0,7 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1,4 \text{ mm}$)
S _{vpk,1}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	3	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $0,7 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1,4 \text{ mm}$)

S _{vpk,2}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	3	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordai $0,7 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1,4 \text{ mm}$)
K _{smpk,1}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	4	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$)
K _{smpk,2}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	4	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$)
S _{smpk,1}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	4	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$)
S _{smpk,2}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	4	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$)
K _{smpk,3}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	5	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$)
K _{smpk,4}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	5	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$)
K _{k,1}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	6	Kontrolinis betonas be fibrų ir gumos
K _{k,2}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	6	Kontrolinis betonas be fibrų ir gumos
K _{k,3}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	6	Kontrolinis betonas be fibrų ir gumos
K _{k,4}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	6	Kontrolinis betonas be fibrų ir gumos
K _{g,1}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	7	Betonas su daliniu smulkaus užpildo pakeitimu smulkinta guma
K _{g,2}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	7	Betonas su daliniu smulkaus užpildo pakeitimu smulkinta guma
K _{g,3}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	7	Betonas su daliniu smulkaus užpildo pakeitimu smulkinta guma
K _{g,4}	Standartinis kubelis 100x100x100 mm	7	Betonas su daliniu smulkaus užpildo pakeitimu smulkinta guma
S _{g,1}	Standartinė prizmė 100x100x400 mm	7	Betonas su daliniu smulkaus užpildo pakeitimu smulkinta guma
SS _{smpk/k,1}	Dvisluksnė prizmė 100x100x400 mm	5, 6	Apatinis sijos sluoksnis – kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$); viršutinis sluoksnis – kontrolinis betonas be fibrų ir gumos
SS _{smpk/k,2}	Dvisluksnė prizmė 100x100x400 mm	5, 6	Apatinis sijos sluoksnis – kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$); viršutinis sluoksnis – kontrolinis betonas be fibrų ir gumos
SS _{smpk/g,1}	Dvisluksnė prizmė 100x100x400 mm	5, 7	Apatinis sijos sluoksnis – kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$); viršutinis sluoksnis – betonas su daliniu smulkaus užpildo pakeitimu smulkinta guma
SS _{smpk/g,2}	Dvisluksnė prizmė 100x100x400 mm	5, 7	Apatinis sijos sluoksnis – kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (kordų $\varnothing \approx 0,35 \text{ mm}$); viršutinis sluoksnis – betonas su daliniu smulkaus užpildo pakeitimu smulkinta guma

* Betono mišinių sudėtis žiūrėti 7 lentelėje.



31 pav. Gautų bandinių pavyzdžiai

Visi bandiniai po betonavimo 28 paras laikyti aplinkoje, kurios drėgmė 95–100 %, o temperatūra apie +20 °C. Bandymai atlikti ne anksčiau kaip po 28 parų nuo bandinių betonavimo pradžios.

3.2. Gniuždomasis stipris

Gniuždomasis stipris nustatomas po 28 parų bandinių kietėjimo vandenyje. Bandymas atliekamas kontrolinio betono, įvairaus skersmens padangų kordais arba sertifikuotomis fibromis armuotų bei gumos turinčių betono bandiniams.

10 lentelė. Gniuždymo bandymo rezultatai

Bandinio žymuo	Bandinio betono sudėties aprašymas	Matmenys $a \times b \times h$, mm	Bandinio tūris V , m ³	Bandinio masė m , g	Bandinio tankis ρ , kg/m ³	Gniuždomo paviršiaus plotas A , mm ²	Gniuždomasis stipris σ_M , N/mm ²	Bandinio matmenų pataisos koeficientas β	Gniuždomasis stipris f_c , N/mm ²
K _{kf,1}	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis	100,12 100,20 100,50	0,00101	2396,70	2377,16	10032,02	54,43	0,95	51,71
K _{sipk,1}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing > 1,4$ mm)	100,07 99,93 100,70	0,00101	2391,80	2375,17	10000,00	51,24	0,95	48,68
K _{vpk,1}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($0,7 < \varnothing \leq 1,4$ mm)	101,23 102,78 100,62	0,00105	2447,30	2337,68	10404,42	51,66	0,95	49,08

$K_{\text{smpk},1}$	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,46 99,08 100,57	0,00101	2366,90	2341,16	10052,66	53,28	0,95	50,62
$K_{\text{smpk},2}$	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	100,36 100,69 100,56	0,00102	2420,70	2382,15	10105,25	54,84	0,95	52,10
$K_{k,1}$	Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos	100,26 99,88 100,40	0,00101	2423,90	2410,88	10013,97	52,08	0,95	49,48
$K_{k,2}$	Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos	101,50 98,26 100,65	0,00100	2404,20	2395,05	9973,39	51,24	0,95	48,68
$K_{g,1}$	Betonas su gumos priemaišomis	101,16 99,04 100,83	0,00101	2353,90	2330,12	10018,89	45,80	0,95	43,51
$K_{g,2}$	Betonas su gumos priemaišomis	101,13 101,16 100,83	0,00103	2374,50	2301,94	10230,31	43,91	0,95	41,71

Apskaičiuojamos vidutinės bandinių tankio ir gniuždomojo stiprio reikšmės. Gautos reikšmės pateikiamos 11 lentelėje.

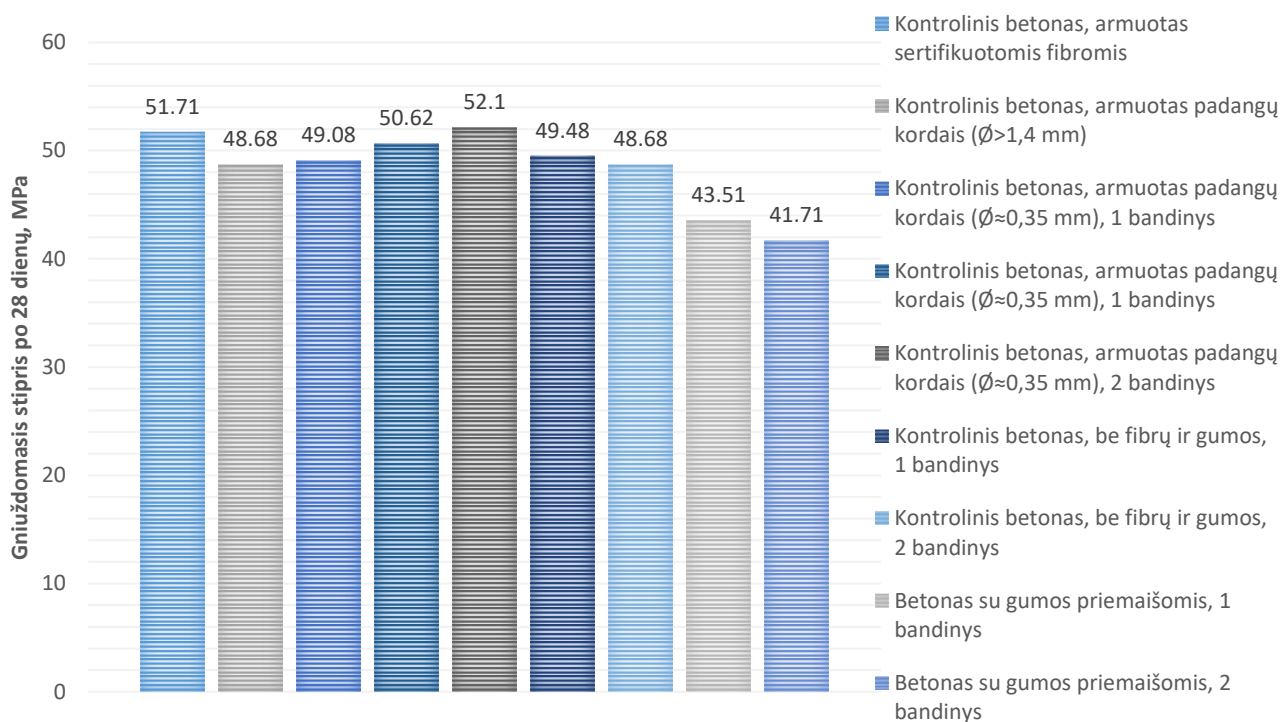
11 lentelė. Bandinių tankio ir gniuždomojo stiprio vidurkiai

Bandinio aprašymas	Vidutinis tankis ρ_{vid} , kg/m^3	Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{c,\text{vid}}$, N/mm^2
Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis	2377,16	51,71
Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing > 1,4$ mm)	2375,17	48,68
Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($0,7 < \varnothing \leq 1,4$ mm)	2337,68	49,08
Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	2361,65	51,36
Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos	2402,96	49,08
Betonas su gumos priemaišomis	2316,03	42,61

Pagal gautas vidutines tankio reikšmes, bandinių betoną galima priskirti normaliesiems betonams, kurių tankis 2000–2600 kg/m^3 . Pastebima, kad bandinių, kuriuose naudojama guma kaip dalinis smulkaus užpildo pakaitalas, vidutinis tankis gaunamas mažesnis lyginant su kontroliniu.

Mažesniam bandinių tankiui galėjo turėti įtakos mažesnis gumos dalelių svoris lyginant su smulkaus užpildo dalelių vienetiniu svoriu. Tankio pokytis nėra žymus, procentinis sumažėjimas lygus 3,6 %. Kadangi smulkintos gumos dalelių mišinyje buvo naudota 2,5 % nuo bendro betono mišinio užpildų kiekio, galima daryti prielaidą, kad didinant gumos kiekį betono mišinyje bandinių tankis, o tuo pačiu ir svoris, taip pat proporcingai mažės. Tad smulkinta guma iš perdirbamų padangų atliekų galėtų būti racionaliai naudojama siekiant sumažinti betono gaminių svorį.

Didžiausias gniuždomasis stipris gautas sertifikuotomis fibromis bei padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm) armuotuose bandiniuose. Kontroliniuose bandiniuose (be gumos ir fibrų) bei didesnio skersmens padangų kordais armuotuose bandiniuose gaunamas nežymiai (apie 2 MPa) mažesnis gniuždomasis stipris negu bandiniuose su fibromis ar padangų kordais. Nėra atlikta bandymų, kad iš turimų duomenų būtų galima teigti, jog fibros turėjo reikšmingos įtakos gniuždomojo stiprio padidėjimui.



32 pav. Bandinių gniuždomasis stipris po 28 dienų

Bandiniuose su gumos priemaisomis pastebėtas gniuždomojo stiprio sumažėjimas. Iš bandymo duomenų galima teigti, kad gniuždomasis stipris sumažėja apie 10–15 %, kai betono mišinyje naudojama guma, pakeičiant dalį smulkių užpildų.

Bandinių gniuždomojo stiprio sumažėjimą galima paaiškinti dviem priežastimis. Pirmoji – blogesnis sukibimas tarp gumos dalelių ir cemento pastos. Remiantis literatūros analize, gumos dalelės prasčiau sukimba su cemento pasta negu naudojami standartiniai akmens užpildai, todėl betone atsiranda daugiau porų ir plyšių, kurie neigiamai veikia betono gniuždomąjį stiprumą. Antroji – mažesnis gumos dalelių gniuždomasis stipris lyginant su užpildų stiprumu. Vienas iš pagrindinių veiksnių, lemiančių betono stiprumą, yra naudojamo užpildo stiprumas. Kadangi gumos dalelės yra silpnesnės negu smulkaus užpildo (smėlio) dalelės, betono bandiniai praranda dalį gniuždomojo stiprio, kai betono mišiniuose dalis užpildų yra pakeičiama smulkinta guma. Šios priežastys leidžia daryti prielaidą, kad didesnis gumos kiekis betono mišiniuose dar labiau sumažintų bandinių gniuždomuosius stiprius. Todėl svarbu pasirinkti racionalų gumos kiekį siekiant efektyviai pritaikyti guma modifikuoto betono panaudojimą betono gaminiuose.

3.3. Lenkiamasis stipris

Triašio lenkimo bandymo tempiamojo stiprio nustatymas buvo atliktas ir užfiksuoti stipriai, kuomet įpjovos išplatėjimas $CMOD$ buvo 0,5, 1,5, 2,5 bei 3,5 mm.

12 lentelė. Triašio lenkimo bandymo rezultatai

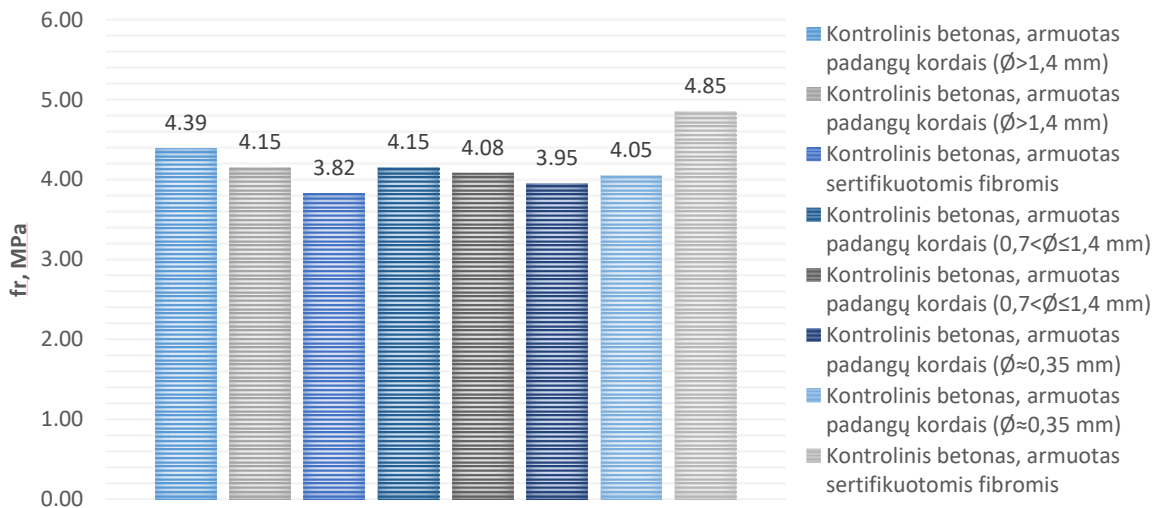
Bandinio žymuo	Bandinio betono sudėties aprašymas	Bandomos prizmės matmenys, mm		Lenkimo jėga, prie kurios atsiveria plyšiai, MPa	Liekamasis tempimo stipris $f_{R,i}$ MPa, kai įpjovos praplatėjimo reikšmė $CMOD_i$			
		plotis b	aukštis iki įpjovos h_{sp}		$CMOD_1=0,5$ mm	$CMOD_2=1,5$ mm	$CMOD_3=2,5$ mm	$CMOD_4=3,5$ mm
S _{stpk,1}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing > 1,4$ mm)	101,00	930	4,39	2,59	2,20	1,76	1,72
S _{stpk,2}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing > 1,4$ mm)	100,40	930	4,15	5,78	5,47	5,00	5,05
S _{kf,1}	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis	97,80	920	3,82	4,69	4,83	4,48	4,35
S _{vpk,1}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($0,7 < \varnothing \leq 1,4$ mm)	101,00	910	4,15	2,95	3,92	3,85	4,26
S _{vpk,2}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($0,7 < \varnothing \leq 1,4$ mm)	102,80	915	4,08	5,20	5,99	4,83	4,68
S _{smpk,1}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	99,76	925	3,95	5,91	5,28	4,21	3,41
S _{smpk,2}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,46	921	4,05	5,33	4,74	4,05	3,15
SS _{smpk/k,1}	Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	99,83	925	4,77	3,27	2,57	1,52	1,39
SS _{smpk/k,2}	Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,58	920	4,25	4,78	3,60	3,19	2,31
SS _{smpk/g,1}	Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,64	920	4,05	2,70	3,54	2,56	2,00
SS _{smpk/g,2}	Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	100,45	950	3,95	5,67	4,54	3,49	2,54

S _{g,1}	Betonas su gumos priemaišomis	101,00	948	4,29	-	-	-	-
S _{kf,2}	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis	100,40	951	4,85	3,30	2,04	1,63	1,30

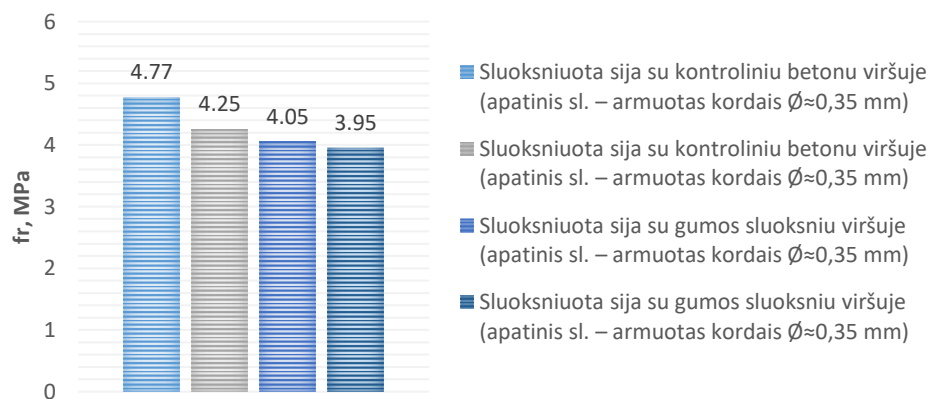
Bandinių lenkiamasis stipris priklauso nuo fibrų išsibarstymo bandinyje. Tai ypač pastebima bandiniuose, kuriuose naudotos stambiausios fibros ($2,1 \text{ mm} \geq \varnothing > 1,4 \text{ mm}$). Dėl didesnio vienetinio svorio, bandiniuose naudojamas mažesnis fibrų skaičius lyginant su mažesnio skersmens padangų kordais ar sertifikuotomis fibromis. Todėl naudojant stambesnes fibras bandiniuose mažėja tikimybė, kad fibros patenka į tempiamąją zoną lenkimo metu, ir suvaržo pleišėjimą.

Lenkiant dvisluoksnes sijas nepastebėta, kad sluoksniai turėtų akivaizdžią įtaką lenkiamajam stipriui. Galima daryti išvadą, kad išbandytose sluoksnuotose prizmėse sukibimas tarp sluoksnių yra pakankamas ir neturi neigiamos įtakos lenkiamajam stipriui.

Lenkiamojo stiprio atveju, visų bandinių iš kontrolinio betono plyšių atsivėrimo riba beveik vienoda. Tačiau pastebėta, kad gumos turinčio betono dvisluoksnėse sijose tempiamasis stipris, prie kurio atsiveria plyšiai, neženkliai sumažėja. Pagal eksperimentinių tyrimų rezultatus šis sumažėjimas lygus apie 5 %.

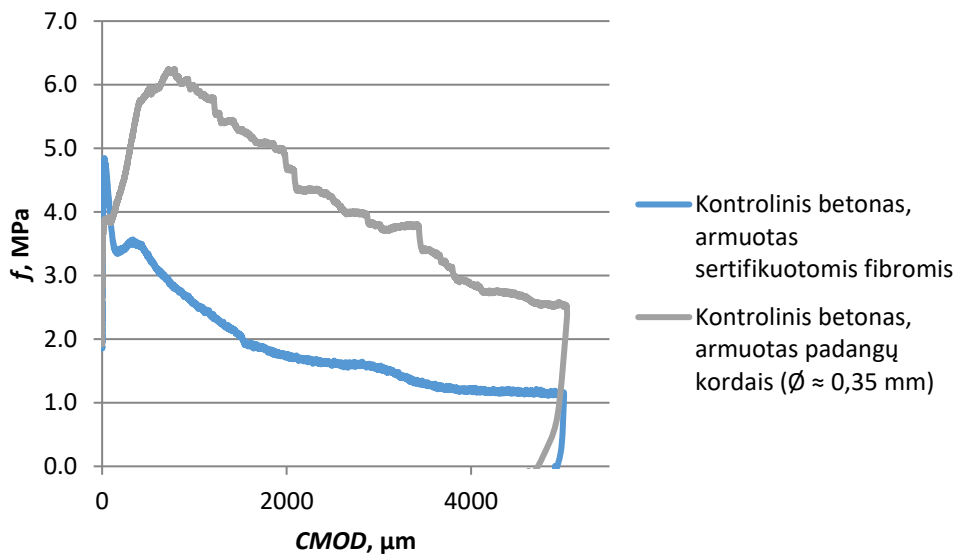


33 pav. Tempiamasis stipris, prie kurio atsiveria plyšiai fibromis ir kordais armuotos sijos



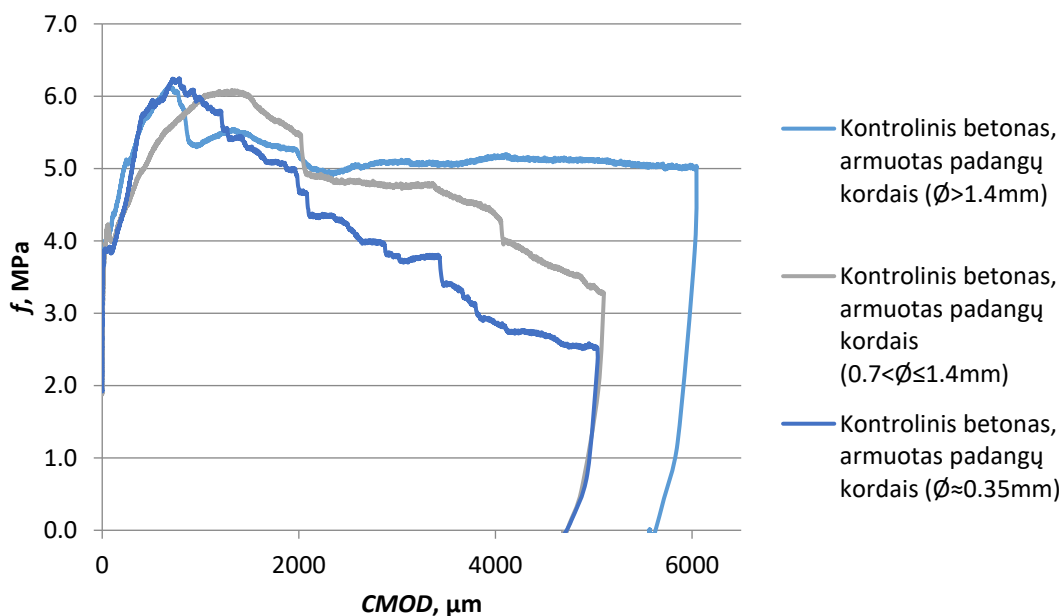
34 pav. Tempiamasis stipris, prie kurio atsiveria plyšiai sluoksnuotos sijos

Toliau pateikiami smulkiais plieniniais padangų kordais (skersmuo $\varnothing = 0,35$ mm) ir sertifikuotomis fibromis armuotų sijų triašio lenkimo bandymo apkrovos ir CMOD priklausomybės kreivių pavyzdžiai.



35 pav. Liekamojo tempiamojo stiprio ir CMOD priklausomybės kreivės (skirtingo skersmens kordais armuotos sijos)

Lyginant skirtingo skersmens kordus, pastebima, kad pasiekiamas ganėtinai panašus tempiamasis stipris lenkiant visas sijas, nepriklausimai nuo naudoto kordų stambumo betono mišiniuose.



36 pav. Liekamojo tempiamojo stiprio ir CMOD priklausomybės kreivės (sertifikuotomis fibromis ir kordais armuotos sijos)

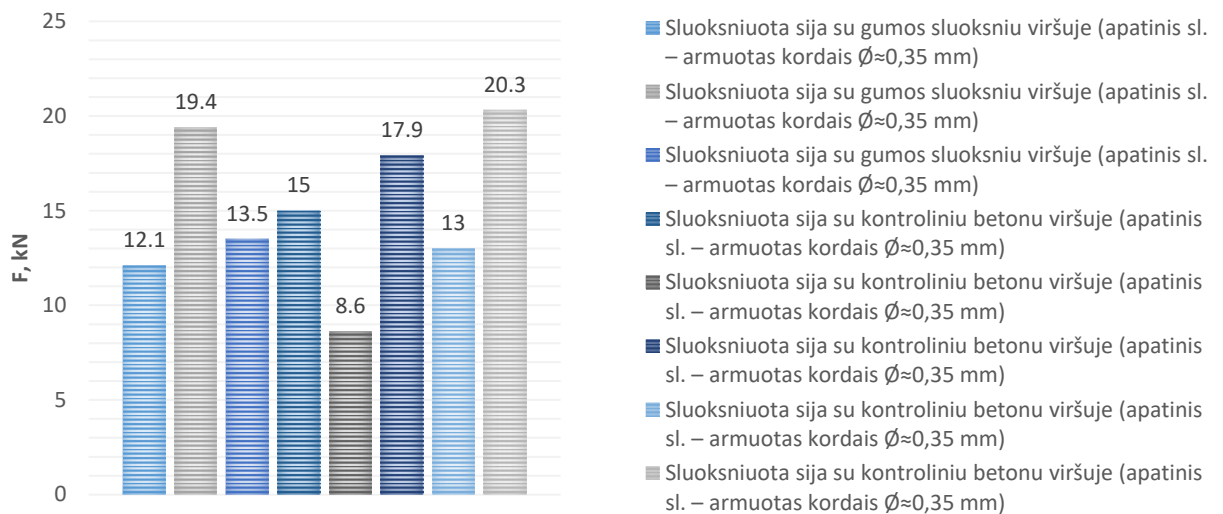
3.4. Skeliamasis stipris

Skėlimo bandymas atliktas dv sluoksnėms sijos, apkraunant sluoksnių kontakto zoną išilgai sluoksnių bei centruojant apkrovą sluoksnių viduryje.

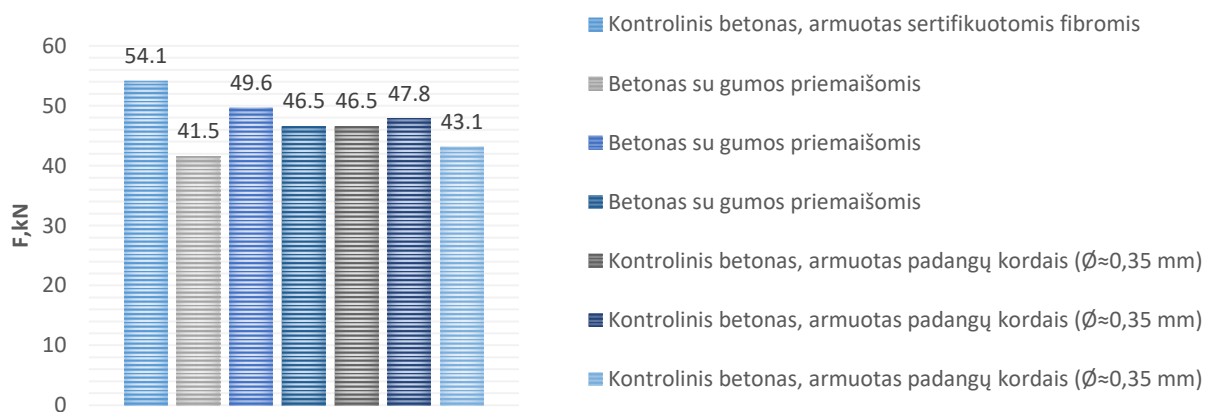
13 lentelė. Tamprumo modulio nustatymo rezultatai

Bandinio žymuo	Bandinio betono sudėties aprašymas	Matmenys lx , mm	Irimo plokštumos plotas S , mm ²	Skėlimo jėga, prie kurios bandinys suyra, kN	Stipris skeliant T , MPa
Skėlimas per sluoksnių sukibimo vietą					
SS _{smpk/g,1}	Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,82 100,91	10274,66	12,1	0,83
SS _{smpk/g,1}	Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,91 102,16	10411,13	19,4	1,32
SS _{smpk/g,2}	Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	99,96 100,82	10077,97	13,5	0,95
SS _{smpk/g,2}	Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,09 101,32	10242,44	15,0	1,04
SS _{smpk/k,1}	Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	98,90 101,01	9989,89	8,6	0,61
SS _{smpk/k,1}	Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,19 101,31	10251,56	17,9	1,23
SS _{smpk/k,2}	Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	100,92 99,66	10057,69	13,0	0,91
SS _{smpk/k,2}	Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0,35$ mm)	100,02 98,99	9900,98	20,3	1,45
Skėlimas per atskirų sluoksnių vidurį					
S _{kf,1}	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis	101,03 99,16	10232,28	54,1	3,82
SS _{smpk/g,1}	Betonas su gumos priemaišomis	101,38 100,93	10274,65	41,5	2,87
SS _{smpk/g,2}	Betonas su gumos priemaišomis	101,82 100,91	10411,12	49,6	3,41
SS _{smpk/g,2}	Betonas su gumos priemaišomis	101,91 102,16	10274,65	46,5	3,16
SS _{smpk/k,1}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,82 100,91	10411,12	46,5	3,20
SS _{smpk/k,2}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	101,91 102,16	10057,68	47,8	3,25

SS _{smpk/k,2}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais (Ø ≈ 0,35 mm)	100,92 99,66	10232,28	43,1	3,03
------------------------	---	-----------------	----------	------	------



37 pav. Skėlimo per sluoksnių kontakto zoną rezultatai



38 pav. Skėlimo per sluoksnių vidurį rezultatai

Kaip ir tikėtasi, sukibimas tarp sluoksniuotos prizmės sluoksnių gaunamas mažesnis negu sluoksnių viduryje.

Sukibimas tarp sluoksnių pastabėtas beveik vienodas sluoksniuotose sijose su gumos turinčio betono sluoksniu bei sijose, kuriose viršutinis sluoksnis – kontrolinis betonas. Tai leidžia daryti išvadą, kad guma modifikuotas betonas neturi žymios įtakos betono gaminio paviršiaus sukibimui.

3.5. Fibrų tempiamasis stipris

Tempiamasis stipris nustatomas įvairaus skersmens padangų vieloms ir kordams, naudotiems betono mišiniuose. Naudotų sertifikuotų plieninių fibrų tempiamasis stipris priimamas pagal deklaruojamas produkto specifikacijas, t. y. ne mažiau 1200 N/mm².

14 lentelė. Tempimo bandymo rezultatai

Bandinio nr.	Kordo skerspj. skersmuo d_0 , mm	Pradinis bandinio skerspj. plotas A_0 , mm ²	Pradinis ilgis L_0 , mm	Pailgėjimas ΔL , mm	Jėga F_1 , kg	Jėga F_2 , N	Takumo riba σ , MPa	Santykinė deformacija δ , %
1	0,32	0,080	8,0	3	17	166,6	2072,552	37,50
2	0,27	0,057	8,8	5	17	166,6	2911,239	56,82
$\varnothing \approx 0,35$ mm kordų vidurkis:							2491,895	47,16
3	0,96	0,723	9,0	5	135	1323,0	1828,722	55,56
4	0,86	0,581	9,0	5	127	1244,6	2143,696	55,56
$0,7 < \varnothing < 1,40$ mm kordų vidurkis:							1986,209	55,56
5	1,78	2,487	6,5	3	475	4655,0	1871,587	46,15
$\varnothing > 1,40$ mm kordų vidurkis:							1871,587	46,15

Atlikus bandymą pastebėta, kad mažesnio skersmens kordai yra atsparesni tempimui negu sertifikuoti plieno plaušai ar didesnio skersmens padangų kordai. Tam įtakos gali turėti mažesnis plonesnių kordų paviršiaus plotas. Kuo mažesnis plotas – tuo mažiau paviršiaus defektų, turinčių įtakos plieno gaminių stiprumui.

Pagal bandymo rezultatus, galima teigti, kad plieniniai padangų kordai yra ne mažesnio tempiamojo stiprumo negu sertifikuotos fibros. Atsižvelgiant į tempiamąjį stiprį, padangų kordai gali būti racionaliai naudojami kaip sertifikuotų fibrų pakaitalas.

3.6. Tamprumo modulio nustatymas

Tamprumo modulis nustatytas dviem prizmėms. Viena prizmė pagaminta iš kontrolinio betono, armuoto sertifikuotomis fibromis. Antra – iš gumos turinčio betono mišinio. Tamprumo modulis matuojamas apkraunant sijas gniuždymo apkrova, apskaičiuota pagal 11 formulę. Guma modifikuoto betono sija apkraunama 10,89 kN apkrova, o kontrolinė prizmė – 13,2 kN.

15 lentelė. Tamprumo modulio nustatymo rezultatai

Bandinio numeris	Bandinio sudėties aprašymas	Matmenys $a \times b$, mm	Gniuždymo jėga, prie kurios bandomas tamprumo modulis, MPa	Išmatuotas betono tamprumo modulis E , MPa
$S_{kf,1}$	Kontrolinis betonas, armuotas sertifikuotomis fibromis	100,99 99,61	13,20	39882,2
$S_{g,1}$	Betonas su gumos priemaišomis	101,27 102,72	10,89	34039,6

Literatūroje įprasto betono tamprumo modulis nurodomas lygus 30–40 GPa. Bandymo metu gautos reikšmės patenka į šio intervalo ribas.

Bandymo metu didesnis tamprumo modulis gautas bandinyje be gumos priemaišų. Bandinio, turinčio padangų gumos atliekų, tamprumo modulis apie 15 % mažesnis negu įprasto betono bandinio. Atlikta per mažai bandymų, kad būtų galima konkrečiai įvardinti gumos poveikį betono tamprumo moduliui.

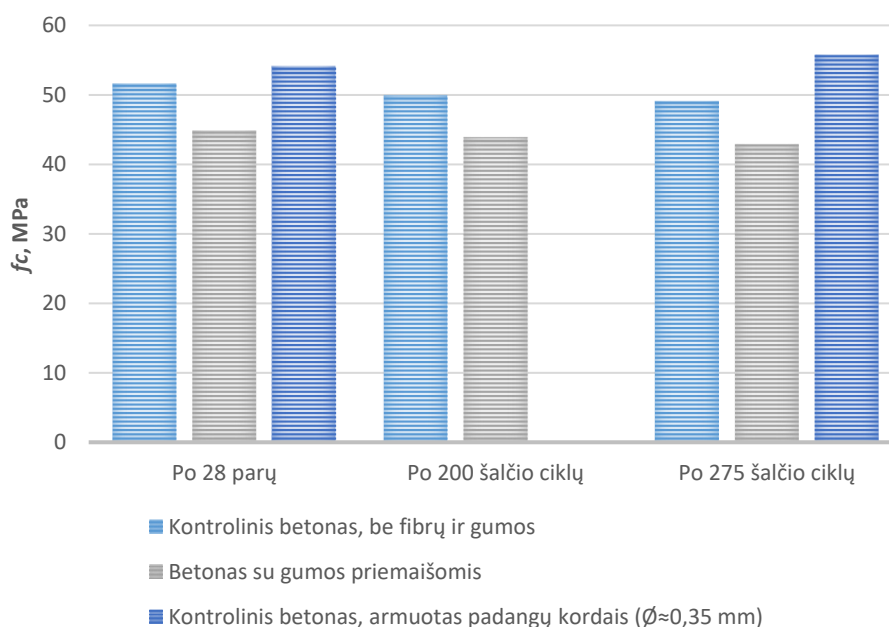
3.7. Atsparumo šalčiui bandymas

16 lentelė. Atsparumo šalčiui bandymo rezultatai po 200 ir 275 šalčio ciklų

Bandinio numeris	Bandinio sudėties aprašymas	Matmenys $a_0 \times b_0 \times h_0$ prieš užšaldymo ir atšilimo ciklus, mm	Bandinio masė prieš užšaldymo ir atšilimo ciklus m_0 , g	Matmenys $a_1 \times b_1 \times h_1$ po užšaldymo ir atšilimo ciklų, mm	Bandinio masė po užšaldymo ir atšilimo ciklų m_1 , g	Gniuždomo paviršiaus plotas po užšaldymo ir atšilimo ciklų A_0 , mm ²	Gniuždymo jėga F , kN	Bandinio matmenų pataisos koeficientas β	Gniuždomasis stipris po šalčio ciklų f_c , N/mm ²
Po 200 užšalimo – atšilimo ciklų									
K _{k,3}	Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos	100,99 99,61 100,84	2430,9	100,75 99,79 100,84	2432,6	10053,8	501,9	0,95	49,92
K _{g,2}	Betonas su gumos priemaišomis	100,30 100,60 100,38	2326,8	101,35 98,88 101,07	2331,3	10021,5	440,0	0,95	43,91
Po 275 užšalimo – atšilimo ciklų									
K _{k,4}	Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos	101,27 102,72 100,55	2412,5	101,27 102,61 100,34	2413,2	10391,3	471,1	0,95	49,12
K _{g,3}	Betonas su gumos priemaišomis	101,38 101,46 100,40	2397,6	101,38 101,53 100,70	2409,9	10293,1	438,0	0,95	42,55
K _{g,4}	Betonas su gumos priemaišomis	100,44 100,88 102,41	2412,9	101,44 102,23 100,21	2413,2	10370,2	430,9	0,95	41,55
K _{g,5}	Betonas su gumos priemaišomis	99,95 98,35 100,25	2340,7	98,58 98,32 101,3	2354,1	9692,4	412,6	0,95	42,57
K _{smpk,4}	Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	100,23 100,67 100,65	2442,7	100,31 101,38 101,25	2447,0	10169,4	566,6	0,95	55,72

17 lentelė. Gniuždomojo stiprio sumažėjimas po šalčio ciklų

Bandinio sudėties aprašymas	Vid. gniuždomasis stipris f_c , N/mm ²		Gniuždomojo stiprio pokytis, %
	Po 28 parų	Po šalčio ciklų poveikio	
Po 200 užšalimo – atšilimo ciklų			
Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos	51,66	49,92	-3,4
Betonas su gumos priemaišomis	44,86	43,91	-2,1
Po 275 užšalimo – atšilimo ciklų			
Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos	51,66	49,12	-4,9
Betonas su gumos priemaišomis	44,86	42,89	-4,4
Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0,35$ mm)	54,06	55,72	+3,1



39 pav. Gniuždomojo stiprio rezultatai po šalčio ciklų poveikio

Pastebėta, kad visi bandiniai atlaikė šalčio ciklus, t. y. procentinis gniuždomojo stiprio sumažėjimas lyginant su gniuždomojo stiprio vertėmis prieš užšalimo – atšilimo ciklų poveikį yra mažesnis negu 5 %. Tačiau pastebėta, kad gumos turinčio betono gniuždomojo stiprio nuostoliai yra mažesni negu kontrolinio betono. Tai leidžia daryti išvadą, kad guma modifikuotą betoną racionalu naudoti šalčio ciklų veikiamose aplinkose.

Išvados

1. Vertinant gniuždomąjį betono stiprį, padangų perdirbimo atliekų guma turi neigiamą poveikį. Betono mišiniuose pakeičiant smulkų užpildą 2,5 % (nuo bendros užpildų masės) guma, gniuždomasis stipris mažėja 13,6 %. Naudojant didesnę kiekį gumos prognozuojamas didesnis procentinis betono gniuždomojo stiprio sumažėjimas.
2. Gumos panaudojimas betono mišiniuose neturėjo žymios įtakos betono lenkiamajam stiprumui. Tyrimais nustatyta, kad lenkimo apkrovų veikiamų gumos turinčio betono ir kontrolinio betono bandinių plyšių atsivėrimo ribos skiriasi mažiau negu 5 %.
3. Iš lenkimo bandymo rezultatų matyti, kad padangų atliekų plieniniai kordai ir vielos gali būti racionaliai naudojami kaip plieniniai plaušai dispersiniam betono ar gelžbetonio armavimui. Šiais kordais ir vielomis armuotas betonas visais tirtais atvejais pasiekia kontrolinio betono, disperisiškai armuoto sertifikuotu plieno plaušu, lenkiamąjį stiprį. Priklausomai nuo naudotų kordų skersmens, bandinio lenkiamasis stipris pasiekiamas 5,1–6,2 MPa, o naudojant sertifikuotas fibras, lenkiamojo stiprio vidutinė vertė yra 4,7 MPa, t. y. padangų kordais ir vielomis armuotos prizmės pasižymėjo 8–25 % didesniu lenkiamuoju stipriu.
4. Gumos įtaka betono skeliamajam stiprumui yra nežymi. Bandinių skeliamasis stiprumas sumažėja mažiau negu 4%, kai betono mišiniuose yra naudojama guma, todėl galima teigti, kad tirtais atvejais guma neturėjo žymios įtakos betono skeliamajam stipriui.
5. Smulkintos gumos naudojimas betono elementuose sumažina betono tamprumo modulį. Iš tamprumo bandymo nustatymo rezultatų matyti, kad padangų gumos panaudojimas betono mišiniuose sumažina tamprumo modulį 15 % lyginant su kontrolinio betono tamprumo modulio reikšmėmis.
6. Atsižvelgiant į naudoto sertifikuoto plieninio plaušo savybių deklaraciją, plieniniai padangų kordai ir vielos yra ne mažesnio tempiamojo stiprumo negu sertifikuotos fibros. Pagal deklaruojamas sertifikuotų fibrų stiprumo vertes, plieniniai plaušai yra ne mažesnio kaip 1200 MPa stiprumo. Priklausomai nuo padangų kordų ir vielų skersmens, tempiamasis stiprumas svyruoja nuo 1871 iki 2491 MPa. Atsižvelgiant į tempiamąjį stiprį, padangų kordai gali būti racionaliai naudojami kaip sertifikuotų fibrų pakaitalas.
7. Gumos priemaišų naudojimas betono mišiniuose pagerina betono gaminių atsparumą šalčiui. Lyginant su kontrolinio betono bandiniais, gumos turinčių bandinių gniuždomojo stiprio sumažėjimas po šalčio ciklų poveikio lygus 2,1 % po 200 ciklų bei 4,4 % po 275 ciklų. Tuo tarpu kontrolinių betono bandinių gniuždomasis stipris atitinkamai sumažėjo 3,4 % ir 4,9 %.

Literatūros sąrašas

1. CZAJCZYŃSKA, D., CZAJKA, K., KRZYŻYŃSKA, R. and JOUHARA, H. Waste tyre pyrolysis – Impact of the process and its products on the environment. *Thermal Science and Engineering Progress* [interaktyvus]. 2020, **20** [žiūrėta 2020-09-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100690>
2. SATHISKUMARA, C. and KARTHIKEYANB, S. Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products – a review. *Sustainable Materials and Technologies* [interaktyvus]. 2020, **22** [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00125>
3. STRUKAR, K., ŠIPOŠ, T. K., MILIČEVIĆ, I. and ROBERT BUŠIĆ, R. Potential use of rubber as aggregate in structural reinforced concrete element. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2019, **188**, 452-468 [žiūrėta 2020-02-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.031>
4. ZÁLESKÁ, M., PAVLÍK, Z., CÍTEK, D., JANKOVSKY, O. and PAVLÍKOVÁ, M. Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, **225**, 709-722 [žiūrėta 2020-02-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.168>
5. TORRETTA, V., RADA, E. C., RAGAZZI, M., TRULLI, E., ISTRATE, I. A. and CIOCA, L. I. Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste Management* [interaktyvus]. 2015, **45**, 152-160 [žiūrėta 2020-04-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>
6. *SOLAS: Trade of Motor Mechanic - Phase 2 Course Notes*. © SOLAS 2013 [žiūrėta 2020-10-23]. Prieiga per: https://local.college.ie/Content/APPRENTICE/liu/motor_notes/Ver_2/m1_u1_v2.pdf
7. SHAKYA, P. R., SHRESTHA, P., TAMRAKAR, C. S. and BHATTARAI, P. K. Studies on potential emission of hazardous gases due to uncontrolled open-air burning of waste vehicle tyres and their possible impacts on the environment. *Atmospheric Environment* [interaktyvus]. 2008, **42**, 6555-6559 [žiūrėta 2020-06-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.013>
8. SIDDIKA, A., AL MAMUN, A., ALYOUSEF, A., AMRAN, Y. H. M., ASLANI, F., and ALABDULJABBAR, H. Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2019, **224**, 711-731 [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>
9. MOHAJERANI, A., BURNETT, L., SMITH, J. V., MARKOVSKI, S., RODWELL, G., RAHMAN, T., KURMUS, H., MIRZABABAEI, M., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S. and MAGHOOL, F.D. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation & Recycling* [interaktyvus]. 2020, **155** [žiūrėta 2020-06-02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>

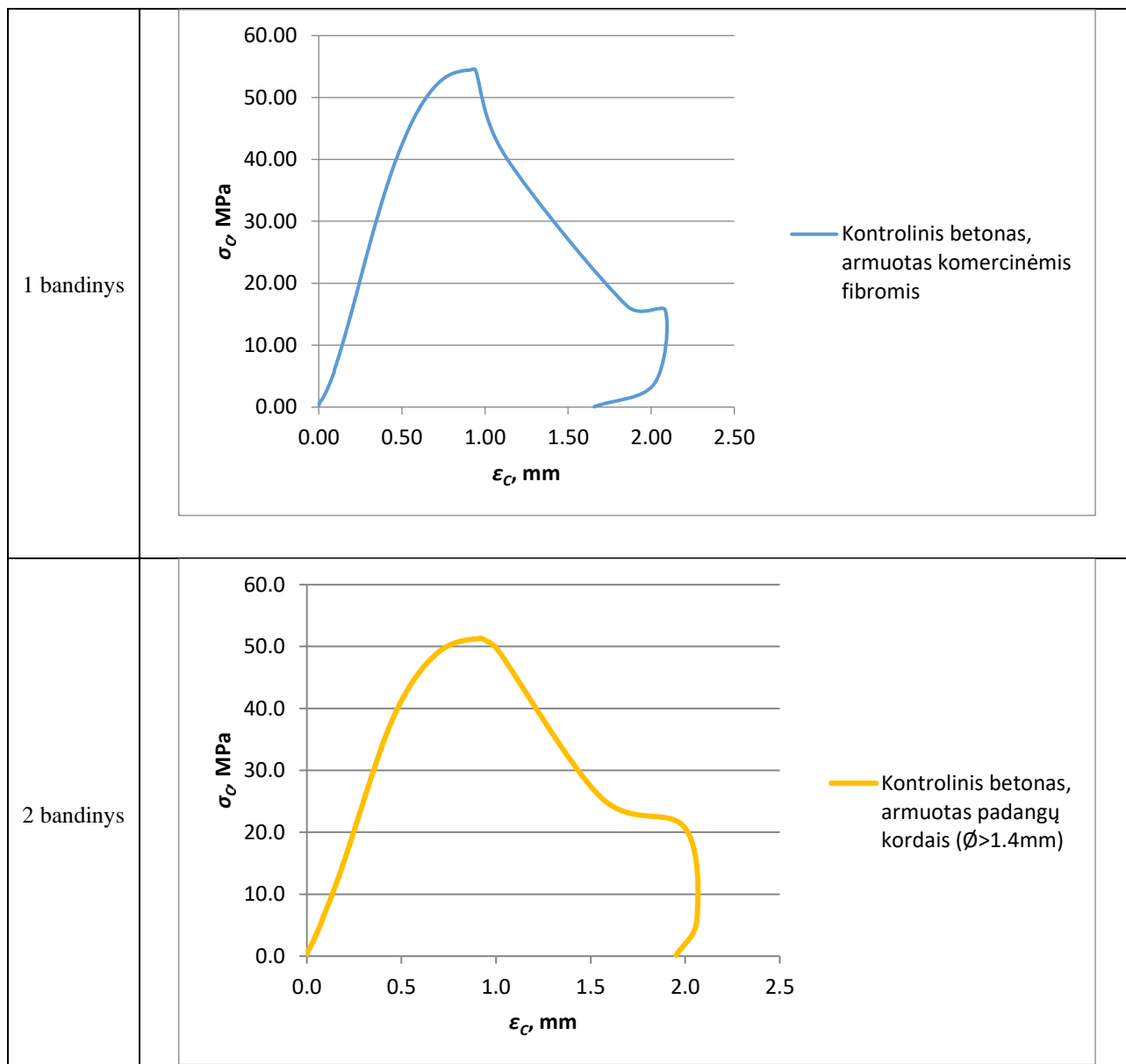
10. U.S. TIRE MANUFACTURERS ASSOCIATION. *The national trade association for tire manufacturers that make tires in the U.S.* [interaktyvus] [žiūrėta 2020-04-02]. Prieiga per: <https://www.ustires.org/>
11. GIRSKAS, G., NAGROCKIENĖ, D. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, **140**, 36-42 [žiūrėta 2020-02-03]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.107>
12. *INTEGRATED WASTE MANAGEMENT BOARD: Designing Building Products Made With Recycled Tires* © California Integrated Waste Management Board.
13. ELDAN RECYCLING. *At the cutting edge of recycling equipment* [interaktyvus] [žiūrėta 2020-03-12]. Prieiga per: <http://www.eldan-recycling.com>
14. MEDINA, N. F., MEDINA D.F, HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. and NAVACERRADA, M. A. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibers from tyre recycling. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, **144**, 563-573 [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>
15. KELPŠA, Šarūnas. *Plieno plaušo įtaka lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimui ir standumui: daktaro disertacija* [interaktyvus]. Kauno Technologijos Universitetas, 2017 [žiūrėta 2020-09-18]. Prieiga per: <https://talpykla.elaba.lt/>
16. *Pastatų konstruktoriaus ir statybininko žinynas*. Kaunas: Naujasis lankas, 2009, 549-552. ISBN 978-9955-03-565-07.
17. TAMULEVIČIUS, Sigitas ir Dalius JUCIUS. *Medžiagų mokslas*. Kaunas: Vitea Litera, 2007. ISBN 978-9955-686-30-9
18. GERGES, N. N., ISSA, C. A. and FAWAZ, S. A. Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties. *Case Studies in Construction Materials* [interaktyvus]. 2018, **9** [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00184>
19. GUPTA, T., CHAUDHARY, S. and SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2014, **73**, 562-574 [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>
20. BISHT, K. and RAMANA, P.V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, **155**, 811-817 [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
21. LI, Y. and LI, Y. Experimental study on performance of rubber particle and steel fiber composite toughening concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, **146**, 267-275 [žiūrėta 2020-03-11]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.100>
22. HERNANDEZ-OLIVARES, F. and BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research* [interaktyvus]. 2004, **34**, 109-117 [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00253-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00253-9)
23. MARQUES, A. M., CORREIA, J. R. and DE BRITO, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire Safety Journal*

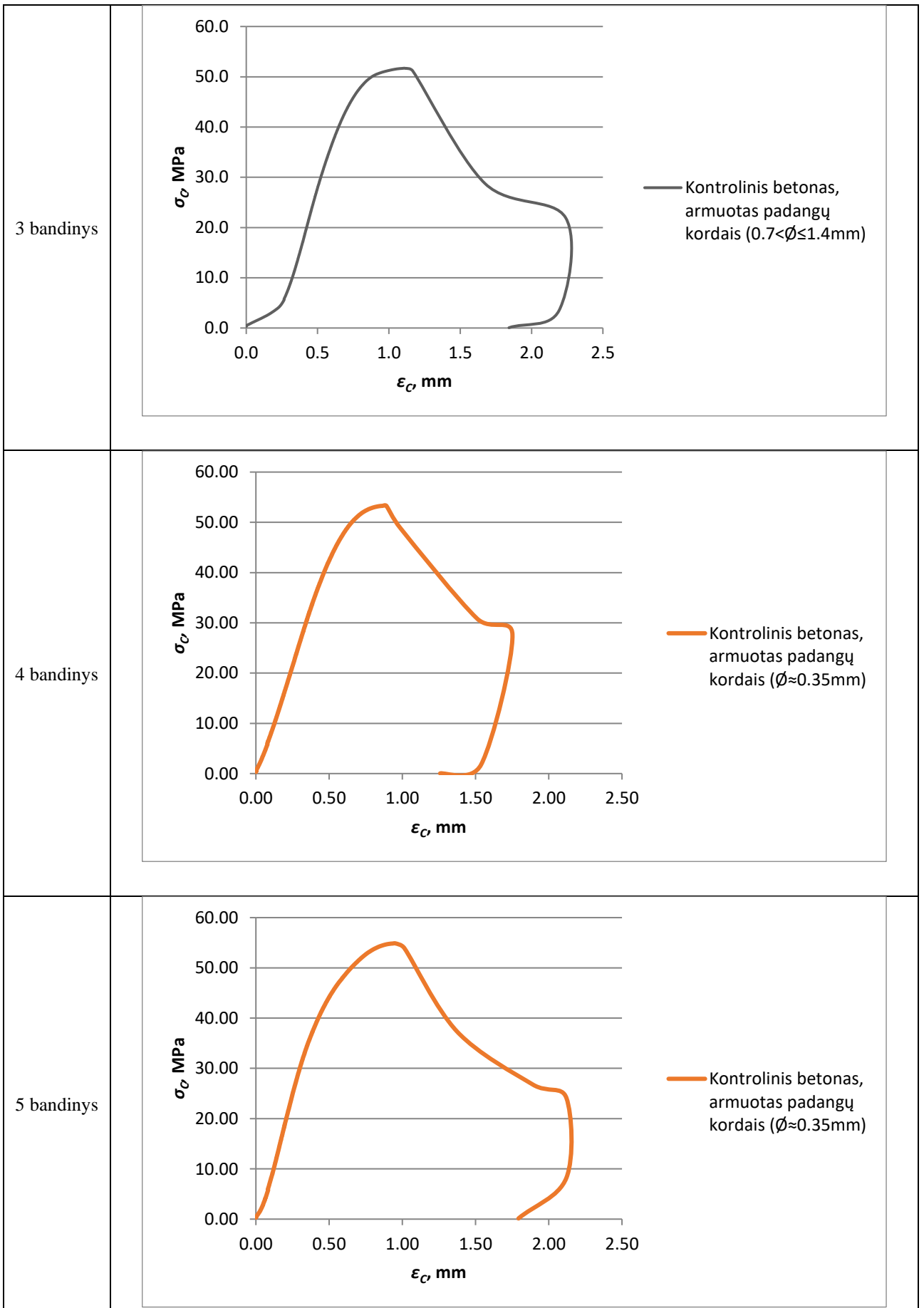
- [interaktyvus]. 2013, **58**, 49-57 [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.02.002>
24. SKRIPKIŪNAS, G. ir GRINYS, A. Betono su elastingu priedu iš gumos atliekų atsparumas ciklinių apkrovų poveikiui. *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* [interaktyvus]. 2009, **1(4)**, 172-182 [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/skt.2009.21>
 25. GONEN, T. Freezing-thawing and impact resistance of concretes containing waste crumb rubbers. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, **177**, 436-442 [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.105>
 26. JING, LV., ZHOU T., QIANG, D. and LI, K. Experimental and analytical study on uniaxial compressive fatigue behavior of self-compacting rubber lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, **237** [žiūrėta 2020-05-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117623>
 27. ISMAIL, M. K. and HASSAN, A. A. An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2017, **145**, 97-108 [žiūrėta 2020-05-18]. Prieiga per:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.018>
 28. XIE, J., ZHENG, Y., GUO, Y., OU, R., XIE, Z. and HUANG, L. Effects of crumb rubber aggregate on the static and fatigue performance of reinforced concrete slabs. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2019, **228** [žiūrėta 2020-04-02]. Prieiga per:
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111371>
 29. KAKLAUSKAS, Gintaris, Darius BAČINSKAS, Viktor GRIBNIAK, Ronaldas JAKUBOVSKIS, Darius ULBINAS, Eugenijus GUDONIS, Adas MEŠKĖNAS, Edgaras TIMINSKAS ir Aleksandr SOKOLOV. *Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos*. Vilnius: Technika, 2012. ISBN 978-609-457-349-1.
 30. ABRISHAMI, H. and MITCHELL, D. Influence of steel fibres on tension stiffening. *ACI Structural Journal*. 1997, **94**, 769-776.
 31. NAAMAN, A. E. High performance fiber reinforced cement composites. *High performance construction materials. Science and applications. Engineering materials for technological needs*. 2008, **1**, 91-153.
 32. NAAMAN, A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003, **1(3)**, 241–252.
 33. ULBINAS, Darius. *Plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišetumo ir standumo analizė: daktaro disertacija* [interaktyvus]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012 [žiūrėta 2020-09-18]. Prieiga per: <https://talpykla.elaba.lt/>
 34. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-3:2009], *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
 35. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [EN 14651:2005+A1:2007], *Betono su metaliniu pluoštu bandymo metodas. Tempiamojo stiprio lenkiant matavimas (porcingumo riba (LOP), liekamasis stipris)*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.

36. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1338:2003+AC:2006], *Betoninės grindinio trinkelės. Reikalavimai ir bandymo metodai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
37. MIKUCKIS, Feliksas. *Medžiagų atsparumas. Metodiniai patarimai*. Kaunas: Ardiva, 2008. ISBN 978-9955-896-36-4.
38. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST L 1428.17:2005], *Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
39. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 15630-1:2019], *Plienas betonui armuoti ir įtempti. Bandymo metodai. 1 dalis. Armatūriniai strypai, virbai ir viela*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.

1 Priedas. Gniuždymo įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivės

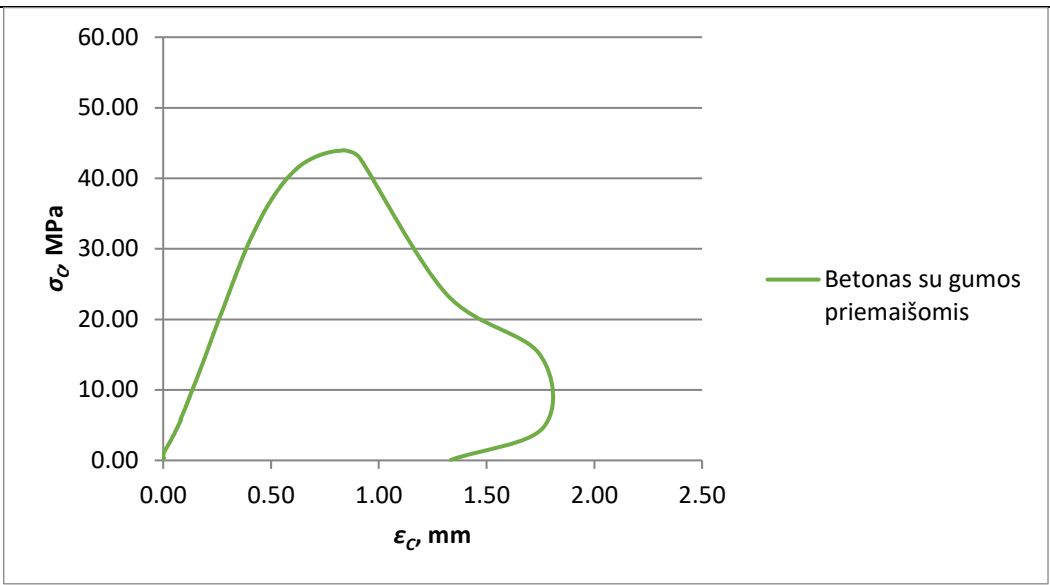
Toliau pateikiamos kontrolinio, guma modifikuoto bei fibromis armuoto betono bandinių gniuždymo bandymo įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivės.





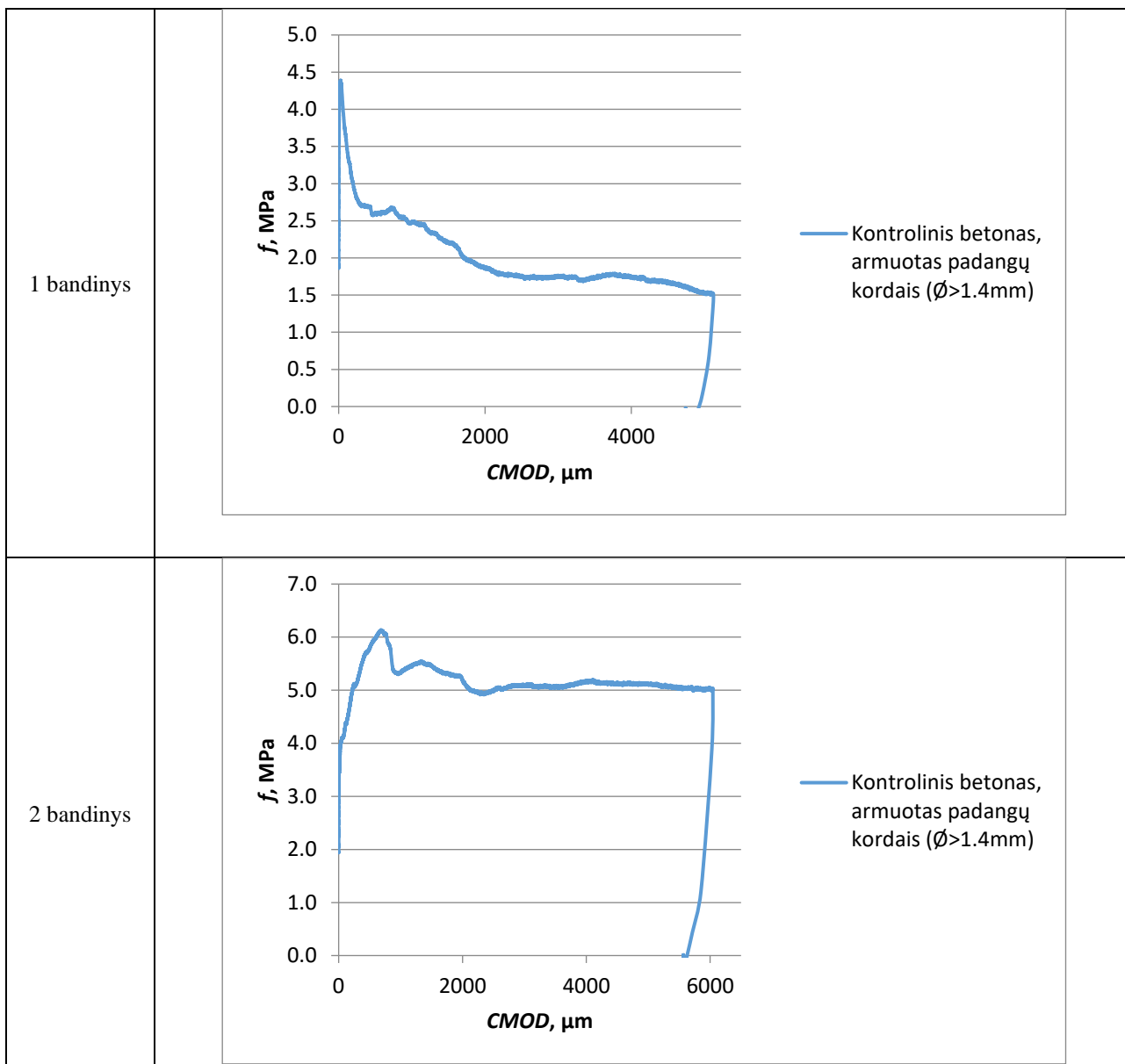
6 bandinys	<p>Axis Title</p> <p>ε_C mm</p> <p>— Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos</p>
7 bandinys	<p>σ_C MPa</p> <p>ε_C mm</p> <p>— Kontrolinis betonas, be fibrų ir gumos</p>
8 bandinys	<p>σ_C MPa</p> <p>ε_C mm</p> <p>— Betonas su gumos priemaišomis</p>

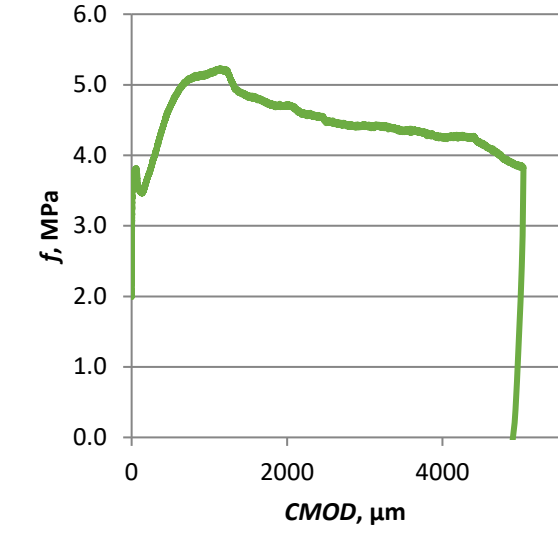
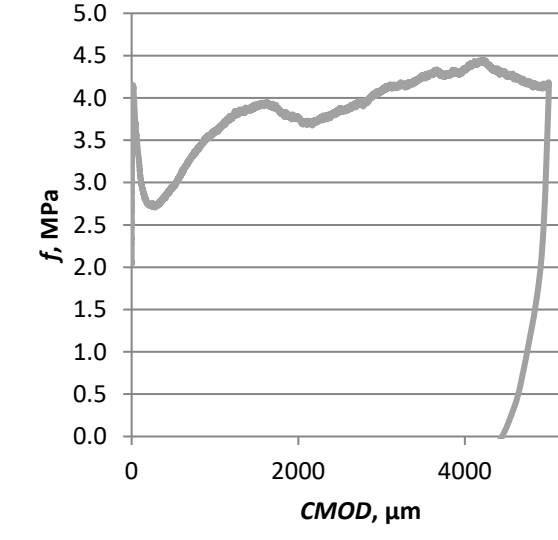
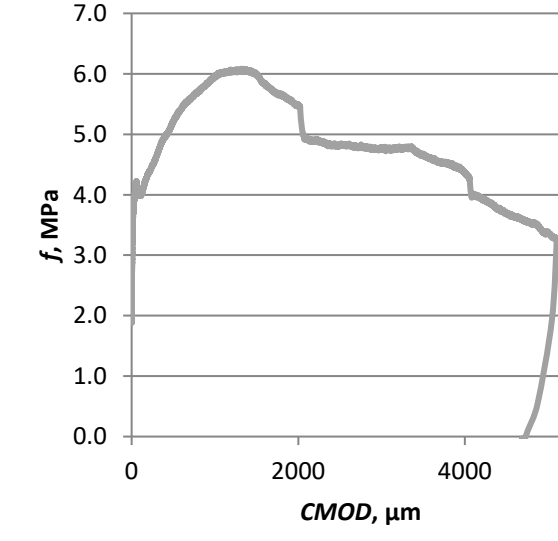
9 bandinys

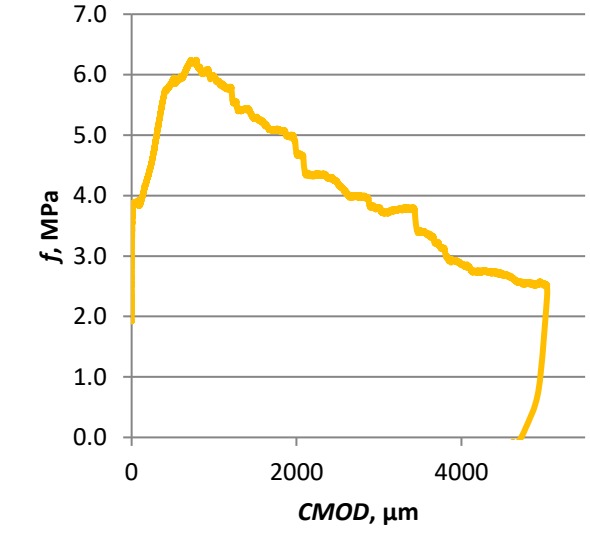
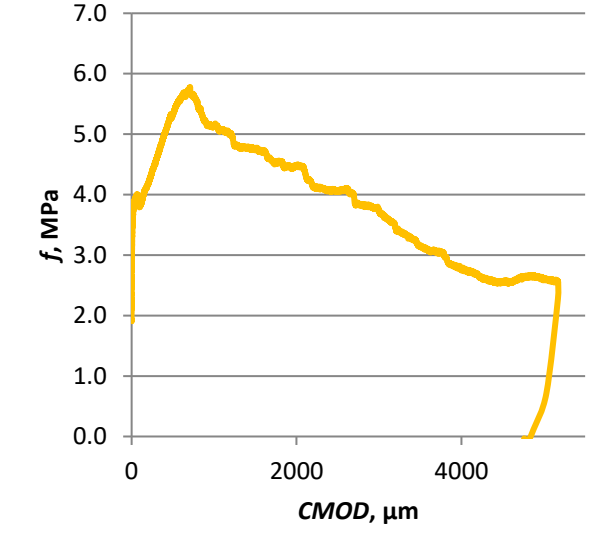
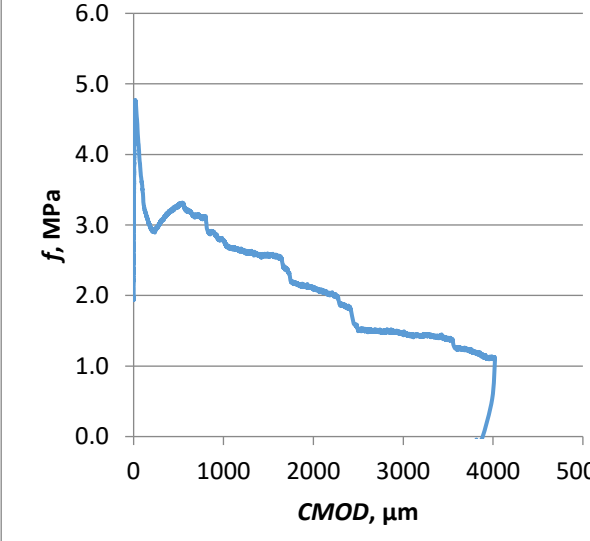


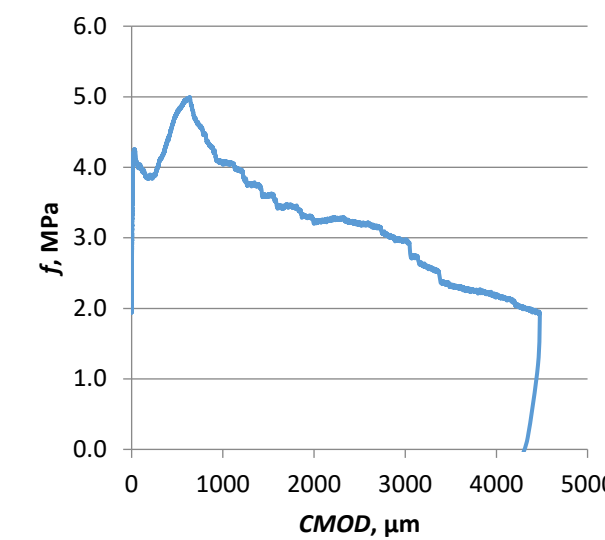
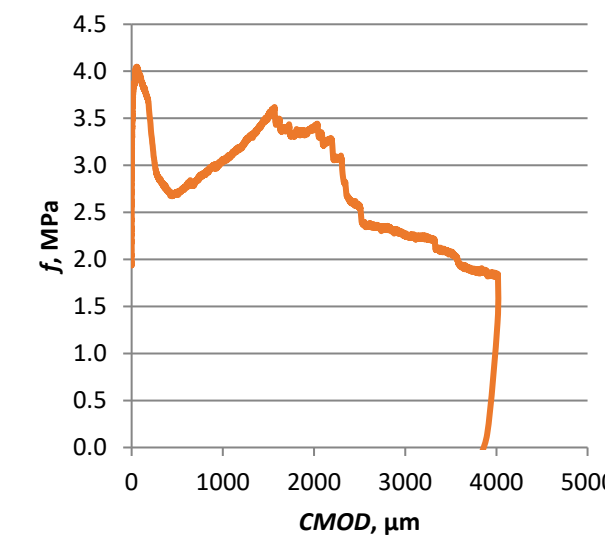
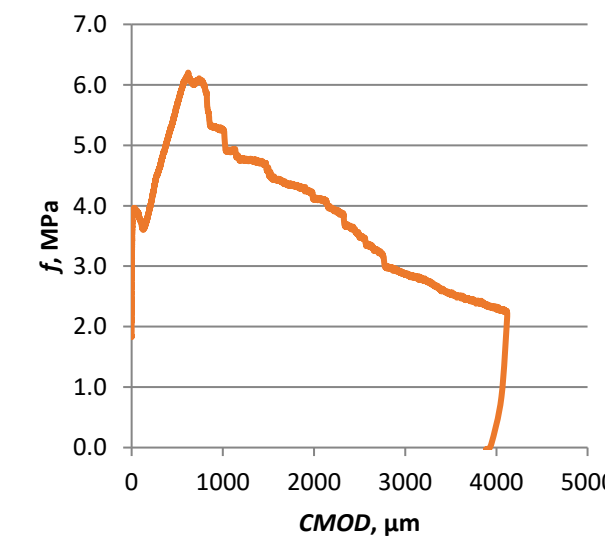
2 Priedas. Lenkimo bandymo apkrovos ir CMOD priklausomybės kreivės

Toliau pateikiamos sertifikuotomis fibromis ir įvairaus skersmens padangų kordais armuotų betono sijų bei dvisluksnių sijų iš gumos turinčio betono bandinių triašio lenkimo bandymo apkrovos ir *CMOD* priklausomybės kreivės.



3 bandinys	 <p data-bbox="1101 392 1412 481">— Kontrolinis betonas, armuotas komercinėmis fibromis</p>
4 bandinys	 <p data-bbox="1133 952 1412 1086">— Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($0.7 < \phi \leq 1.4 \text{ mm}$)</p>
5 bandinys	 <p data-bbox="1133 1534 1412 1668">— Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($0.7 < \phi \leq 1.4 \text{ mm}$)</p>

6 bandinys	 <p data-bbox="1117 392 1420 492">— Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0.35\text{mm}$)</p>
7 bandinys	 <p data-bbox="1117 974 1420 1075">— Kontrolinis betonas, armuotas padangų kordais ($\varnothing \approx 0.35\text{mm}$)</p>
8 bandinys	 <p data-bbox="1117 1523 1420 1680">— Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0.35\text{mm}$)</p>

9 bandinys	 <p>— Sluoksniuota sija su kontroliniu betonu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0.35\text{mm}$)</p>
10 bandinys	 <p>— Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0.35\text{mm}$)</p>
11 bandinys	 <p>— Sluoksniuota sija su gumos sluoksniu viršuje (apatinis sl. – armuotas kordais $\varnothing \approx 0.35\text{mm}$)</p>

