

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ALBERTAS KLOVAS

REOLOGINIŲ BETONO MIŠINIO SAVYBIŲ
ĮTAKA MONOLITINIŲ KONSTRUKCIJŲ
PAVIRŠIAUS KOKYBEI BEI JOS VERTINIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

2016, Kaunas

UDK 666.972(043.3)

Disertacija rengta 2011–2015 metais Kauno technologijos universitete, Statybos ir architektūros fakultete, Statybos technologijų katedroje. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

prof. dr. Mindaugas DAUKŠYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T), 2011–2015 m.

Lietuvių kalbos redaktorė

Ilona Petrovė

Leidykla „Technologija“

ISBN

TURINYS

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	2
Mokslinis darbo naujumas ir jo reikšmė	2
Praktinė darbo rezultatų reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	3
Darbo rezultatų aprobavimas	3
Disertacijos struktūra	3
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ ANALIZĖ	4
1.1. Reologinės struktūrinių mišinių savybės bei jų kitimas	4
1.1.1. Struktūrinių mišinių reologija	4
1.1.2. Priedų bei įmaišų įtaka reologinėms struktūrinių mišinių savybėms	12
1.1.3. Reologinių struktūrinių mišinių savybių nustatymo metodai	17
1.1.4. Reologinės betono mišinio savybės apibendrinantys teiginiai	19
1.2. Sukietėjusio betono paviršiaus kokybė, defektai, vertinimas	20
1.2.1. Betono paviršinės poros bei jų susidarymo prevencija	21
1.2.2. Monolitinėms betono konstrukcijoms įrengti naudojami klojiniai	26
1.2.3. Betono mišinio klojimas ir tankinimas, įrengiant monolitines betono konstrukcijas	30
1.2.4. Betono paviršiaus kokybės vertinimas	33
1.2.4. Betono paviršiaus kokybę lemiantys veiksniai	41
1.2.5. Analitinės mokslo darbų apžvalgos apibendrinimas	41
2. NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODIKA	42
2.1. Cementas	42
2.2. Smulkusis užpildas	42
2.3. Stambusis užpildas	42
2.4. Betono mišinio įmaišos	43
2.5. Cemento tešlos ir betono mišinio ruošimas	44
2.6. Reologinių cemento tešlos ir betono mišinio savybių nustatymas	46
2.7. Betono bandinių paviršiaus kokybei vertinti formavimas	47
2.8. Betono paviršiaus kokybės vertinimo metodika	50
3. REOLOGINĖS BETONO MIŠINIO SAVYBES LEMIANTYS VEIKSNIAI	55
3.1. 0/1 ir 0/4 fr. smėlių kiekių santykio smulkiajame užpilde įtaka reologinėms mišinio savybėms	55
3.2. Stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio santykio įtaka reologinėms betono mišinio savybėms	58
3.3. Smulkiųjų dalelių kiekio įtaka reologinėms betono mišinio savybėms	60
3.4. Įmaišų įtaka reologinėms betono mišinio savybėms	62

3.5. Trečiojo skyriaus išvados	72
4. REOLOGINIŲ MIŠINIO SAVYBIŲ ĮTAKA SUKĖTĖJUSIO BETONO PAVIRŠIAUS KOKYBEI.....	73
4.1. Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant 0/1 ir 0/4 fr. smėlių santykį smulkiajame užpildų mišinyje.....	74
4.2. Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio santykį	78
4.3. Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant smulkiųjų dalelių kiekį.....	81
4.4. Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant įmaišos tipą	84
4.8. Ketvirtąjo skyriaus išvados	97
BENDROSIOS IŠVADOS.....	98
LITERATŪRA.....	101
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	106

Žymėjimai

Simboliai

τ – šlyties įtempimai, Pa;

τ_0 – ribiniai šlyties įtempimai, Pa;

$\overline{\gamma}$ – šlyties greitis, s⁻¹;

η – klampa, Pa·s.

Sąvokos

Cementinė tešla – dispersinė sistema, kurios kietoji fazė yra cemento dalelės, o terpė – vanduo.

Skiedinio mišinys – dispersinė terpė, kurios kietoji fazė yra smulkusis užpildas (smėlis), o terpė – cemento tešla.

Betono mišinys – dispersinė sistema, kurios kietoji fazė yra stambusis užpildas, o terpė yra skiedinio mišinys.

Šlyties įtempimai – mišinio tekėjimą sukelia tam tikras slėgis arba jėga, kurios santykis su sluoksnių sąveikos paviršiaus plotu vadinamas šlyties įtempimais.

Ribiniai šlyties įtempimai – tai šlyties įtempimai, sukeliantys struktūrinio skysčio ar mišinio tekėjimą.

Šlyties greitis – šlyties deformacijos pokyčio greitis laike. Skaitine reikšme jis lygus dviejų sluoksnių, nutolusių vienu ilgio vienetu, greičių skirtumui.

Klampa – medžiagos savybė priešintis tekėjimui, tai yra vieno sluoksnio slinkimui kito sluoksnio atžvilgiu. Klampa pasireiškia dėl suardytos struktūros elementų pasipriešinimo judėjimui.

Tekėjimo kreivė – kreivė, vaizduojanti tekėjimo šlyties greičio priklausomybę nuo šlyties įtempimų.

Struktūrinių mišinių tiksotropija – tai mišinių savybė keisti reologines savybes – mažinti klampą, veikiant juos mechanškai, ir atkurti buvusias reologines savybes, poveikį nutraukus.

Struktūrinių mišinių dilatacija – tai mišinio klampos didėjimas, didėjant šlyties įtempimams arba greičiui.

Vandens poreikis – vandens kiekis normalaus tirštumo tešlai gauti, naudojant Viko prietaisą.

Susiformavusio betono paviršiaus pora – monolitinių betono konstrukcijų ar betono gaminių paviršiuje susiformavusi tam tikro dydžio paviršinė pora (defektas) dėl betonavimo metu nepasišalinusio vandens ar oro prie klojinio paviršiaus.

Betono paviršiaus kokybė – suprantama kaip monolitinių betono konstrukcijų ar betono gaminių paviršiuje susiformavusių paviršinių porų, kurios matyti žmogaus akimi iš tam tikro atstumo, kiekis pasirinktame plote.

Santykinis paviršinių defektų plotas – tai paviršinių oro porų ir nagrinėjamo paviršiaus plotų santykis.

IVADAS

Problemos formulavimas

Pastaruoju metu Lietuvoje ir užsienio valstybėse vis daugiau projektuojama ir statoma monolitinio gelžbetonio statinių bei atskirų pastato konstrukcijų, papildomai neatliekant betoninių paviršių apdailos. Monolitinių betono konstrukcijų paviršiai turi būti itin kokybiški – be porų, lygūs, estetinės išvaizdos ir atskleidžiantys įvairius architektūrinius sumanymus, be to, turi išgauti įvairią struktūrą: medžio, mūro, įvairių geometrinių figūrų bei reljefų ir kt.

Monolitinių betono konstrukcijų paviršių be papildomos apdailos įrengimo problema yra aktuali tiek užsienyje, tiek Lietuvoje. Įrengiant kokybiškus, dekoratyvius ir architektūriškai išvaizdžius monolitinių betoninių konstrukcijų paviršius, būtina tinkamai parinkti betono mišinių sudėtis, klojimą į betonuojamas konstrukcijas, laikytis mišinių tankinimui konstrukcijose keliamų reikalavimų tinkamai apdoroti klojinių paviršių ir kokybiškai juos įrengti. Nesilaikant jų, susiduriama su paviršiaus defektais. Ši problema yra gana aktuali, nes vis daugiau užsienio šalių kompanijų rinkai pateikia naujų remonto mišinių minėtiems defektams šalinti. Tačiau dažnai paviršinių betono defektų remontas, naudojant šiuos mišinius, yra ekonomiškai netikslingas ir retai pasiteisinantis.

Norint, kad monolitinių betono konstrukcijų paviršiai būtų kokybiški ir architektūriškai išvaizdūs, būtini kryptingi modifikuotų betono mišinio sudėčių kūrimo, reologinių bei technologinių mišinių savybių, klojimo ir tankinimo konstrukcijose parametrų, paviršinių įtempimų, klojinių paviršių paruošimo bei jų įrengimo technologijos tyrimai. Būtina metodika, kuri užtikrintų aukštos kokybės betono paviršius. Reikalingi kokybiniai parametrai, kurie leistų įvertinti apdailos betono paviršiaus kokybę. Reikia paminėti, kad šiuo metu betono paviršiaus kokybė yra vertinama subjektyviai, tai yra naudojamas vizualus būdas, kai galutinį sprendimą priima žmogus, todėl rezultatai vienu ar kitu atveju gali skirtis. O skaitmeninis vaizdų analizės metodas leistų gautus duomenis vertinti objektyviau.

Darbo aktualumas

Pastaruoju metu užsienio šalyse nemažai mokslinių tyrimų yra atliekama reologinių susitankinančio betono mišinio savybių įtakos suketėjusio betono paviršiaus kokybei srityje. Dauguma Lietuvos betono mišinio gamintojų jau yra sertifikavę susitankinančio betono mišinio sudėtis, tačiau žemiausia normaliojo betono gniuždymo stiprio klasė yra C30/37. Susitankinantis betono mišinys gaunamas, naudojant didesnę cemento kiekį bei papildomai aktyvius priedus ar mikroužpildus, kurie didina mišinio savikainą, palyginti su įprastu betono mišiniu. Lietuvoje monolitinėms apdailos konstrukcijoms įrengti dažniausiai yra naudojamas C25/30 gniuždymo stiprio klasės betonas. Disertacijoje atliekami tyrimai yra susieti su šios mišinio sudėties keitimu, siekiant išgauti kuo aukštesnę betono paviršiaus kokybę.

Šiuo metu Lietuvoje ir Europoje nėra nacionalinių standartų, rekomendacijų ar metodikų, nurodančių, kaip turėtų būti vertinama betono paviršiaus kokybė ir

klasifikuojamas betonas pagal jo paviršiaus kokybę. Kai kuriuose Europos standartuose tik pateikiami užbaigto gaminio paviršiaus apibūdinimo pagal paviršinių defektų skersmenis metodai, tačiau nenurodomos leistinos paviršinių porų dydžio bei jų kiekio ribos nagrinėjamame ploto vienetė. Lietuvoje betono paviršiaus kokybė vertinama pagal GOST arba rekomendacinio pobūdžio įmonės standartų reikalavimus.

Tyrimų objektas

Aukštos paviršiaus kokybės konstrukcinis betonas.

Darbo tikslas

Vaizdų analizės metodu nustatyti modifikuoto įprastinio betono mišinio reologinių savybių įtaką betono paviršiaus kokybei.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti smulkiųjų dalelių, smulkaus ir stambaus užpildų kiekio įtaką ribiniams betono mišinio šlyties įtempimams ir plastinei klampai bei patobulinti mišinio klampos apskaičiavimo formulę, įvedant klampos pokyčio koeficientą.
2. Pagal patobulintą paviršiaus kokybės vertinimo metodiką nustatyti reologinių įprastinio betono mišinio savybių įtaką paviršiaus kokybės vertinimo rodikliams.
3. Modifikuoti įprastinio betono mišinio sudėtį, įvertinus reologinių mišinio savybių ir paviršinių oro porų kiekio bei jų pasiskirstymo dydžio nagrinėjamame plote ryšį.
4. Priskirti nagrinėjamus paviršius atskiroms klasėms pagal reologinių mišinio savybių įtaką santykiniam paviršinių defektų plotui.

Tyrimų metodika

Technologinės betono mišinių savybės nustatytos, taikant standartinius bandymo metodus; reologinės įprastinio betono mišinio savybės apskaičiuotos pagal literatūros šaltiniuose pateiktas formules; plastinė cemento tešlos klampa nustatyta rotaciniu viskozimetru „Rheotest RN4“; betono paviršiaus kokybė vertinta vaizdų analizės metodu „BetonGUY 2.0“; betono paviršiai pagal kokybę suskirstyti į klases, atsižvelgiant į GOST ir „CIB Report“ reikalavimus.

Mokslinis darbo naujumas ir jo reikšmė

Mokslinį darbo naujumą atspindi gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

- patikslinta plastinės betono mišinio klampos skaičiavimo formulė, įvedant klampos pokyčio koeficientą;
- nustatytas didžiausią įtaką reologinėms įprastinio betono mišinio savybėms ir betono paviršiaus kokybei turintis smulkiųjų dalelių poveikis;

- ištirtas orą įtraukiančios įmaišos panaudojimo paviršiaus defektų santykiniam plotui sumažinti efektyvumas.

Praktinė darbo rezultatų reikšmė

Taikant klampos pokyčio koeficientą, galima įvertinti įvairios paskirties betono įmaišų įtaką mišinio klampai. Taikant vaizdų analizės metodą, pagrindiniais paviršiaus kokybės vertinimo rodikliais galima laikyti oro porų kiekį, jų dydžio pasiskirstymą nagrinėjamame plote bei santykinį paviršinių defektų plotą. Pagal įprastinio betono mišinio sudedamųjų dalių parinkimą galima numatyti reologinių savybių kitimą bei jų įtaką betono paviršiaus kokybei. Lietuvos standartizacijos departamento technikos komitete „TK 19 Betonas ir gelžbetonis“ įteisinus vertinimo metodiką, Lietuvoje bus galima įvertinti betono paviršiaus kokybę bei klasifikuoti betono paviršius.

Ginamieji teiginiai

1. Įvairios paskirties betono įmaišų įtaka jų plastinei klampai tiksliau įvertinama, taikant klampos pokyčio koeficientu modifikuotą formulę.
2. Įprastinio betono mišinio paviršiaus porų kiekis bei santykinis defektų plotas sumažėja, kai mišiniuose naudojami didesni stambiojo užpildo ir smulkiųjų dalelių kiekiai bei plastifikuojančios įmaišos, mažinančios ribinius betono mišinio šlyties įtempius ir plastinę klampą.
3. Orą įtraukiančios įmaišos kiekio didinimas mažina ribinius įprastinio betono mišinio šlyties įtempius bei plastinę klampą ir neleidžia susiformuoti stambesnėms paviršinėms oro poroms, kurias suskaido į smulkesnes, mažiau žmogaus akimi pastebimas.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tyrimų rezultatai publikuoti dviejuose mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą; penkiuose straipsniuose, referuojamuose kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose, bei dviejuose straipsniuose pagal konferencijos pranešimų medžiagą. Darbo rezultatai pristatyti devyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas bei autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas. Bendra disertacijos apimtis 106 puslapiai, tekste minimos 35 numeruotos formulės, pateiktos 43 iliustracijos, 32 lentelės. Literatūros sąrašo nurodyti 86 literatūros šaltiniai.

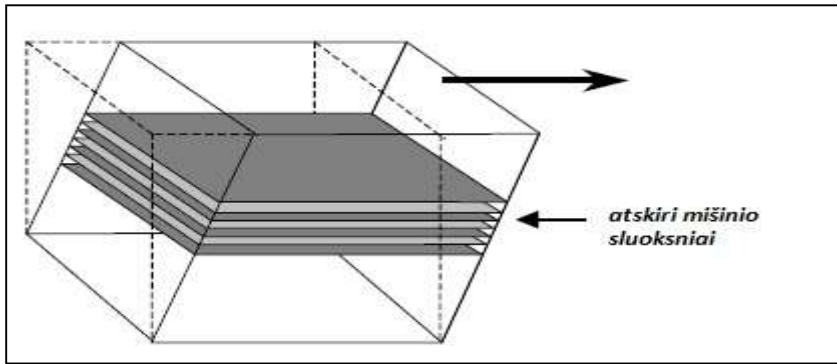
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ ANALIZĖ

1.1. Reologinės struktūrinių mišinių savybės bei jų kitimas

1.1.1. Struktūrinių mišinių reologija

Egzistuoja dvi pagrindinės medžiagos tekėjimo rūšys, priklausančios nuo dalelių judėjimo: šlytinis bei ištisinis (medžiagos pailgėjimas arba susiaurėjimas). Šlytiniame tekėjime medžiagos dalelės prasilenkia viena su kita, o ištisiniame jos juda tolyn arba artyn viena kitos atžvilgiu (Barnes, 2000).

Šlytinis medžiagos tekėjimas gali būti pavaizduotas alternatyviai, tai yra atskirų mišinio sluoksnių tarpusavio judėjimu vienas kito atžvilgiu (1.1 pav.).



1.1 pav. Atskiri mišinio sluoksniai šlytiniame tekėjime (Barnes, 2000)

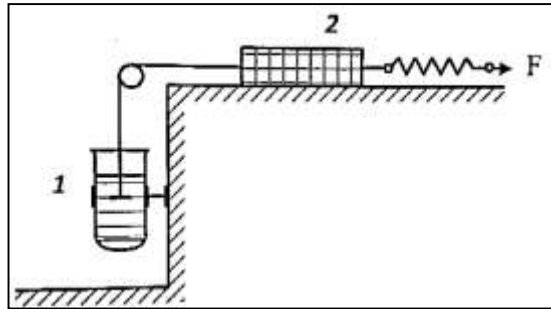
Paprasčiausiu atveju vieno sluoksnio tekėjimo greitis yra didesnis, palyginti su kitu sluoksniu. Tuomet mišinio sluoksnis, nutolęs dvigubu atstumu nuo nejudamo kūno (vamzdžio sienelės), juda dvigubai didesniu greičiu (Barnes, 2000; Wallevik ir Wallevik, 2011).

Statybinių konglomeratų mišiniai yra struktūriniai skysčiai, kurių vidinė struktūra susidaro dėl kietųjų dalelių tarpusavio sąveikos. Šiems mišiniams būdingos tarpinės tarp tikrųjų skysčių ir kietųjų kūnų savybės. Struktūrinės sistemos turi savybę keisti reologines savybes pagal mechaninį poveikį. Jis turi įtakos sistemos vidinei struktūrai, o tikrųjų skysčių reologinės savybės išlieka pastovios. Struktūrinę sistemą veikiant išorinėms jėgoms, jos vidinė struktūra suardoma, susilpnėja ryšiai tarp atskirų kietosios fazės dalelių, dėl to kinta reologinės sistemos savybės – didėja sistemos plastiškumas ir tekamumas (Banfill, 2003; Skripkiūnas, 2007).

Statybiniai mišiniai yra struktūriniai skysčiai ir jie nepradedą tekėti iš karto juos paveikus išorine jėga (Skripkiūnas, 2007). Struktūriniai skysčiai pasižymi tuo, kad jie pradeda tekėti tik tada, kai išorinių jėgų sukelti įtempimai tampa didesni už to mišinio įtempimus, kurie yra maksimali riba, kai dar nebūna suardyti vidinės mišinio struktūros ryšiai.

Mišinių reologinėms savybėms nustatyti bei modeliuoti naudojami reologiniai modeliai, sudaryti nuosekliai arba lygiagrečiai sujungiant idealius kūnus. Reologinių betono mišinių savybių tyrimams dažniausiai naudojamas Binghamo modelis

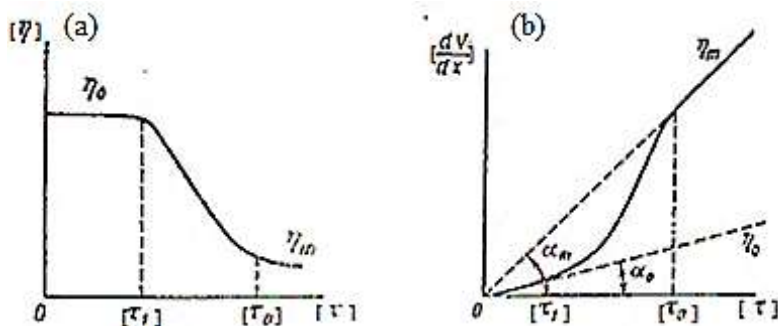
(tiesinė šlyties įtempimų ir greičio priklausomybė), kuris yra sudarytas iš klampaus (mėgintuvėlio su labai klampiu tepalu, kuriame juda stūmoklis (Niutono modelis 1)) ir plastiško (šiurkštaus paviršiaus kūno, sujungto su Huko spyruokle ir judančio slydimo plokštuma (Sen Venano modelis 2)) kūnų (Banfill, 2006). Binghamo kūno modelis pavaizduotas 1.2 pav. Jis atitinka kūną, kuris gali pasipriešinti plastiniam tekėjimui tiek dėl statinės trinties (Sen Venano kūnas), tiek ir plastiškosios klampos (Niutono kūnas).



1.2 pav. Binghamo kūno modelis (Skripkiūnas, 2007). 1 – klampus kūnas (mėgintuvėlis su labai klampiu tepalu, kuriame juda stūmoklis); 2 – plastiškas kūnas (šiurkštaus paviršiaus kūnas, sujungtas su Huko spyruokle ir judantis slydimo plokštuma)

Herschel-Bulkley kūnas (skystis) yra apibendrintas ne niutoninio skysčio atvejis, kai skysčio deformacija yra netiesiškai susijusi su įtempimais. Jį apibūdina trys veiksniai: konsistencija, klampa bei ribiniai šlyties įtempimai. Remiantis atliktais tyrimais, norint nustatyti reologines betono mišinio savybes, taip pat reikia analizuoti mišinio tekėjimą netiesine priklausomybe. Autoriai (Alexandrou et al., 2001) nurodo, kad Binghamo skysčiai yra atitinkamas Herschel-Bulkley skysčio modelio atvejis, kai viršijus ribinius šlyties įtempimus, plastinė struktūrinio skysčio klampa nekinta.

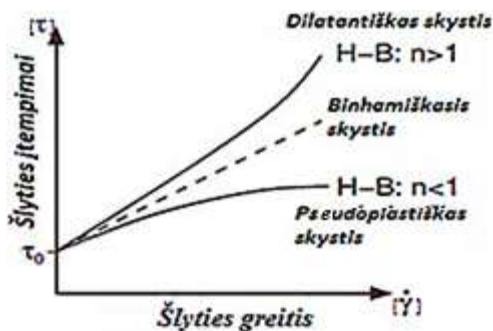
Struktūrinių mišinių tiksotropiškumas – tai mišinių savybė keisti reologines savybes, tai yra mažinti klampą, veikiant juos mechaniškai, ir atkurti buvusias reologines savybes, poveikį nutraukus (Skripkiūnas ir Daukšys, 2004). Ši mišinio savybė pasireiškia dėl vidinės struktūros suardymo ir ryšių tarp kietosios fazės dalelių susilpnėjimo. Nagrinėjant tiksotropinį mišinį, būtina nustatyti, kokia yra mišinio klampos ir šlyties įtempimų bei šlyties greičio ir įtempimų priklausomybė. Tiksotropinio mišinio reologinių savybių kitimas nagrinėjamas taip (Баженков, 1987). Mišinio vidinė struktūra lieka nesuardyta, kol šlyties įtempimai yra maži. (1.3 pav.).



1.3 pav. Tiksotropiško mišinio klampos (a) ir šlyties greičio (b) priklausomybė nuo šlyties įtempimų (Баженев, 1987)

Mišinio struktūros suardymas prasideda tuomet, kai šlyties įtempimai pasiekia kritinę ribą – ribinius šlyties įtempimus. Šiuo momentu mišinio šlyties greitis sparčiai didėja, o klampa mažėja. Tai tęsiasi, kol visiškai suardoma mišinio struktūra. Dėl to klampa mažėja ir pasiekia mažiausią reikšmę – plastinę mišinio klampą, kuri toliau nekinta, didėjant šlyties įtempimams. Tiksotropiškumas būdingas sistemoms, turinčioms didelį smulkiųjų dalelių kiekį, ir jis dažniausiai pasireiškia struktūrinių sistemų vibravimo metu. Mišinį vibruojant, jo struktūra pereina į bestruktūrę arba silpnai struktūrišką. Struktūros ryšių suardymo laipsnis priklauso nuo vibravimo amplitudės ir dažnio. Vibruojant struktūrinėje sistemoje suyra sistemos ryšiai, o tai gerina mišinio klijumą, dalelių išsidėstymo mišinio tūryje pasikeitimą, oro pašalinimą ir kt.

Prie struktūrinių skysčių taip pat yra priskiriami pseudoplastiški bei dilatatiški skysčiai (Boersma et al., 1990). 1.4 pav. pavaizduotos šių struktūrinių skysčių tekėjimo kreivės.



1.4 pav. Struktūrinių skysčių tekėjimo kreivės (Boersma, Laven ir Stein, 1990)

Pseudoplastiškas tekėjimas pasireiškia stambiamolekulėse sistemose. Jis pasižymi tuo, kad didėjant šlyties įtempimams asimetrinės dalelės pamažu orientuojasi. Skysčio dalelės vietoj chaotiškų judesių, kuriuos jos atlieka ramios būsenos skystyje, savo didžiosiomis ašimis orientuojasi srovės kryptimi. Didėjant šlyties greičiui, kaip pavaizduota 1.4 pav., efektyvi mišinio klampa mažės tol, kol bus galimybė tolesnei dalelių orientacijai išilgai srovės krypties, o po to tekėjimo kreivė virsta tiese.

Dilatatiško skysčio tekėjimas stebimas sistemose su ypač dideliu kietosios fazės kiekiu. Šis tekėjimas aiškinamas taip: pradinio laiko momentu dispersinė terpė, kurios yra labai mažai, atlieka tepimo vaidmenį, tai yra mažina kietosios fazės dalelių trintį ir atitinkamai klampą. Didėjant šlyties įtempimams, kietosios fazės dalelės, besiliesdamos viena su kita, sukelia trintį ir klampa pradeda didėti (Alexandrou, McGilvrey ir Burgos, Alexandrou, McGilvrey ir Burgos, 2001).

Reologinės mišinių savybės priklauso nuo skystosios fazės (vandens) kiekio ir vandens ryšio formos. Ypač didelę įtaką joms daro laisvasis vanduo, o chemiškai – fiziškai surištas (adsorbcinis) vanduo neturi įtakos mišinio savybėms. Vykstant mineralinių rišiklių hidratacijai mišiniuose, didėja chemiškai bei fiziškai surišto vandens kiekis ir mažėja laisvojo vandens kiekis (Skripkiūnas, 2007).

Dauguma autorių (Boersma, Laven ir Stein, 1990; Skripkiūnas, 2007; Skripkiūnas, 2004; Skripkiūnas ir Daukšys, 2004) savo darbuose nurodo, kad reologinėms betono mišinio savybėms – ribiniams šlyties įtempimams bei klampai – nustatyti (apskaičiuoti) reikia naudoti viskozimetrą bei daryti prielaidą, kad betono mišinys teka kaip Binghamo skystis. Tokiu atveju reikia atlikti betono mišinio eksperimentinius bandymus, nustatant šlyties įtempimų bei greičio priklausomybę. Autoriai pateikia, kad betono mišinio tekėjimas atitinka Binghamo skysčio elgesį, kuris yra aprašomas lygtimi (1):

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

čia: τ – šlyties įtempimai, Pa; τ_0 – ribiniai šlyties įtempimai, Pa; $\dot{\gamma}$ – šlyties greitis, s^{-1} ; η – klampa, Pa·s.

Mišiniui tekant, jo sluoksniai juda skirtingais greičiais. Sluoksniai, kurie yra arčiau sienelės, juda mažesniu greičiu – V , o toliau esantys – didesniu $V + dV$. Tarkime, kad atstumas tarp skirtingais greičiais tekančių sluoksnių yra dx , tuomet tekėjimo šlyties greitis apskaičiuojamas pagal priklausomybę (2):

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dx} \quad (2)$$

čia: dV – greičių skirtumas tarp sluoksnių; dx – atstumas tarp sluoksnių.

Ribiniai nevibruojamo mišinio šlyties įtempimai gali būti nustatomi pagal betono mišinio tankį bei kūgio nuoslūgį (slankumą) (Chidiac et al., 2000). Atrasta mišinio slankumo ir ribinių šlyties įtempimų priklausomybė (Tunigawa et al., 1992). Padaryta prielaida, kad matuojant betono mišinio slankumą prieš ir po bandymo betono mišinys išliks idealaus kūgio formos (nesideformuojantis kūnas). Remdamiesi tuo, autoriai atrado kūgio formos koeficiento α , slankumo SL (m) ir sklidimo SF (m) priklausomybę. Kūgio formos koeficientas įvertinamas kaip nupjauto kūgio viršutinio ir apatinio apskritimų spindulių santykis. Autoriai pasiūlė formulę (3):

$$\alpha = \frac{1 + a + a^2}{3} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot SF^2 \cdot (H - SL)} \quad (3)$$

čia: V – slankumo bandymui naudojamo nupjauto kūgio tūris, m^3 ; H – 0,3 m, nupjauto kūgio aukštis, m; a – 0,5, nupjauto kūgio viršutinio ir apatinio apskritimų skersmens santykis (100 mm – viršutinio; 200 mm – apatinio).

Darant prielaidą, kad betono mišinio įtempimai kūgio apačioje atsiranda dėl mišinio masės, buvo pasiūlyta išraiška (Tunigawa, Mori, Kurokawa ir Komura, 1992) (4):

$$\sigma_b = \frac{\rho \cdot g \cdot V}{\pi \cdot r_b^2} = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (4)$$

čia: $\rho_{miš}$ – mišinio tankis, kg/m^3 ; g – savitasis kūno gravitacinis pagreitis, m/s^2 ; r_b – apatinio nupjauto kūgio apskritimo spindulys, m.

Skystis pradeda tekėti, kai šlyties įtempimai tampa didesni už ribinius šlyties įtempimus (Parker, 2003). Pateikta lygtis (5), pagal kurią galima paskaičiuoti ribinius šlyties įtempimus, nustačius betono mišinio slankumą (Chidiac, Maadani, Razaqpur ir Mailvaganam, 2000).

$$\tau_0 = \frac{\alpha \cdot \rho \cdot g \cdot (H - SL)}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \cdot \rho \cdot g \cdot z_y}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

čia: z_y – betono mišinio aukštis po slankumo bandymo (nuslūgusio bandinio aukštis), m.

Autoriai apibendrina BT RHEOM viskozimetru gautų bandymų duomenis ir pateikė empirinę ribinių šlyties įtempimų formulę (6) (Hu et al., 1996):

$$\tau_0 = (30 - SL) \cdot \frac{\rho_{miš}}{270} \quad (6)$$

čia: τ_y – ribiniai šlyties įtempimai, kPa; SL – mišinio slankumas, cm;

Autoriai (Gumuliauskas ir Abromavičius, 2000) pateikė ribinių šlyties įtempimų skaičiavimo formulę (7), patikslindami suslūgusio kūgio skersmenį trinties koeficientu μ_0 (0,35):

$$\tau_0 = \frac{350 \cdot \rho_{miš}}{1,35 \cdot \left(\sqrt{\frac{21000}{30 - SL}} - 75 - 5 \right)^2} \quad (7)$$

Tokią išraišką (8) autoriai gavo, standartinio kūgio atveju panaudoję ribinių slankaus betono mišinio šlyties įtempimų skaičiavimo formulę.

$$\tau_0 = \frac{P}{2 \cdot S} = \frac{0,1 \cdot V_b \cdot \rho_{miš}}{2 \cdot \frac{\pi \cdot D_p^2}{4}} = \frac{0,2 \cdot V_b \cdot \rho_{miš}}{\pi \cdot D_p^2} \quad (8)$$

čia: V_b – slankumo bandymui naudojamo nupjauto (standartinio) kūgio tūris, cm^3 ; D_p – nuslūgusio betono mišinio pasklidimo skersmuo, cm.

Žinoma, kad betono mišinio tūris standartiniame kūgyje yra $V_b=5500 \text{ cm}^3$. Tuomet pasklidusio betono mišinio skersmuo apskaičiuojamas pagal formulę (9):

$$D_p = \sqrt{\frac{21000}{30 - SL}} - 75 - 5 \quad (9)$$

Remiantis autoriais (Tunigawa, Mori, Kurokawa ir Komura, 1992) galima apskaičiuoti mišinio sklidimą, žinant jo slankumą. (10) formulė gauta, naudojant standartinį nupjautą kūgį, kuriuo matuojamas mišinio slankumas (viršutinio ir apatinio apskritimų spinduliai atitinkamai yra 50 mm ir 100 mm, aukštis – 300 mm):

$$SF = \sqrt{\frac{0,0356}{0,49 - 1,83SL}} \quad (10)$$

čia: SF – betono mišinio sklidimas, m;

Ir atvirkščiai, žinant betono mišinio sklidimą, pagal formulę (11) galime apskaičiuoti betono mišinio slankumą.

$$SL = \frac{0,549SF^2 - 0,0356}{1,83SF^2} \quad (11)$$

Dažniausiai šiuo metu plastinė betono mišinio klampa nagrinėjama dviem modeliais: fenomenologiniu ir fundamentaliu (Chidiac ir Mahmoodzadeh, 2009). Fenomenologinis betono mišinio plastinės klamos nagrinėjimo modelis yra grindžiamas eksperimentiniais stebėjimais. Remdamiesi šiuo metodu, autoriai (Ferraris et al., 1998) pateikė išvadą, kad plastinė betono mišinio klampa yra funkcinė esamo užpildų kiekio santykio ϕ ir didžiausio galimo užpildo kiekio santykio $\phi_{\max}$ priklausomybė nagrinėjamame betono mišinyje. Naudodami regresinės analizės metodus, minėti autoriai pasiūlė (12) priklausomybę betono mišinio plastinei klampai apskaičiuoti:

$$\eta = \exp\{26.75 \cdot (\frac{\phi}{\phi_{\max}} - 0.7448)\} \quad (12)$$

čia: ϕ – esamas užpildų kiekio santykis mišinyje; $\phi_{\max}$ – didžiausias galimas užpildų kiekio santykis mišinyje.

Pagrindinis fenomenologinio betono mišinio plastinės klamos tyrinėjimo modelio trūkumas – gauti rezultatai yra netikslūs. Dėl to pagal autorių (Ferraris, de Larrard ir Technology, 1998) bei (Ferraris et al., 2001a) pateiktą priklausomybę apskaičiuoti rezultatai gali būti klaidingi, nes kartais yra sunku tiksliai įvertinti užpildų kiekius mišinyje, t. y: ϕ , $\phi_{\max}$

Fundamentalusis betono mišinio plastinės klamos skaičiavimo metodas skirstomas į dvi grupes. Pirmajai priklauso modeliai, kurie dominuoja betono mišinių tyrimuose, o antrosios modeliai labiau taikomi įvairių tirpalų plastinei

klampai skaičiuoti. Pirmajai grupei priskiriami mokslininkų (Hu ir de Larrard, 1996; Murata ir Kukawa, 1992; Roshavelov, 2005;) pasiūlyti modeliai.

Mokslininkai (Murata ir Kukawa, 1992) teigia, kad norint rasti plastinę mišinio klampą, reikia priimti, kad cemento dalelės yra pakibusios vandenyje, tačiau tarp vandens molekulių ir cemento dalelių nėra jokių fizikinių procesų ar cheminių reakcijų. Buvo pasiūlyta tokia plastinės klamos apskaičiavimo formulė (13):

$${}^i\eta_r = \frac{{}^i\eta}{{}^i\eta_0} = \left(1 - \frac{{}^i\varphi}{{}^iC}\right)^{-i_k} \quad (13)$$

čia: ${}^i\eta_r$ – santykinė plastinė betono mišinio klampa; ${}^i\eta$ – plastinė betono mišinio klampa; ${}^i\eta_0$ – plastinė skiedinio (betono mišinio be stambių užpildų) klampa; iC – stambiojo užpildo santykis; ${}^3\varphi$ – tūrinis stambiųjų užpildų kiekis.

O mokslininkai (Hu ir de Larrard, 1996) teigia, kad nagrinėjant modalines, sferines struktūrines suspensijas, galima nepaisyti skirtingų užpildų tarpusavio sąveikos tuo atveju, jeigu užpildų matmenys skiriasi daugiau kaip 10 kartų. Jų nuomone, bendra plastinė mišinio klampa yra atskirų mišinių (dedant tik vieną tam tikrą užpildą) plastinių klampų suma (14 formulė):

$$\eta_r = H(\varphi_1) + H(\varphi_2) + H(\varphi_N) \quad (14)$$

čia: η_r – bendra mišinio plastinė klampa; φ_i – atskiرو užpildo kiekis bendrame užpildų mišinio tūryje; $H(\varphi_i)$ – atskiرو mišinio su tam tikru užpildu plastinė klampa.

Mokslininkas (Roshavelov, 2005) mišinio plastinę klampą bando nagrinėti pagal (Mooney, 1951) pasiūlytą (15) priklausomybę, kuri aprašo dispersinės sistemos klamos priklausomybę nuo kietosios fazės koncentracijos ir skystosios terpės klamos.

$$\eta = \eta_t \exp\left(\frac{a\varphi}{1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}}\right) \quad (15)$$

čia: η – plastinė betono mišinio klampa; η_t – mišinio terpės klampa; a – koeficientas, įvertinantis fazės dalelių formos įtaką dispersinės sistemos savybėms;

$\frac{a\varphi}{1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}}$ – fazės koncentracija.

Autorius (Skripkiūnas, 2007) nurodo patikslintą betono mišinio klamos apskaičiavimo formulę (16). Reikia paminėti, kad skaičiuojant plastinę klampą pagal ją, neįvertinama betono įmaišų įtaka betono mišinio plastinei klampai.

$$\eta_b = \eta_v \cdot \exp \left(\frac{\frac{a_c \cdot \rho_v}{\rho_v + \frac{V}{C} \cdot \rho_c - b_c \cdot \rho_v} + a_{sm} \left(1 - \varphi_{st} - \varphi_o - \frac{V}{\rho_v} - \frac{C}{\rho_c} \right)}{1 - \varphi_{st} - b_{sm} \left(1 - \varphi_{st} - \varphi_o - \frac{V}{\rho_v} - \frac{C}{\rho_c} \right)} + \frac{a_{st} \cdot \varphi_{st}}{1 - b_{st} \cdot \varphi_{st}} \right) \quad (16)$$

čia: φ_o – tūrinė oro porų koncentracija betone; V, C – vandens, cemento kiekiai betone (1 m³ mišinio); ρ_v – vandens tankis, kg/m³; φ_{st} – tūrinis stambiojo užpildo kiekis betono mišinyje; a_c, a_{sm}, a_{st} – koeficientai, įvertinantys cemento, smulkiojo ir stambiojo užpildų dalelių formą ($a_c = 2,6$; $a_{sm} = 2,5$; $a_{st} = 2,6$); b_c, b_{sm}, b_{st} – koeficientai, įvertinantys cemento, smulkiojo ir stambiojo užpildų dalelių išsidėstymo tankumą.

Žinant aukščiau išvardintus mišinio duomenis ir atitinkamus koeficientus, analizuojant galima apskaičiuoti plastinę betono mišinio klampą. Ši formulė turėtų būti modifikuota koeficientu, įvertinančiu skirtingos paskirties įmaišų poveikį plastinei betono mišinio klampai.

Egzistuoja nemažai modelių, pagal kuriuos yra nustatomos reologinės medžiagų savybės (Nehdi ir Rahman, 2004; Puertas et al., 2014). Iš jų pagrindiniai yra: „Bingham“ (17), „Herchel-Bulkley“ (18), „Casson“ (19), „Modified Bingham“ (20), „Williamson“ (21), kurie yra aprašomi tokiomis lygtimis:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (17)$$

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^2 \quad (18)$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu_p} \cdot \sqrt{\gamma} \quad (19)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma + c \cdot \gamma^2 \quad (20)$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + (K \cdot \gamma)^n} \quad (21)$$

Šiose lygtyse kintamieji: τ ; γ ; μ ; μ_p ; μ_0 ; K ; n ; c atitinkamai yra šlyties įtempimai, greitis, reali, plastinė, nulinio šlyties greičio klampos, konsistencija, greičio indeksas bei regresijos konstanta. „Bingham“ modelis yra plačiausiai naudojamas reologinėms cementinių sistemų savybėms aprašyti (Ferraris ir Gaidis, 1992; Mahmoodzadeh ir Chidiac, 2013; Nehdi et al., 1997; Struble et al., 1998).

1.1.2. Priedų bei įmaišų įtaka reologinėms struktūrinių mišinių savybėms

Reologinės betono mišinių savybės priklauso nuo daugelio veiksnių: cemento rūšies, kiekio bei smulkumo, vandens kiekio, užpildų dalelių formos ir granulometrijos; aktyvių mineralinių priedų, mikroužpildų bei betono įmaišų, laiko, temperatūros ir kt. Taip pat reologinėms mišinių savybėms didelės įtakos turi maišymo būdas, kai naudojami didelio arba mažo intensyvumo maišytuvai.

Autoriai (Park et al., 2005) nagrinėjo mineralinių priedų įtaką reologinėms betono mišinio savybėms. Vienai mišinių grupei jie priskyrė portlandcementį bei plastifikuojančią įmaišą, o kitai – smulkiai maltu aukštakrosnių šlakui, lakiaisiais pelenais ar SiO_2 mikrodulkėmis tam tikru kiekiu pakeistą portlandcementį. Atlikę reologinius cemento tešlos tyrimus, mokslininkai nustatė, kad plastifikuojančios įmaišos panaudojimas sumažina ribinius cemento tešlos šlyties įtempimus bei plastinę klampą.

Dauguma autorių teigia, kad mineraliniai priedai gerina fizikines ir mechanines betono savybes bei turi įtakos technologinėms mišinio savybėms (Ferraris et al., 2001b). Pagrindinė to priežastis yra ta, kad papildomas smulkiojo užpildo kiekis didina savitąjį užpildų paviršiaus plotą, kartu didindamas vandens poreikį. Tačiau tam tikrais atvejais mineraliniai priedai gali sumažinti vandens poreikį arba padidinti mišinio slankumą. Autoriai (Lange et al., 1997) nagrinėjo skiedinio vandens poreikį, kuomet kaip mineralinis priedas naudoti smulkiai malti aukštakrosnių šlakai. Ištirta, kad optimalus šlako kiekis mažina skiedinio vandens poreikį, kai yra tam tikras mišinio sklidumas. Vadovaujantis principu, kad mineraliniais priedais galima reguliuoti mišinio technologines savybes, kaip mineralinis priedas buvo tirti lakieji pelenai ir padaryta išvada, kad tarp sferinių lakiųjų pelenų dalelių yra labai maža trintis (Ramachandran, 1996). Sferinė priedų forma taip pat sumažina savitąjį paviršių, kartu ir vandens poreikį. Iš visų erdviųjų formų sferinė pasižymi mažiausiu savituoju paviršiumi, esant tam pačiam tūriui (Pólya ir Szegő, 1951). Buvo nustatyta, kad medžiagos dalelės kompaktiškiau išsidėsto tūryje, kai jų forma yra sferinė (Sakai et al., 1997). Tai lemia mažesnę vandens poreikį, norint gauti mišinio tekamumą (apibūdinamo kaip atvirkštinė klampos reikšmė) ir vidutinio užpildų dalelių dydžio priklausomybę. Autoriai tai paaiškino tuo, kad esant optimaliam vidutiniam dalelių dydžiui, pasiekiamas geriausias jų išsidėstymas tūryje (mažiausias tuštymėtumas) ir kartu didžiausias mišinio tekamumas arba mažiausia klampa. Taip pat buvo ištirta, kad technologinės betono mišinio, kuriame kaip rišiklis naudojami smulkinti šarminiai šlakai, savybės pagerėjo, dalį rišiklio pakeitus labai smulkia medžiaga (Collins ir Sanjayan, 1999). Ši medžiaga buvo sudaryta iš 90 % pagal masę dalelių, smulkesnių kaip $13,7\mu\text{m}$. Autoriai taip pat pabrėžė, kad tai buvo būdinga ne visoms medžiagoms, todėl jie ištyrė kai kurių mineralinių priedų įtaką reologinėms betono mišinio savybėms. Autoriai tyrinėjo šiuos priedus: metakaoliną, labai smulkius lakiuosius pelenus ir SiO_2 mikrodulkes. Tyrinėta mišinio šlyties įtempimų bei klampos kaita, naudojant skirtingus mineralinius priedus bei įmaišą betonui – superplastiklį naftalino / melamino sulfonatų pagrindu. Autorių nagrinėtos cemento tešlos sudėtis: vanduo ir

cementas (santykiu 0,28:0,35); mineraliniai priedai (0–16 % cemento masės, pakeičiant jais cementą); plastifikuojanti įmaiša (0,45–0,7 % cemento masės).

Autoriai teigia, kad 12 % cemento masės pakeitus lakiisiais pelenais, o plastifikuojanti įmaiša sudaro 0,4 % cemento masės, ribiniai mišinio šlyties įtempimai sumažėja apie 5 kartus (nuo 60 Pa iki 12 Pa), palyginti su kontroliniu mišiniu. O plastinė mišinio klampa sumažėja apie 3 kartus – nuo 0,15 Pa·s iki 0,05 Pa·s. SiO₂ mikrodulkės žymiai padidina superplastiklio poreikį mišinyje, palyginti su kontroliniu mišiniu, kai yra tokios pačios reologinių savybių reikšmės. Kontroliniame mišinyje (be mineralinių priedų), kuriame plastifikuojančios įmaišos yra 0,4 % cemento masės kiekio, ribiniai šlyties įtempimai gauti apie 60 Pa, pridėjus SiO₂ mikrodulkių, plastifikuojančios įmaišos jau reikėtų dėti apie 0,7 % cemento masės (1,75 karto daugiau). Tai gali būti aiškinama tuo, kad SiO₂ mikrodulkės pasižymi labai dideliu savituoju paviršiumi. Metakaolino priedas žymesnės įtakos reologinėms cemento tešlos savybėms neturėjo.

Mokslininkai taip pat ištyrė, kaip mineralinių priedų dalelių dydis veikia reologines mišinių savybes. Autoriai atliko bandymus su cemento tešla, kurioje 12 % cemento kiekio buvo pakeista mineraliniais priedais, vandens ir cemento santykis buvo pastovus (0,35), o plastifikuojančios įmaišos kiekis – 0,45 % cemento masės. Analizuodami duomenis autoriai teigia, kad mažiausi ribiniai šlyties įtempimai bei klampa gauti tuomet, kai dalelės buvo 3 μm dydžio. Tokiais dalelių dydžiais pasižymi lakieji pelenai. O didžiausia plastinė klampa gauta, kai dalelių dydis buvo apie 11 μm , didžiausi ribiniai šlyties įtempimai, kai dalelių dydis apie 5,7 μm . Rezultatai leidžia teigti, kad mineralinių priedų dalelių dydis turi didelės įtakos reologinėms mišinio savybėms. Taip pat aišku, kad šios ribos priklauso nuo mineralinio priedo tipo bei cheminio ir fizikinio dalelių aktyvumo (Sakai, Hoshimo, Ohba ir Daimon, 1997).

Apibendrinus mokslininkų tyrimus galima sakyti, kad lakiųjų pelenų panaudojimas gerina mišinių reologines savybes. Kai pridėjus lakiųjų pelenų reikia išlaikyti tas pačias reologines mišinio savybes kaip ir kontrolinio bandinio, vandens ir cemento santykis gali būti mažinamas apie 10 %, o plastifikuojančios įmaišos – apie 40 %.

Mokslininkai (Zhang ir Han, 2000) tyrinėjo aukštakrosnių šlako, SiO₂ mikrodulkių, lakiųjų pelenų, kalkakmenio priedo ir gipso įtaką reologinėms cemento tešlos savybėms. Tyrimų rezultatai parodė, kad ribiniai cemento tešlos šlyties įtempimai sumažėja, pridėjus smulkaus mineralinio priedo, tačiau mišinio klampa labai skiriasi pagal priedo rūšį bei kiekį. Ypač smulkūs priedai (kalkakmenis, SiO₂ mikrodulkės, lakieji pelenai) gali sumažinti mišinio plastinę klampą, tačiau gipsas, pridėjus jo mažiau nei 15 % cemento masės, dažniausiai ją didina.

Remiantis atliktais cemento tešlų su įvairiomis cemento frakcijomis reologinių savybių tyrimais nustatyta, kad didesnę poveikį tešlos struktūrinei klampai turi smulkiai sumaltas cementas arba savitasis paviršius (Баженков, 1987). Didėjant savitajam cemento paviršiui, suardytos struktūros tešlos klampa mažėja. Kai savitasis paviršius yra 450–600 m²/kg, pastebima mažiausia klampos reikšmė, tačiau toliau didinant savitąjį cemento dalelių paviršių, tešlos klampa ima didėti. Kai

atitinkamai smulkus cementas ar priedo dalelės, pasiekiamas optimalus vandens pasiskirstymas sistemoje ir dalelių tarpusavio trintis mažėja. Jei cemento ar priedų dalelės yra dar smulkesnės, tarp jų pradeda veikti didelės molekulinės ir adhezinės jėgos, todėl mišinio klampa didėja.

Didesnės reikšmės įgauna vidinės trinties jėgos mišiniuose su rūpesnėmis kietosios fazės dalelėmis. Šiuo atveju vanduo nebetepa, nes didžioji jo dalis pasiskirsto tuštumose, o ne tarp medžiagos dalelių, ir mišinio klampa pradeda didėti. Mažėjant vidutiniam dalelių dydžiui mišinyje, mažėja dalelių trintis, tačiau didėja ribiniai mišinio šlyties įtempimai. Mokslininkai tyrinėjo stambiojo užpildo poveikį reologinėms mišinio savybėms (Hu ir Wang, 2011). Jie nustatė, kad nepaisant mišinio sudėties, stambiųjų užpildų kiekio didinimas mišinyje mažina ribinius šlyties įtempimus bei klampą. Autoriai taip pat paminėjo, kad kelių skirtingų stambiojo užpildo frakcijų naudojimas gali žymiai sumažinti ribinius mišinio šlyties įtempimus bei klampą, palyginti su vienodo dydžio užpildo dalelėmis. Didesnės mišinio stambiojo užpildo dalelės (stambesnis modulis) su mažesne tarpusavio trintimi dažniausiai mažina ribinius šlyties įtempimus bei klampą. Didėjant stambiojo užpildo kiekio santykiui, ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai mažėja proporcingai didėjant stambiojo užpildo kiekiui, o betono mišinio klampa kinta pagal ekstreminę priklausomybę (Skripkiūnas, 2007). Egzistuoja optimalus stambiojo užpildo kiekio santykis φ_{st} , kuriam esant gaunama mažiausia betono mišinio klampa.

Apibendrinęs įvairių veiksnių įtaką reologinėms betono mišinio savybėms autorius (Banfill, 2011) teigia, kad į betono mišinį pridėjus ir didinant SiO_2 mikrodulkių kiekį, plastinė klampa žymiai mažėja. Iš pradžių ribiniams šlyties įtempimams didesnio poveikio neturi, tačiau didėjant SiO_2 mikrodulkių kiekiui, ribiniai šlyties įtempimai staiga padidėja. Įtraukto oro kiekio didėjimas mišinyje taip pat žymiai mažina plastinę klampą, tačiau ribiniai šlyties įtempimai mažėja nežymiai. Didesnis vandens kiekis žymiai sumažina pagrindinių betono mišinių reologinių savybių vertes. Lakieji pelenai bei plastifikuojančios įmaišos, atvirkščiai, stipriai sumažina ribinius šlyties įtempimus, tačiau didesnio poveikio plastinei klampai neturi.

Reikia pastebėti, kad struktūrinė mišinio klampa mažėja, mažinant vandens kiekį, tačiau, esant nedideliame V/C santykiui, mišinys paprastai praranda rišlumą. Cemento tešla ir betono mišinys gali išlaikyti rišlumą tam tikrose V/C santykių ribose. Kai didelis V/C santykis, pastebimas betono mišinio sluoksniavimasis, kietosios fazės dalelių nusėdimas, tuštumų, kurias užpildo vanduo, susidarymas, vandens pertekliaus iš mišinio atsiskyrimas.

Reologinės betono mišinio savybės neišlieka pastovios, veikiant fizikiniams ir cheminiams procesams, vykstantiems sąveikaujant cementui ir vandeniui. Cemento tešlos klampa ir ribiniai šlyties įtempimai didėja, bėgant laikui po mišinio užmaišymo (Баженков, 1987).

Plastifikuojančios įmaišos pagal sudėtį skirstomos į keturias pagrindines rūšis: melamino ir formaldehido; naftalino ir formaldehido; lignosulfonatų; bei naujausi polikarboksilatų pagrindu (Whiting et al., 1993). Plastifikuojančių įmaišų

efektyvumas priklauso nuo jų cheminės sudėties ir adsorbcijos mechanizmo cemento dalelių paviršiuje (Aitcin et al., 2001).

Dispersinės fazės dalelėms išiektinant vienodais didesniais krūviais, jos labiau viena kitą stumia – tai neleidžia dalelėms sulipti (Skripkiūnas, 2007). Potencialų skirtumas tarp išorinio (fiksuoto) adsorbuoto sluoksnio ir dispersinės terpės viso tūrio vadinamas elektrokinetiniu arba dzeta potencialu. Ištirta įvairios paskirties betono įmaišų įtaka cemento tešlos dzeta potencialui (Neubauer et al., 1998). Mokslininkai nustatė, kad plastifikuojančios įmaišos sukelia neigiamą, kietėjimą greitinantys – teigiamą dzeta potencialą, o rišimąsi lėtinantys – sumažina neigiamą dzeta potencialą.

Mokslininkai tyrinėjo cemento tešlos dzeta potencialo dydžio bei tešlos konsistencijos kitimą laike (Hodne ir Saasen, 2000). Praėjus apie 20 minučių po cemento tešlos užmaišymo, dzeta potencialo reikšmė, esant temperatūrai 50 °C, yra labiau neigiama nei 20 °C temperatūroje. Laikui bėgant dzeta potencialo reikšmė mažėjo dėl didesnio koaguliacijos laipsnio. Esant 50 °C temperatūrai, tešloje buvo užfiksuotas didžiausias dispersijos laipsnis ir žemiausia konsistencija.

Autoriai (Aiad et al., 2002) tyrinėjo, kaip kinta reologinės savybės užmaišius tešlą vandeniu ir po 1, 3, 6, 10 ir 13 minučių įmaišant plastifikuojančių įmaišų. Rezultatai parodė, kad vėliau įmaišytos įmaišos gerina reologines tešlos savybes. Taip pat gerėja plastifikavimo efektyvumas – cemento dalelių paviršiuje didėja plastifikuojančios įmaišos adsorbcija. Mokslininkai taip pat pabrėžia, kad geresnės reologinės savybės priklauso nuo cemento sudėties bei įmaišų įmaišymo laiko. Jie nustatė, kad optimalus laikas, kai reikėtų panaudoti plastifikuojančias įmaišas, yra 10 minučių po mišinio užmaišymo vandeniu.

Reologines betono mišinių savybes keičia ir orą įtraukiančios įmaišos, kurios didina betono atsparumą šalčiui. Taip pat naudojamos klampą keičiančios arba stabilizuojančios įmaišos, kurios mažina betono mišinių sluoksniavimąsi ir vandens atsiskyrimą (Lachemi et al., 2004).

Mokslininkai atliko betono mišinių su lengvaisiais užpildais (dalelių dydis nuo 4 iki 8 mm) reologinių savybių tyrimus, panaudodami plastifikuojančias bei orą įtraukiančias betono įmaišas (Zhang ir Chia, 2004). Autoriai taip pat naudojo stabilizuojančią įmaišą, kad neatsiskirtų vanduo ir nesisluoksniuotų, t. y. mišinyje nenusėstų stambusis užpildas. Autoriai nustatė, kad plastifikuojančios įmaišos kiekio didinimas turi įtakos ribinių mišinio šlyties įtempimų mažėjimui. Tai reiškia, kad betono mišinys turi savybę greičiau (laiko atžvilgiu) pradėti tekėti, veikiant jį ta pačia jėga, kuria būtų veikiamas mišinys, turintis didesnius ribinius šlyties įtempimus. Tam įtakos turi mažesnė cemento dalelių tarpusavio sąveika (deflokuliacija), kurią sukelia cemento dalelių paviršiuje adsorbuotos superplastiklio molekulės. Mokslininkai ribinių šlyties įtempimų pasireikšimą aiškina trejopai: tai yra mechaninė trintis tarp užpildų dalelių; tai yra molekulinės jėgos, kurios traukia cemento daleles su kitomis mikronų dydžio dalelėmis; tai yra koloidinis kalcio hidrosilikato gelis, kuris formuojasi apie cemento daleles vykstant hidratacijai.

Mokslininkai tyrimais taip pat nustatė, kad betono mišinyje naudojant tą patį plastifikuojančios įmaišos kiekį su smulkesnės frakcijos smulkiuoju užpildu (modulis – 2,43) vidutinė plastinė mišinio klampa yra didesnė negu su stambesnės

frakcijos smulkiuoju užpildu (modulis – 2,86), šiuo atveju – smėliu (Zhang ir Chia, 2004). Tai aiškinama didesniu smulkaus smėlio dalelių paviršiaus plotu. Tyrimų rezultatai parodė, kad pridėjus plastifikuojančios įmaišos betono mišinio su dideliu smėlio kiekiu (smėlio ir stambiojo užpildo santykis – 0,45) plastinė klampa sumažėjo, betono mišinio, kai smėlio ir stambiojo užpildo santykis 0,35 – plastinė klampa padidėjo (Tattersall, 1991). Žymaus ribinių šlyties įtempimų pokyčio nepastebėta, naudojant skirtingą smulkią užpildo kiekį bendrame užpildų mišinyje. Betono mišinyje su dideliu smėlio kiekiu smėlis užpildo visas ertmes tarp stambiųjų užpildų (Tattersall ir Banfill 1983). Autoriai aiškino, kad plastinės cemento tešlos klamos sumažėjimas lemia ir viso mišinio klamos mažėjimą, nes stambieji užpildai mažiau liečiasi vieni su kitais, taip mažindami mechaninę tarpusavio trintį. Betono mišinyje su mažu smulkią užpildo kiekiu cemento dalelės atskiria stambiojo užpildo daleles, tačiau į betono mišinį įmaišant plastifikuojančią įmaišą, cemento dalelės yra atskiriamos ir stambieji užpildai suartėja – tai lemia didesnę pasipriešinimą tekėjimui. Šiuo atveju gaunama didesnė plastinė betono mišinio klampa, nepaisant sumažėjusios plastinės cemento tešlos klamos.

Remiantis autoriais (Zhang ir Chia, 2004), orą įtraukianti įmaiša pasižymi dvejopu poveikiu reologinėms mišinio savybėms. Pirma, orą įtraukianti įmaiša žymiai sumažina ribinius betono mišinio šlyties įtempimus (apie 50 %), palyginti su mišiniu be šios įmaišos, tačiau kintantis jos kiekis toliau ribinių šlyties įtempimų neveikia. O plastinės mišinio klamos kitimas pagal orą įtraukiančios įmaišos panaudojimą yra skirtingas. Rezultatai parodė, kad plastinė betono mišinių, kurių vienodos ribinės šlyties įtempimų reikšmės su ir be orą įtraukiančiomis įmaišomis, klampa sumažėjo, didinant orą įtraukiančios įmaišos kiekį. Palyginkime mišinį be orą įtraukiančios įmaišos (plastinė klampa – 58 Pa·s, oro kiekis mišinyje apie 4,5 %) su mišiniu, turinčiu orą įtraukiančią įmaišą: oro kiekiui mišinyje padidėjus 6–17 %, plastinė klampa sumažėjo nuo 50 iki 15 Pa·s, tai yra apie 3,3 karto.

Mokslininkai (Zhang ir Chia, 2004), tyrinėdami reologines betono mišinio savybes su orą įtraukiančia įmaiša, bandymus suskirstė į dvi dalis: oro kiekio betono mišinyje didinimas nuo 4,5 % (betono mišinys be orą įtraukiančių įmaišų) iki 6 % ir – nuo 6 % iki 17 %. Autoriai teigia, kad ribinių šlyties įtempimų sumažėjimas, palyginti betono mišinį be orą įtraukiančios įmaišos ir mišinį su ja (oro kiekis betono mišinyje kito nuo 4,5 % be įmaišos iki 6 % su ja), buvo veikiamas staiga oro burbuliukų formos, dydžio bei išsidėstymo pokyčio mišinyje. Paprastai įtraukto oro burbuliukai, kurie betono mišinyje susiformuoja ruošiant mišinį, yra nevienodo dydžio ir netolygiai pasiskirstę tūryje. O įtraukto oro burbuliukai, panaudojus įmaišą, yra daug smulkesni ir tolygiau išsidėstę. Dėl šių skirtumų įtraukto oro burbuliukai veikia kaip elastiniai kamuoliukai, mažindami vidinę stambesnių užpildo dalelių trintį.

Orą įtraukianti įmaiša turi savybę plastifikuoti betono mišinį (Hewlett, 1998). Įmaišos dalelės oro burbuliukus įelektrina neigiamai, tai yra jų dzeta potencialas pasidaro neigiamas, o tai reiškia, kad tarp oro burbuliukų bei užpildų veikia elektrostatinės stūmos jėgos. Autorius taip pat pažymi, kad plastifikuojančios įmaišos molekulės, adsorbuotos cemento dalelių paviršiuje, gali pritraukti teigiamą krūvį turinčias skiedinio daleles. Šis reiškinys gali didinti ribinius mišinio šlyties

įtempimus, nes tarp oro burbuliukų ir cemento dalelių susidaro elektrostatinės traukos jėgos. Ribinių šlyties įtempimų padidėjimas cemento tešloje (o betono mišinyje jie sumažėja) yra paaiškinamas tuo, kad atsiranda elektrostatinės cemento dalelių ir oro burbuliukų tarpusavio traukos jėgos.

Ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai mažėja, nepaisant to, kad cemento tešlos ribiniai šlyties įtempimai didėja (Zhang ir Chia, 2004). Autoriai tai aiškina tuo, kad didžiausius ribinius šlyties įtempimus sukelia užpildo dalelių tarpusavio sąveika (trinties jėgos), o ne elektrostatinės traukos jėgos cemento tešloje. Mokslininkai, toliau tyrinėdami reologines betono mišinio savybes, oro kiekį betono mišinyje didino 6–17 %. Rezultatai parodė, kad tai neturėjo žymesnio poveikio ribiniams šlyties įtempimams, o plastinė mišinio klampa sumažėjo. Didesnis įtraukto oro kiekis lemia didesnę visą mišinio tūrį, kartu santykinai mažindamas mišinio užpildų užimamą tūrį. Tokiu atveju didėja atstumai tarp užpildo dalelių ir sumažėja jų tarpusavio trintis. Tai ir lemia mažesnę plastinę mišinio klampą.

Taip pat reikia paminėti, kad mišinyje staiga padidėjęs oro kiekis sukelia didesnius ribinius cemento tešlos šlyties įtempimus dėl padidėjusių elektrostatinų oro burbuliukų bei cemento dalelių tarpusavio traukos jėgų. Tačiau, kaip ir buvo rašyta aukščiau, šis efektas yra minimizuojamas sumažėjusiomis viso mišinio trinties jėgomis tarp užpildo dalelių.

Mokslininkai palygino technologines betono mišinių su ir be orą įtraukiančiomis įmaišomis savybes (šiuo atveju – slankumą) (Zhang ir Chia, 2004). Rezultatai parodė, kad esant panašiam mišinių slankumui, ribiniai betono mišinio su orą įtraukiančiomis įmaišomis šlyties įtempimai buvo didesni, palyginti su mišiniais be jų, tačiau klampa – mažesnė. Šiuo atveju betono mišinių su ir be orą įtraukiančiomis įmaišomis tekėjimas skiriasi. Didesni ribiniai šlyties įtempimai reiškia, jog reikės didesnės jėgos, kad mišinys pradėtų tekėti. Tačiau, mišiniui pradėjus tekėti, šlyties greitis bus didesnis to mišinio, kurio plastinė klampa yra mažesnė, tai yra mišinio su orą įtraukiančiomis įmaišomis. Šie mokslininkai, apibendrindami gautus rezultatus, nurodė, kokie veiksniai turi įtakos reologinėms mišinių savybėms. Didesnis vandens kiekis betono mišinyje mažina ribinius šlyties įtempimus, didesnis oro kiekis įtakos jiems neturi. Aktyvūs mineraliniai priedai (jais keičiama dalis cemento), šiuo atveju – SiO_2 mikrodulkės, gali didinti ribinius šlyties įtempimus, jeigu jų yra daugiau kaip 5 % cemento masės.

Stabilizuojanti įmaiša plastinei mišinio klampai žymesnės įtakos neturi. Pagrindinis tikslas, kodėl į betono mišinį yra dedama stabilizuojančios įmaišos, yra didinti ribinius šlyties įtempimus mažinant mišinio klampą (surišamas vandens perteklius), tai yra išvengti sluoksniavimosi arba vandens atsiskyrimo (išsisluoksniavimo).

Stambus užpildas taip pat veikia reologines mišinio savybes. Užpildas, kurio dalelės yra kampuotos, aštriomis briaunomis, didina vidinę dalelių trintį, kartu ir plastinę klampą, o apvalios formos užpildai abi mažina (Zhang ir Chia, 2004).

1.1.3. Reologinių struktūrinių mišinių savybių nustatymo metodai

Reologinės cemento tešlos ir betono mišinio savybės nustatomos skirtingais viskozimetrais, kurie skiriasi savo konstrukcija ir veikimo principu. Reologinėms

mišinių savybėms nustatyti naudojami specialūs prietaisai, o viskozimetrai pagal veikimo principą skirstomi į penkias grupes (Skripkiūnas, 2007):

1. prietaisai, kurių veikimas pagrįstas cemento tešlos ar betono mišinio išteklėjimo greičiu per kapiliarą, vamzdelį ar atitinkamos formos ir dydžio angą, esant tam tikram slėgiui (bandomi betono mišiniai, skiediniai, dažai ir kt.);
2. kūginiai plastometrai, matuojantys kūgio įsmigimo į mišinį gylį;
3. prietaisai, kurių veikimas pagrįstas atitinkamos masės ir formos rutuliuko grimzdimo ar iškilimo greičio matavimu;
4. prietaisai, kurių veikimas pagrįstas rievėtų plokštelių ar cilindrų ištraukimo iš mišinio jėgos matavimu;
5. rotaciniai viskozimetrai, sudaryti iš koaksialinių cilindrų, tarp kurių yra tiriamasis mišinys. Bandymo metu matuojamas sukimosi dažnis ir jėga, reikalinga betono mišinio pasipriešinimui įveikti.

Reologinių betono mišinių savybių nustatymo tikslumas ir korektiškumas priklauso nuo mišinio struktūros ir sudėties. Kuo mišinys homogeniškesnis, tuo bandymas bus tikslesnis. Geriausi rezultatai gaunami, atliekant bandymus su cemento tešlomis. Didinant stambiojo užpildo kiekį, didėja trinties įtaka, bandymo rezultatų sklaida. Betono mišinio sudėtis ir sudedamųjų dalių stambumas nulemia naudojamų viskozimetų parametrus: stambėjant sudedamosioms dalims, didėja bandomo betono mišinio tūris ir darbiniai prietaisų parametrai, kurie turi būti apie 4 kartus didesni nei stambiojo užpildo matmenys (Баженев, 1987). Praktiškai reologinių savybių parametrai nustatomi netiesiogiai. Ribiniai šlyties įtempimai – mišinio slankumu, cm; klampa – standumu (techniniu viskozimetru), s arba Vebe rodikliu, s (Gumuliauskas ir Abromavičius, 2001). Ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai stebimi, nustatant mišinio slankumą – mišinys nustoja slinkti, kai pasiekia ribinių šlyties įtempimų ribą. Autoriai (Gumuliauskas ir Abromavičius, 2001) pateikia empirinę ribinių betono mišinio šlyties įtempimų ryšio su slankumu formulę (žr. 8 formulę).

Autoriai (DeLarrard et al., 1997) reologinėms betono mišinio savybėms nustatyti siūlo naudoti viskozimetą BT RHEOM. Juo galima išmatuoti penkis pagrindinius parametrus: ribinius šlyties įtempimus (su arba be vibracijos), plastinę mišinio klampą, ribinius šlyties įtempimus ramybės būsenoje bei dilataciją. BT RHEOM viskozimetras sudarytas iš šių pagrindinių elementų:

1. korpuso, į kurį yra įmontuoti sukimo ir vibravimo varikliai, sukimo momento, sukimosi greičio, dažnio bei dilatacijos rodiklių davikliai;
2. tiriamojo mišinio talpyklų;
3. apatinių blokuojančių strypų;
4. besisukančios dalies su viršutiniais strypais bei sukimosi ašimi;
5. įrenginys mišinio dilatacijai matuoti;
6. tarpinių, kurios naudojamos talpyklai (2) bei besisukančiai daliai (4) sandariai sujungti;
7. sukimo ir vibravimo variklių valdiklio.

Vibroviskozimetru galima nustatyti reologinės mišinių savybes (Gumuliauskas ir Skripkiūnas, 1995), matuojant mišinio išteklėjimo pro atitinkamo pločio angą (iš

vidinio cilindrinio indo į tam tikro pločio tarpą, esantį tarp vidinio ir išorinio cilindro) laiką.

Nustatant ribinius vibruojamų betono mišinių šlyties įtempimus ir klampą, matuojamas mišinio išteklėjimo laikas vibroviskozimetre, kai ant betono mišinio paviršiaus uždėti skirtingi svoriai. Kaip pradinis svoris imamas diskas su strypeliu (0,917 kg), ant kurio papildomai uždedami 2,012 kg, 4,012 kg, 6,024 kg ir 9,038 kg.

Atsižvelgiant į išteklėjimo angos plotį, šlyties įtempimus ir greitį, ribiniai šlyties įtempimai apskaičiuojami pagal (22) ir (23) formules:

$$\tau = \begin{cases} 0.293 \cdot \rho_m + 122 \cdot Sv, & \text{kai } b = 4 \text{ cm;} \\ 0.327 \cdot \rho_m + 139 \cdot Sv, & \text{kai } b = 5 \text{ cm;} \\ 0.408 \cdot \rho_m + 189 \cdot Sv, & \text{kai } b = 7 \text{ cm;} \end{cases} \quad (22)$$

$$\gamma = \begin{cases} 51/t, & \text{kai } b = 4 \text{ cm;} \\ 34/t, & \text{kai } b = 5 \text{ cm;} \\ 11/t, & \text{kai } b = 7 \text{ cm;} \end{cases} \quad (23)$$

čia: Sv – kūno, uždėto ant mišinio paviršiaus, masė, kg; t – mišinio išteklėjimo trukmė, s; b – išteklėjimo angos plotis, cm.

Keičiant kūno, uždėto ant betono mišinio paviršiaus masę Sv , nustatoma mišinio šlyties greičio priklausomybė nuo šlyties įtempimų ir brėžiama tekėjimo kreivė, iš kurios nustatomos reologinės savybės – ribiniai šlyties įtempimai ir klampa.

1.1.4. Reologinės betono mišinio savybės apibendrinantys teiginiai

1. Reologinių cemento sistemų savybių tyrimams dažniausiai naudojamas Binghamo modelis, apibūdinamas tiesine šlyties įtempimų ir greičio priklausomybe. Reologinėms mišinių savybėms nustatyti naudojami specialūs prietaisai ir viskozimetrai, kurie skiriasi savo konstrukcija ir veikimo principu.
2. Nustatyta, kaip mineralinis priedas veikia technologines mišinio savybės. Tai priklauso nuo dalelių formos. Dalelės, kurių forma yra sferinė, pasižymi mažiausia vidine mechanine trintimi bei geriausiai susitankina. Mažesnė užpildo dalelių trintis lemia mažesnę mišinio klampą, o geresnis susitaikymas – mažesnes vandens sąnaudas. Reologinės mišinių savybės (ribiniai šlyties įtempimai bei plastinė klampa) priklauso nuo mineralinio priedo tipo bei jo dalelių dydžio ir formos.
3. Esant pastoviam plastifikuojančios įmaišos kiekiui, V/C santykio mažinimas didina ribinius šlyties įtempimus bei plastinę klampą.
4. Egzistuoja atitinkamas sumaltų cemento dalelių smulkumas arba savitasis paviršius, kuriam esant vanduo geriausiai pasiskirsto mišinys bei yra mažiausia dalelių trintis. Mažiausia mišinio plastinė klampa gaunama, kai cemento dalelių savitasis paviršius yra 450–600 m²/kg.

5. Didesnis stambiųjų užpildų kiekis mišinyje mažina ribinius šlyties įtempimus bei klampą. Taip nutinka dėl mažesnės vidinės dalelių tarpusavio trinties. Kelių skirtingų dalelių dydžių stambusis užpildas gali žymiai sumažinti ribinius mišinio šlyties įtempimus bei klampą. Didesnių matmenų stambiojo užpildo dalelės taip pat mažina ribinius šlyties įtempimus bei klampą. Betono mišinyje su mažu smulkiojo užpildo kiekiu cemento dalelės atskiria stambiojo užpildo daleles, tačiau į betono mišinį įmaišant plastifikuojančios įmaišos, cemento dalelės atskiriamos ir stambieji užpildai suartėja – tai lemia didesnę pasipriešinimą tekėjimui (didesnę mišinio klampą).
6. Plastifikuojanti įmaiša sukelia neigiamą dzeta potencialą tešloje, dėl to užpildą ir cemento daleles veikia elektrostatinės stūmos jėgos. Šios įmaišos žymiai sumažina ribinius šlyties įtempimus, bet plastinei klampai didesnio poveikio neturi. Optimalus laikas, kada reiktų panaudoti plastifikuojančias įmaišas, yra 10 minučių po mišinio užmaišymo vandeniu. Naudojant tą patį plastifikuojančios įmaišos kiekį betono mišinyje su smulkesniu užpildu, plastinė klampa yra didesnė negu su stambesniu užpildu. Plastinės cemento tešlos klamos mažėjimas lemia ir viso betono mišinio klamos mažėjimą, nes stambieji užpildai mažiau liečiasi vieni su kitais, taip mažindami mechaninę tarpusavio trintį.
7. Orą įtraukiančios įmaišos mažina ribinius mišinio šlyties įtempimus, tačiau didesnis šios įmaišos kiekis toliau ribinių šlyties įtempimų neveikia. O mišinio plastinė klampa, didinant orą įtraukiančios įmaišos kiekį, mažėja.
8. Ribinių šlyties įtempimų kitimas cemento tešloje ir betono mišinyje, panaudojus orą įtraukiančias įmaišas, gali būti skirtingas. Nepaisant sumažėjusių viso betono mišinio ribinių šlyties įtempimų, ribiniai cemento tešlos šlyties įtempimai gali padidėti. Taip nutinka, nes plastifikuojančios įmaišos molekulės, adsorbuotos cemento dalelių paviršiuje, gali pritraukti skiedinyje teigiamą krūvį turinčias daleles (oro burbuliukus). Tai lemia elektrostatinę traukos jėgų cemento tešloje susidarymą bei ribinių šlyties įtempimų didėjimą.
9. Didžiausi ribiniai šlyties įtempimai yra veikiami dalelių tarpusavio trinties, o ne elektrostatinė jėgų. Betono mišinį stabilizuojančios įmaišos panaudojimas didina ribinius šlyties įtempimus, bet didesnės įtakos plastinei klampai neturi. Stabilizuojančios įmaišos dažniausiai naudojamos, siekiant išvengti vandens atsiskyrimo iš mišinio bei mišinio sluoksniavimosi.

1.2. Sukietėjusio betono paviršiaus kokybė, defektai, vertinimas

Šiame skyriuje analizuojami Lietuvos bei užsienio šalių mokslininkų sukietėjusio betono paviršiaus kokybės, dažniausiai pasitaikančių paviršinių defektų bei jų prevencijos priemonių tyrimai. Apžvelgiami monolitinėms betono konstrukcijoms įrengti naudojami klojiniai, jų įtaka betono paviršiaus kokybei. Aprašoma, kaip taisyklingai kloti betono mišinį į klojinius. Analizuojami betono mišinio tankinimo būdai, priemonės bei technologijos. Skyriaus pabaigoje aprašomas betono paviršiaus kokybės vertinimas.

1.2.1. Betono paviršinės poros bei jų susidarymo prevencija

Dažniausiai ką tik suklotame šviežiame betono mišinyje yra daug oro porų, kuriose uždarytas įtrauktas oras (Hilal et al., 2015). Sukietėjus tokiame mišiniui, betonas taps nevienodo gniuždymo stiprio, porėtas bei pasižymės blogu plieninės armatūros ir betono kontaktu (Wisam ir Rex, 1984). Taip pat tokio betono paviršius bus porėtas. Norint, kad sukietėjęs betonas įgytų projektavimo metu nustatytų savybių, mišinys turi būti tankinamas. Tai – procesas, kurio metu mišinio kietosios fazės dalelės suartėja viena kitos atžvilgiu, taip mažindamos įtraukto oro porų kiekį betono mišinyje (Harding, 1995; Samuelsson, 1970). Standesniems bei sausesniems betono mišiniams reikia intensyvesnio tankinimo bei ilgesnės laiko trukmės. Naudojant tam tikras įmaišas, betono mišiniai skystėja ir juos tampa lengviau tankinti, net ir naudojant mažiau vandens (Han ir Yao, 2003). Yra žinoma, kad sumažinus vandens kiekį betono mišinyje ir jį tinkamai sutankinus, susiformavusios betono struktūros fizikinės ir mechaninės savybės pagerėja (Tastani et al., 2013). Taip pat galima sumažinti cemento kiekį ir kartu betono mišinio savikainą, turint omenyje, kad kokybiniai betono rodikliai išliks tokie patys. Standesnius betono mišinius būtina gerai sutankinti, norint geros betono paviršiaus kokybės.

Šiuo metu praktikoje yra naudojama daug įrenginių, skirtų greitam bei efektyviam betono mišinių tankinimui. Gera betono paviršiaus išvaizda – tai tinkamo betono mišinio klojimo ir tankinimo bei kokybiškų klojinių panaudojimo rezultatas.

Nėra paprasta pasiekti, kad susiformavusio betono paviršius būtų visiškai lygus, neturėtų spalvų pokyčių bei būtų išgauta nepriekaištinga paviršiaus tekstūra. Labai dažnai betono paviršių remontas įvairiais mišiniais yra ekonomiškai netikslus ir retai pasiteisinantis, todėl betonavimo darbams įvertinti reikia įvesti kokybės reikalavimus bei jais griežtai vadovautis (Kwasny et al., 2014). Tarptautinė statybos tyrimų taryba (Commission W 29 ir CIB, 1974) nurodė gaires, kaip turėtų būti kuriami standartai, kurie apibrėžtų susiformavusio betono paviršiaus kokybę:

- specialus (architektūrinis) betonas – ypač aukšti paviršiaus kokybės reikalavimai;
- aukštos kokybės betonas – apibrėžti paviršiaus išvaizdos reikalavimai;
- įprastas betonas – paviršiaus kokybė neturi didelės reikšmės; šiurkštus betonas (žemiausia klasė) – nėra jokių paviršiaus kokybės reikalavimų.

Dėl tinkamos betono paviršiaus kokybės projektuotojas bei rangovas privalo naudoti kokybiškas medžiagas, kurios užtikrintų, kad kokybė atitiktų keliamus reikalavimus.

1.1 lent. pateiktos betonavimo metu dažniausiai pasitaikančios problemos bei aptariama, kaip būtų galima jų išvengti. Reikiama betono paviršiaus kokybė pasiekama suderinus visą technologijos procesą: tinkamos mišinio sudėties parinkimą, mišinio klojimą ir tankinimą, atitinkamų klojinių sistemų panaudojimą, pasirinktus klojinių tepalus, žmogiškąjį faktorių bei kitus veiksnius.

1.1 lentelė. Betonavimo metu pasitaikančios problemos bei jų prevencija

Problema	Priežastis	Prevencija
Betono mišinys		
Vandens atsiskyrimas	Per mažas smulkiųjų dalelių kiekis mišinyje	Didinti smulkiųjų dalelių (cemento, lakiųjų pelenų, smėlio) kiekį. Naudoti arba padidinti orą įtraukiančios įmaišos kiekį
	Per didelis vandens kiekis mišinyje	Mažinti vandens kiekį
Betono mišinys		
Sluoksniavimasis	Per slankus mišinys (per didelis vandens kiekis)	Mažinti vandens kiekį, naudoti plastifikuojančias įmaišas
	Per didelė mišinio tankinimo trukmė	Nevibruoti betono mišinio, kuris jau teka (išskyrus tuos, kuriuose naudota plastifikuojanti įmaiša)
	Netinkamas tankinimas	Giluminiais vibratoriais mišinį tankinti mažesniais intervalais
Sluoksniavimasis	Netinkamas betono mišinio klojimas (kritimas)	Mažinti aukštį, iš kurio yra klojamas betono mišinys. Naudoti lovius
	Mišinys nehomogeniškas	Naudoti orą įtraukiančią įmaišą, mažinti stambiojo užpildo kiekį
Lipnus betono mišinio paviršius	Per didelis įtraukto oro kiekis betono mišinyje. Per didelis smulkiojo užpildo kiekis mišinyje	Sukelti vandens atsiskyrimą, mažinant orą įtraukiančios įmaišos bei smulkiojo užpildo kiekius
	Greitai džiušta betono paviršius	Drėkinti patį betoną bei klojinius
Greitas betono mišinio kietėjimas (karšti orai)	Aukšta betono mišinio temperatūra. Aukšta aplinkos oro temperatūra	Naudoti šaltą vandenį, pridėti ledo arba naudoti skystą azotą. Naudoti rišimasi lėtinančias įmaišas. Naudoti lakiuosius pelenus
	Didelis cemento kiekis mišinyje	Naudoti rišimasi lėtinančias įmaišas. Įmaišyti lakiųjų pelenų
	Netinkamas betono mišinio transportavimas	Mažinti betonvežių laukimo laiką, laukti pavėsyje. Purškiamu vandeniu vėsinti betonvežių išorę
Per lėtas kietėjimas (šalti orai)	Liesi betono mišiniai (mišiniuose naudoti lakieji pelenai arba šlakas)	Didinti cemento kiekį. Naudoti rišimasi greitinančias įmaišas. Pašildyti užpildus bei vandenį
	Vėsūs arba drėgni pagrindai	Patiesti polietileno plėvelę ant betonuojamo pagrindo
Horizontalus betono paviršius		
Nevienodos spalvos (tamsios dėmės paviršiuje)	Nevienodai išsimaišęs kalcio chloridas (betono įmaiša)	Turėtų būti naudojamas kalcio chloridas tirpalas
	Per ilga paviršiaus užtrynimo trukmė.	Kai naudojamas kalcio chloridas, neatlikti betono paviršiaus glaistymo
	Nevienodai džiušta betono paviršius arba nevienodai tankintas betono mišinys	Palaikyti vienodas kietėjimo sąlygas

1.1 lentelės tęsinys. Betonavimo metu pasitaikančios problemos bei jų prevencija

Problema	Priežastis	Prevencija
Betono mišinys		
Atšokusi betono paviršiaus dalis	Užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikis, naudojant druskas	Įtraukto oro kiekis betono mišinyje turėtų būti 6–8 %. Didesnis užpildų kiekis, kurių skersmuo iki 1,9 cm
	Netinkamas betono paviršiaus apdorojimas, esant per aukštai mišinio konsistencijai ar drėgnam paviršiui	Apsaugoti nuo lietaus. Sumažinti aplinkos poveikį betono paviršiui, jį apdoroti šepėčiais.
	Nesilaikyta normalių betono kietėjimo bei priežiūros sąlygų.	Betono paviršiai, kurie bus veikiami druskomis, turėtų būti kietėję normaliomis sąlygomis bent 30 dienų
Atšokusi betono paviršiaus dalis	Betono paviršiaus kokybė, panaudojus orą įtraukiančias įmaišas	Naudoti kuo mažiau slankiųjų betono mišinių. Betono gniuždymo stipris turėtų pasiekti bent 27 MPa prieš galimą druskų poveikį
Vertikalūs betono paviršiai		
Korėtas betono paviršius	Netinkamas betono mišinio tankinimas	Tankiau išdėstyti giluminių vibratorių zonas. Vibruoti netoli klojinių paviršiaus. Tankiai armuotoms konstrukcijoms naudoti plastifikuojančias įmaišas. Tinkamai parinkti užpildų granulimetriją
Išplauta cemento tešla (prie klojinių paviršiaus)	Per didelis vandens atsiskyrimas iš mišinio	Didinti smulkiojo užpildo arba orą įtraukiančios įmaišos kiekį

Betono paviršiaus korėjimas – tai netechnologiško betono mišinio klojimo į klojinius rezultatas, kai mišinys netinkamai sutankintas. Betono mišinio vibravimo zona, kurią veikia giluminis vibratorius, priklauso nuo jo vibroelemento skersmens dydžio. Paprastai giluminių vibratorių tankinimo taškai turi būti išdėstyti ne didesniu kaip 40 cm atstumu (Contractors and Institute, 2008). Standesniems mišiniams šis atstumas mažinamas. Jeigu giluminio vibratoriaus tankinimo taškai yra išsidėstę per toli vienas nuo kito, nuošalesni betono mišinio plotai nebus tinkamai sutankinti. 1.5 pav. pateikiamas monolitinės betono konstrukcijos paviršiaus iškorėjimo pavyzdys.



1.5 pav. Monolitinės betono konstrukcijos paviršiaus iškorėjimas (autorius nuotrauka)

1.5 pav. pavaizduotos monolitinės betono konstrukcijos iškorėjimo priežastis – netinkamas tankinimo taškų išdėstymas visame plote. Taškai galėjo būti išdėstyti toliau vienas nuo kito negu pasirinktas rekomenduojamas atstumas. Taip pat tam įtakos galėjo turėti ir giluminio vibratoriaus ištraukimas iš betono mišinio netinkamu kampu.

Cemento tešla išplaunama klojinių sienelių paviršiuje, kai vanduo atsiskiria iš betono mišinio, suklojus jį į klojinius, ir sienelių paviršiumi kyla į viršų, suformuodamas savotišką kelią. 1.6 pav. pavaizduotas vandens judėjimo kelias klojinių sienelių paviršiumi ir šiose vietose vandens išplautos cemento tešlos zonos. Kai klojinys yra nesandarus, vanduo taip pat išbėga ir palieka panašią žymę. Todėl būtina užtikrinti klojinių sandarumą.



1.6 pav. Išplauta cemento tešla klojinių sienelių paviršiuje (autorius nuotrauka)

Paviršinės betono poros susidaro mišinio klojimo ir tankinimo metu, kai nevisiškai pasišalina prie klojinio paviršiaus uždarytas įtrauktas oras arba vandens perteklius. Šios poros – tai ne įtraukto oro pasekmė, o uždarytas oras, dėl įvairių veiksnių negalėjęs pasišalinti. Mokslininkai pažymi, kad orą įtraukiančios įmaišos sukelia vandens atsiskyrimą iš betono mišinio ir uždarytam orui tampa daug sunkiau pasiekti betono mišinio paviršių bei pasišalinti (Contractors ir Institute, 2005). O mokslininkas (Samuelsson, 1970) prieštarauja teiginiui, kad orą įtraukianti įmaiša prastina sukietėjusio betono paviršiaus kokybę. Jis teigia, kad orą įtraukiančios įmaišos gali pagerinti betono paviršiaus kokybę, nes mišinyje susiformavusias stambias įtraukto oro poras suskaido į smulkesnes, kurios lengviau pasišalina į paviršių.

Norint, kad uždarytas oras lengviau pasišalintų iš betono mišinio, reikėtų sumažinti įtraukto oro arba smulkiojo užpildo (smėlio) kiekį mišinyje. Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad sumažinus aukštį, iš kurio betono mišinys klojamas į klojinius, bei tankinant mišinį kuo arčiau klojinių paviršiaus, keliant giluminį vibratorių aukštyn, galima žymiai sumažinti nepasišalinusio įtraukto oro bei vandens pertekliaus sankaupas prie klojinių paviršiaus.

Gelžbetoninių konstrukcijų, gaminamų iš susitankinančio betono mišinio (SCC), kurio nereikia papildomai tankinti, paviršiaus išvaizda priklauso nuo (The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, 2005):

1. cemento tipo bei užpildų;
2. betono mišinio sudėties;
3. klojinių bei tepalų kokybės;
4. betono mišinio klojimo technologijų.

Tinkama betono paviršiaus kokybė dažniausiai gaunama, panaudojus susitankinančius betono mišinius, kurių nereikia tankinti. Dažniausiai išgaunama tolygesnė sukietėjusio betono paviršiaus spalva, žymiai sumažėja oro porų kiekis betono paviršiuje.

Dėl į susitankinantį mišinį įtraukiamo oro maišymo transportuojant bei betonuojant sukietėjusio betono paviršiuje gali susidaryti oro poros. Įtraukto oro kiekis betono mišinyje priklauso nuo jo kohezijos (rišlumo). Pastebėta, kad tinkamos kokybės betono paviršiai gaunami, kai didelis betono mišinio sklidumas bei maža plastinė klampa. Iš tokių betono mišinių įtrauktas oras lengviau pasišalina (The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, 2005). Ypač aukštos kokybės betono paviršiai išgaunami naudojant betono mišinius, kurie pagal technologines savybes yra arti sluoksniavimosi. Betono paviršiuje oro poros susiformuoja tuomet, kai įtraukto oro poros uždaromos prie klojinių paviršiaus. Taip pat labai svarbu teisingai panaudoti klojinių tepalą bei pasirinkti klojinių paviršiaus kokybę. Įtrauktas oras iš betono mišinio lengviau pasišalins, jeigu bus ribojamas mišinio klojimo greitis, o mišinys bus klojamas į skirtingas klojinio vietas.

Taip pat svarbu, kaip betono mišinys siurbliais pumpuojamas į klojinius. Aukštesnės kokybės betono paviršiai išgaunami tada, kai susitankinantis betono mišinys pumpuojamas iš apačios į viršų. Tačiau jeigu to neįmanoma padaryti, betono siurblys visada turi būti žemiau už betonuojamo mišinio paviršių. Jeigu

betono mišinys klojamas į klojinius iš tam tikro aukščio, didėja uždaru oro porų atsiradimo galimybė tiek pačiame mišinyje, tiek sukietėjusio betono paviršiuje.

Betono paviršiaus iškorėjimas, kai naudojamas susitankinantis betono mišinys, gali atsirasti dėl nesandarių klojinių, dažniausiai pasitaikantis atvejis – dėl blogo užpildų pasiskirstymo mišinio tūryje bei tarp plieninės armatūros strypų susiformavusių tuštumų. Užpildai blogai pasiskirstyti mišinio tūryje gali dėl kelių priežasčių:

- 1) per mažas mišinio sklidumas;
- 2) per didelė pastinė mišinio klampa;
- 3) per didelis vidutinis stambiojo užpildo dalelių dydis;
- 4) per mažas cemento tešlos arba per didelis stambiųjų užpildų kiekis mišinyje.

1.2.2. Monolitinėms betono konstrukcijoms įrengti naudojami klojiniai

Nuo tikslaus bei tinkamo klojinių sistemų panaudojimo priklauso gelžbetoninių konstrukcijų (plokščių, sijų, kolonų ir kt.) matmenys, forma bei išbaigtumas (Kreijger, 1984). Klojiniai turi būti ypač lygūs, atitikti numatytus matmenis. Jie taip pat turi būti pakankamai standūs, kad galėtų išlaikyti konstrukcijų formą bei matmenų pastovumą (Lallemant et al., 2000). Jeigu klojiniai nėra tikslūs, monolitinių betono konstrukcijų paviršiuje gali atsirasti įvairių išsipūtimų bei defektų (Libessart et al., 2015). Klojinių skydų paviršiaus šiurkštumas yra dar vienas labai svarbus paties klojinio kokybės veiksnys. Jis yra vertinamas pagal pažeidimų bei įdubimų kiekį tam tikram ploto vienetui (Chow, 1998). Klojinių šiurkštumas keičiasi dėl jų nuolatinio naudojimo bei senėjimo. Klojinio paviršiaus kokybė priklauso nuo daugelio geometrinių pokyčių, kurie klasifikuojami į tris grupes pagal jų svarbą: formos defektai (tiesės nuokrypiai, nevienodi kampai), banguotas klojinių skydų paviršius bei šiurkštumas, vertinant paviršiaus duobutes ir iškilimus.

Klojinius galima išmontuoti tik tada, kai betonas pasiekia numatytą gniuždymo stiprio vertę (proc.) nuo projekcinės gniuždymo stiprio klasės ir gali išlaikyti ne tik savąją masę, bet ir išorines apkrovas. Monolitinių betono konstrukcijų paviršiaus kokybė tiesiogiai priklauso nuo pačių klojinių paviršiaus medžiagos kokybės. Dėl nepakankamos darbuotojų kvalifikacijos ir netinkamo klojinių sistemų surinkimo klojiniai bus nesandarūs, kartu tai lems ir netinkamą betono paviršiaus kokybę. Jeigu gelžbetoninių konstrukcijų betono paviršiaus kokybei yra keliami labai aukšti reikalavimai, patartina pirmiausia, parinkus betono mišinio sudėtį, pagaminti bandinius (maketus). Maketų gamyba – tai puikus būdas atrinkti geriausią betono mišinio sudėtį bei pamatyti, kokia sukietėjusio betono paviršiaus kokybė bus gauta po pačios konstrukcijos betonavimo.

Klojiniai arba klojinių sistemos dažniausiai skirstomos į šias kategorijas:

1. liekamieji, naudojami tik vieną kartą bei paliekami pačioje konstrukcijoje;
2. surenkamieji, kurie gali būti panaudoti daugiau nei vieną kartą;
3. specialieji (šildomieji, pneumatiniai), skirti tam tikroms specialioms betono monolitinėms konstrukcijoms įrengti;
4. perstatomieji (stumdomi) iš mažų, didelių skydų, pakeliamieji, tūriniai, horizontalieji ir kt. (Gurskis, 2008).

Specialiai betono paviršiaus tekstūrai išgauti naudojami klojinių įdėklai. Būtina atkreipti dėmesį, kad naudojant tuos, kurių skirtinga paviršiaus tekstūra, reikalinga papildoma vidinė betono mišinio vibracija, kad įtrauktas oras lengviau pasišalintų iš mišinio, kai ypač lygus įdėklų paviršius (Hurd, 2002). Labai svarbu tinkamai suprojektuoti klojinių sistemas, norint išvengti nelaimingų atsitikimų statybos aikštelėje. Betono mišinys yra didelio tankio medžiaga (normaliojo betono mišinio apytiksliai 2410 kg/m^3). Betono mišinys sukelia didelę apkrovą klojinių sienelėms, todėl būtina klojinių sistemas tinkamai projektuoti, surinkti bei prižiūrėti. Išskiriami trys pagrindiniai veiksniai, kurie nulemia betono mišinio slėgį į klojinių sienes: mišinio temperatūra, klojimo į klojinius greitis bei tankis. 2011 metais ACI (angl. *American Concrete Institute*) išleido patobulintą aprašą, kuriame yra pateikti betono mišinio slėgio į klojinių sienes skaičiavimai, įrengiant monolitinę betono sieną bei koloną. Apraše atsirado koeficientai, įvertinantys betono mišinio tankį (Contractors ir Institute, 2008). Formulėse buvo naudojami šie kintamieji:

- p – šoninis betono mišinio slėgis, kg/m^2 ;
- h – betono mišinio gylis nuo viršaus iki tyrinėjamo taško, m;
- w – betono mišinio tūrio masė, kg/m^3 ;
- R – betono mišinio klojimo greitis, m/h;
- T – betono mišinio temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;
- C_w – betono mišinio tūrio masės koeficientas;
- C_c – betono mišinio koeficientas, įvertinantis mišinio rišimosi trukmę, naudojant įmaišas.

Šoninis betono mišinio slėgis į klojinių sienes, įrengiant monolitines betono kolonas, aprašomas formule (27), kurioje didžiausias galimas slėgis yra $3000 \cdot C_w \cdot C_c$ ($15000 C_w C_c$), mažiausias – $600 C_w$ ($3000 \cdot C_w$), tačiau ne daugiau už $w \cdot h$ vertę:

$$p = C_w \cdot C_c [150 + 9000 \frac{R}{T}] \quad (27)$$

1.2 lent. pateiktos koeficientų vertės betono mišinio sukeliama slėgiui į klojinių sienes apskaičiuoti. **1.2 lentelė.** Betono mišinio sukeliama slėgiui į klojinių sienes apskaičiuoti naudojamos koeficientų vertės

Masės koeficientas C_w	
Betono mišinio, kurio tankis mažesnis nei 140 lb/ft^3 (2250 kg/m^3)	$C_w = 0,5 \cdot (1 + w/145)$ Ne mažiau kaip 0,80
Betono mišinio tankis $140\text{--}150 \text{ lb/ft}^3$ ($2250\text{--}2410 \text{ kg/m}^3$)	$C_w = 1,0$
Masės koeficientas C_w	
Betono mišinio, kurio tankis didesnis nei 150 lb/ft^3 (2410 kg/m^3)	$C_w = w/145$
Rišimosi trukmę įvertinantis koeficientas C_c	
CEM I, II, III tipo cementams (be rišimosi lėtinančių betono įmaišų)	$C_c = 1,0$

1.2 lentelės tęsinys. Betono mišinio sukeliama slėgiui į klojinių sienelės apskaičiuoti naudojamos koeficientų vertės

CEM I, II, III tipo cementams (su rišimasi lėtinančiomis įmaišomis)	$C_C = 1,2$
Kitų tipų cementams, kurių sudėtyje yra ne daugiau kaip 70 % šlako ir 40 % lakiųjų pelenų (be rišimasi lėtinančių įmaišų)	$C_C = 1,2$
Kitų tipų cementams, kurių sudėtyje yra ne daugiau kaip 70 % šlako ir 40 % lakiųjų pelenų (su rišimasi lėtinančiomis įmaišomis)	$C_C = 1,4$
Cemento tipams, kurių sudėtyje daugiau kaip 70 % šlako arba 40 % lakiųjų pelenų	$C_C = 1,4$

Įrengiant monolitines betono sienas, mišinio sukeliama šoniniam slėgiui į klojinių sienelės taikoma formulė (25).

$$p = C_w \cdot C_C \left[150 + \frac{43,400}{T} + 2800 \frac{R}{T} \right] \quad (25)$$

Šiuo atveju didžiausias galimas slėgis yra $2000 \cdot C_w C_C$ ($10000 C_w C_C$), mažiausias – $600 C_w$ ($3000 C_w$), tačiau ne daugiau už $w \cdot h$ vertę. Sienos bei kolonos apibūdinamos taip: siena – tai vertikalus elementas, kurio bent vienas matmuo yra didesnis nei 2 metrai, kolona – tai vertikalus elementas, kurio nė vienas matmuo neviršija 2 metrų. Ekvivalentinė hidrostatinė riba yra tokia vertė, kuri gaunama betono mišinio tūrio masę padauginus iš mišinio gylio (aukščio) klojinyje $w \cdot h$. Ši riba pasiekama, kai klojinys iki pat viršaus pripildomas betono mišinio per trumpesnę negu jis pradeda risti laiką. 1.3 lent. pateikiamos betono mišinio sukeltos šoninių slėgių vertės, kurios priklauso nuo mišinio temperatūros bei klojimo į klojinį greičio, įrengiant monolitines betono kolonas. Šiuo atveju mišinio tūrio masės bei rišimosi trukmės koeficientai lygūs 1.

1.3 lentelė. Betono mišinio sukeltos šoninio slėgio į klojinio apatinę dalį vertės (kg/m^2), įrengiant betono monolitinę koloną

Betono mišinio klojimo greitis, R. m/val.	Betono mišinio temperatūra betonavimo metu, °C			
	32,2	26,67	10,00	4,44
0,6	1750	1875	2550	3000
0,9	2250	2440	3450	4125
1,2	2750	3000	4350	5250
1,5	3250	3565	5250	6375

1.3 lentelės tęsinys. Betono mišinio sukeliama šoninio slėgio į klojinio apatinę dalį vertės (kg/m^2), įrengiant betono monolitinę koloną

Betono mišinio klojimo greitis, R. m/val.	Betono mišinio temperatūra betonavimo metu, °C			
	32,2	26,67	10,00	4,44
1,8	3750	4125	6150	7500
2,1	4250	4690	7050	8625
2,4	4750	5250	7950	9750
2,7	5250	5815	8850	10875
3,0	5750	6375	9750	12000
3,3	6250	6940	10650	13125
3,6	6750	7500	11550	14250
3,9	7250	8065	12450	
4,5	8250	9750		
4,8	8750	10875		
5,4	9750	12000		
6,0	10750	13125		
6,6	11750	14250		
7,2	12750			
7,8	13750			
8,4	14750			

Iš 1.3 lent. pateiktų duomenų matyti, kad betono mišinio slėgis į klojinio apatinę dalį kinta, atsižvelgiant į klojinio užpildymo betono mišiniu greitį bei mišinio temperatūrą. Didėjant klojimo greičiui, kyla ir mišinio sukeltas slėgis į klojinio sienes. Reikia atkreipti dėmesį, kad krentant betono mišinio temperatūrai slėgis į sienes kyla.

Keli mokslininkai taip pat nagrinėjo klojinių sistemų įtaką fizikinėms sukietėjusio betono paviršiaus savybėms. Mokslininkai (Arslan, 2001; Cairns 1999) nagrinėjo 9 skirtingas klojinių sistemas, iš kurių 3-ose nebuvo išgręžtos drenažo skylutės vandeniui nutekėti. Jos buvo 4 mm skersmens bei išdėstytos kas 100 mm atstumu. Rezultatai parodė, kad aukštesnė betono paviršiaus kokybė, palyginti su klojinių sistemomis be drenažo skylių, buvo gauta naudojant klojinių įdėklus bei išgręžus drenažo skylutes. Mokslininkas (Coutinho, 2001) nagrinėjo klojinių sistemų įtaką šioms sukietėjusio betono paviršiaus savybėms: kietumui, baltumo laipsniui, paviršinių oro porų kiekiui, greitesniam karbonizacijos procesui bei atsparumo chloridams. Tyrime buvo naudoti 3 skirtingų tipų klojiniai: drenuojantys, 5 sluoksnių didelio tankio medžio ir įprastiniai, vandeniui nepralaidūs impregnuotos faneros kompanijos PERI klojiniai. Jis parodė, kad siekiant geresnių sukietėjusio betono fizikinių ir mechaninių savybių neverta naudoti 5 sluoksnių didelio tankio medžio klojinių, nes, palyginti su įprastiniais kompanijos PERI impregnuotos faneros klojiniais, gauti prastesni rezultatai (Chen et al., 2012). Tačiau naudojant drenuojančius klojinius beveik visos nagrinėtos betono fizikinės ir mechaninės savybės (išskyrus nežymiai sumažėjusį baltumo laipsnį) gautos aukštesnės. Šiuo

atveju buvo pasiekta ypač aukšta betono paviršiaus kokybė, tai yra buvo pašalintos visos paviršinės poros.

1.2.3. Betono mišinio klojimas ir tankinimas, įrengiant monolitines betono konstrukcijas

Betono mišinys į klojinių sistemas turi būti klojamas kuo arčiau dugno. Negalima betono mišinio kloti atskirais klodais, jį reikia paskleisti tankinant jį vibratoriumi. Per greitai klojant betono mišinį, jis gali sluoksniuotis, dėl to vietomis nebus susitankinęs betono mišinys. Nerekomenduojama betono mišinį kloti į klojinius iš aukščiau kaip 1,5 m, tokiu atveju patartina naudoti lovelį. Jis turėtų būti nuleistas žemiau plieninės armatūros strypų, kad mišinys nesisluoksniuotų. Betono mišinys turėtų būti tinkamai sutankintas, suklojus jį į klojinius. Tinkamas betono mišinio tankinimas sudaro palankias sąlygas įtrauktam orui pasišalinti iš mišinio ir užtikrina technologiską betonavimo sluoksniais procesą (tinkamas visos konstrukcijos tankinimas). Dažniausiai betono mišiniai tankinami, panaudojant giluminius vibratorius (Nemati, 2007).

Į klojinius šviežiai suklotas betono mišinys kiek laiką būna kaip struktūrinis skystis, sukeliantis hidrostatinį slėgį į klojinių sienes. Klojimo greitis veikia mišinio sukeliamą šoninį slėgį į klojinių sienes. Kai mažesnis klojimo greitis, apatinis sukloto mišinio sluoksnis pradeda rišti, taip sumažindamas šoninį slėgį į klojinių sienes.

Betonuojant negalima betono mišinio kloti į vieną vietą, o po to paskleisti klojinyje. Jis turi būti klojamas kuo arčiau betonuojamo klogo konstrukcijos. Mišinio sluoksniai neturėtų būti storesni kaip 60 cm. Vėliau kiekvienas sluoksnis turėtų būti klojamas tada, kai apatinis jau pradėjęs rišti. Atsižvelgiant į aplinkos oro temperatūrą, dažniausiai tai trunka 45–60 minučių. Per ilgai laukiant tarp atskirų klojamo mišinio sluoksnių dažniausiai susidaro sąlygos šaltosioms siūlėms (nepakankama adhezija), kurios mažina atskirai suklotų betono sluoksnių tarpusavio sukibimą, susiformuoti.

Aplinkos oro temperatūra taip pat yra labai svarbus veiksnys. Šaltu oru betono mišinys rišasi lėčiau, o tai mažina leistiną klojimo greitį ir didina laiko trukmę, kad būtų galima išmontuoti klojinių sistemas ir jas panaudoti pakartotinai, jei tai yra būtina.

Betono mišinio tankinimas – tai procesas, kurio metu įtrauktas ir uždarytas oras pašalinamas iš šviežiai sukloto betono mišinio. Pasišalinus įtrauktam orui, užpildų dalelės tarpusavyje išsidėsto arčiau, didindamos mišinio tankį. Tankinimas didina sukietėjusio betono stiprį bei jo sukibimą su plienine armatūra, atsparumą mechaniniam poveikiui ir ilgaikiškumą. Jis leidžia sumažinti betono laidumą vandeniui, taip pat susitraukimo bei valkšnumo deformacijas. Betono mišinio tankinimas taip pat užtikrina, kad klojinys bus visas užpildytas mišiniu, tai yra jame nebus susiformavusių oro tarpų ar kitokių tuštumų. Ką tik šviežiai suklotame normaliame betono mišinyje (nenagrinėjant labai standžių bei takių mišinių) gali būti 5–20 % įtraukto oro.

Pirmame etape, pradėjus tankinti betono mišinį, jis laikinai suskystėja, suslūgsta ir nusėda, užpildydamas visą klojinio tūrį. Antrame etape pašalinamas

mišinyje uždarytas oras. Pirmasis etapas dažniausiai trunka 3–5 s, antrasis – 7–15 s. Bendras vibravimo laikas gali trukti 10–20 s. Svarbu atskirti šiuos du betono mišinio tankinimo etapus, nes mišinys suslūgsta gana greitai, o uždarytam orui pasišalinti reikia daugiau laiko. Betono mišinys turi būti tankinamas tol, kol į paviršių nustoja kilti oro burbuliukai.

Įtraukto oro kiekis mišinyje stipriai veikia santykinį sukietėjusio betono gniuždymo stiprį. Jeigu betono mišinyje yra apie 10 % uždaryto oro, jis siekia apytikriai 50 %, palyginti su visiškai sutankinto betono santykinio gniuždymo stipriu.

Tinkamas betono mišinio sutankinimas didina betono atsparumą dilumui bei jo ilgaalaikiškumą. Tačiau jei mišinys tankinamas per ilgai, į paviršių išplaukia cemento skiedinys, dėl to sumažėja paviršiaus dilumas.

Betono mišiniams tankinti naudojamų giluminių vibratorių, atsižvelgiant į jų vibroelemento skersmenį, vibravimo dažnį ir amplitudę, veikimo zonos spindulys gali būti 100–600 mm. Tokio vibratoriaus efektyvumas taip pat priklauso nuo vibroelemento dažnio bei amplitudės. Kuo didesnė vibroelemento masė, tuo didesnė ir jo amplitudė. Giluminio vibratoriaus veikimo zonos spindulys betono mišinyje priklauso ir nuo technologinių mišinio savybių (kuo didesnis slankumas, tuo didesnis veikimo zonos spindulys) bei vibroelemento skersmens. 1.4 lent. pateikti giluminių vibratorių techniniai duomenys bei jų panaudojimo galimybės.

1.4 lentelė. Giluminių vibratorių techniniai duomenys ir panaudojimo galimybės

Vibroelemento skersmuo, mm	Rekomenduojamas dažnis ¹ , Hz	Vidutinė amplitudė ² , mm	Vibratoriaus veikimo zonos spindulys, e ^{3,5} , mm	Betono mišinio klojimo intensyvumas ⁴ , m ³ /h vienam vibratoriumi	Panaudojimas
20–40	150–250	0,4–0,8	75–150	1–4	Labai slankiam betono mišiniui tankinti bei plonasieneis konstrukcijoms betonuoti. Gali būti naudojamas kaip papildomas vibratorius sunkiai prieinamose vietose.

1.4 lentelės tęsinys. Giluminių vibratorių techniniai duomenys ir panaudojimo galimybės

Vibroelemento skersmuo, mm	Rekomenduojamas dažnis ¹ , Hz	Vidutinė amplitudė ² , mm	Vibratoriaus veikimo zonos spindulys, e ^{3,5} , mm	Betono mišinio klojimo intensyvumas ⁴ , m ³ /h vienam vibratoriumi	Panaudojimas
30–65	140–210	0,5–1,0	125–250	2–8	Betono mišiniams, kurių slankumas 100 – 150 mm, tankinti. Betonuojamos plonasiėnės konstrukcijos.
50–90	130–200	0,6–1,3	175–350	6–20	Betono mišiniams, kurių slankumas iki 80 mm, tankinti. Betonuojamos įprastinės konstrukcijos.
75–150	120–80	0.8–1.5	300–500	11–31	Betono mišiniams, kurių slankumas mažesnis nei 50 mm, tankinti. Masyvioms konstrukcijoms betonuoti.

Paiškinimai:

1. Išmatuota, kai vibroelementas yra betono mišinyje.
2. Amplitudė išmatuota, kai vibratorius veikia ore. Kai vibroelementas yra esant betono mišinyje, amplitudė turėtų būti sumažinta 15–20 %.
3. Trumpiausias veikimo zonos spindulys, norint tinkamai sutankinti betono mišinį.
4. Vibravimo taškai mišinyje parenkami 1,5 karto didesniu atstumu negu jo veikimo zonos spindulys.

Giluminiai vibratoriai turi būti įvedami į betono mišinį kuo greičiau vertikalia kryptimi žemyn ir vertikaliai laikomi tol, kol uždarytas oras nustos kilti į paviršių. Dažniausiai tai trunka 15–20 s. Po tankinimo giluminis vibratorius turi būti lėtai ištraukiamas iš mišinio ir vertikalia kryptimi žemyn įvedamas į kitą, atitinkamu atstumu nutolusią, betono mišinio tankinimo vietą. Šie veiksmai turi būti kartojami pagal parinktą technologiją tol, kol visas betono mišinys tūris bus sutankintas.

Betono mišinį tankinant atsitiktine tvarka, didėja tikimybė, kad kai kurios vietos liks nesutankintos. Taip pat giluminis vibratorius negali būti traukiamas pačiu betonu, nes mišinys bus nevienodai sutankintas, padidės sluoksniavimosi galimybė. Įrengiant monolitines betono konstrukcijas kaip kolonos ar sienos, betono mišinį patartina kloti 300 mm storio klodais.

Giluminis vibratorius turėtų pasiekti anksčiau suklotą betono mišinio sluoksnį maždaug apie 150 mm gyliau, kad tarp atskirų sluoksnių nesusidarytų šaltosios siūlės. Įrengiant mažesnes, trumpesnes monolitines betono konstrukcijas, tai yra esant pastoviam betonavimui, kai betono mišinys klojamas į klojinius, giluminis

vibratorius po truputį turi būti keliamas vertikalia kryptimi aukštyn. Tankinant mišinį jis negali liesti klojinių sienelių paviršiaus, nes jame atsiradę pažeidimai vėliau, sukietėjus betonui, matysis. Paprastai vibruojama apie 50 mm atstumu nuo klojinių paviršiaus.

Klojinių kraštai, jungtys, ypač tam tikro nuolydžio klojinių sistemos, yra tos vietos, kuriose didžiausia tikimybė atsirasti uždarytam orui. Tam išvengti betono mišinį reikėtų kloti netoli tos vietos, bet ne į ją pačią. Tuomet giluminiu vibratoriumi reikėtų paskleisti betono mišinį į sunkiai pasiekiamas vietas.

Pirmame etape betono mišinys klojamas netoli klojinio kampo, tačiau ne į jį patį. Antrame giluminis vibratorius įvedamas į betono mišinį ir po truputį slenkamas klojinio kampo link. Tuo metu suskystėjęs betono mišinys pats užpildo klojinio kampą.

Jeigu monolitinėje konstrukcijoje planuojama įrengti tuštumas arba betonuoti plienines sijas, betono mišinys turėtų būti klojamas tik iš vieno šono ir kruopščiai tankinamas, kol mišinio aukščiau skirtingose intarpo (tuštumos) pusėse susilygins.

Paviršiniai vibratoriai, kurių vibracijos nukreiptos į apačią, uždedami ant betono mišinio viršaus. Dažniausiai jie naudojami platiems horizontaliems konstrukciniams elementams (grindims, plokštėms ir kitiems) tankinti. Yra daug rūšių paviršinių vibratorių, bet dažniausiai naudojamos vibrosijos. Jos gali būti aluminės, metalinės ar medinės, prie kurių pritvirtintas vibruojantis įtaisas, per vibrosiją veikiantis betono mišinį. Dažniausiai vibrosijos būna iki 6 m ilgio.

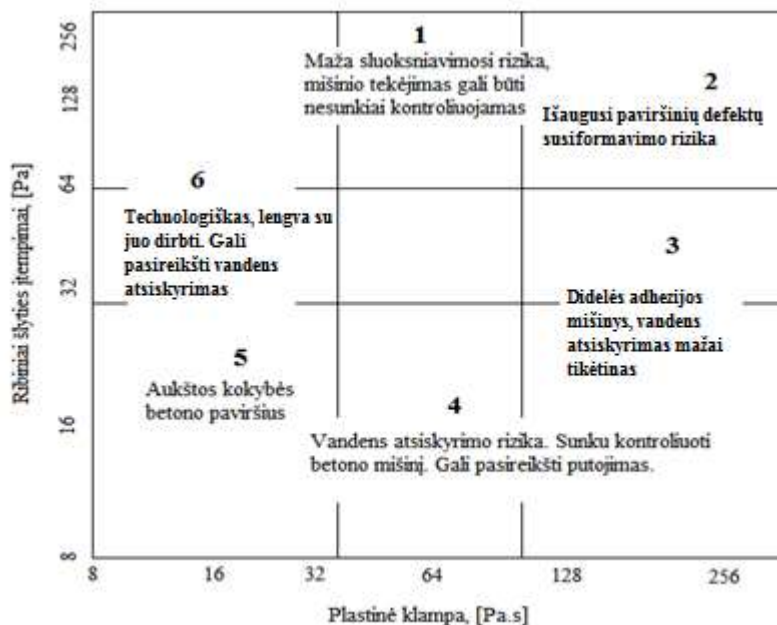
Naudojant paviršinius vibratorius, vibravimo intensyvumas priklauso nuo sukloto betono mišinio sluoksnio storio (Gedeon, 2006). Paviršiniai betono mišinio vibratoriai turėtų būti naudojami tai atvejais, kai mišinio sluoksnio storis yra iki 200 mm. Storesniems turėtų būti papildomai naudojami giluminiai vibratoriai. Kai vibracijas sukeliantis mechanizmas pritvirtintas vibrosijos viduryje, tankinimo efektyvumas labai priklauso nuo vibrosijos ilgio.

Vibravimo efektyvumas tuo mažesnis, kuo didesnis atstumas nuo vibrosijos vidurio. Todėl ties klojinių kraštais rekomenduojama giluminiais vibratoriais papildomai tankinti mišinį.

Pagrindinis veiksnys, lemiantis technologišką betono mišinio tankinimą vibrosija, yra jos judėjimo greitis. Jis turi būti nuo 0,5–1 metro per minutę. Mažesnis greitis turėtų būti tuomet, kai tankinami storesni betono mišinio sluoksniai arba plieninė armatūra yra netoli mišinio paviršiaus.

1.2.4. Betono paviršiaus kokybės vertinimas

Betono paviršiaus kokybė gali būti vertinama keliais būdais. Vieną pasiūlė Danijos technologijos institutas (Bartos et al., 2002). Jis susietas su reologinėmis betono mišinio savybėmis, tyrinėjant susitankinančius betono mišinius, kurių nereikia papildomai tankinti. Šiuo atveju tik iš anksto galime įvertinti, ar bus gauta tinkama sukietėjusio betono paviršiaus kokybė. Siekiamos betono paviršiaus kokybės įvertinimas yra labai svarbus, norint tinkamai suprojektuoti atitinkamą betono mišinio sudėtį. 1.7 pav. pateikta susitankinančio betono mišinio reologinių bei technologinių savybių sietis su sukietėjusio betono paviršiaus kokybe.

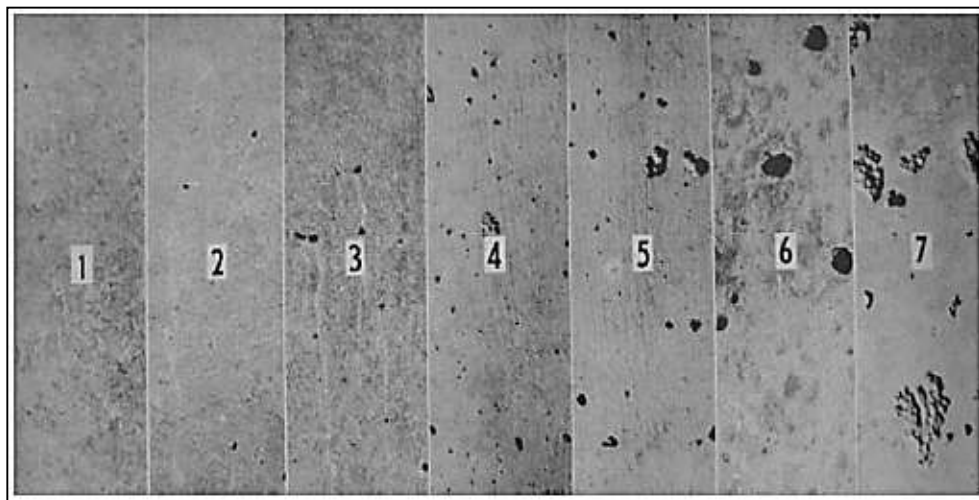


1.7 pav. Susitankinančio betono mišinio reologinių bei technologinių savybių sietis su sukietėjusio betono paviršiaus kokybe (Bartos, Sonebi ir Tamimi, 2002)

Kaip matyti iš 1.7 pav., Danijos technologijos instituto mokslininkai išskiria pagrindines reologinių betono mišinių savybių sritis, kurios skirtingai veikia mišinių technologines savybes. 1 sritis – maža sluoksniavimosi rizika, mišinio tekėjimas gali būti nesunkiai kontroliuojamas; 2 sritis – išaugusi paviršinių defektų atsiradimo rizika; 3 – didelės adhezijos mišinys, vandens atsiskyrimas mažai tikėtinas; 4 – vandens atsiskyrimo rizika; 5 – aukštos kokybės paviršiai; 6 – technologiškas betono mišinys, lengvai apdorojamas. Kai maža plastinė mišinio klampa, betono mišinys yra technologiškas, jį lengva apdoroti ir gaunami geros kokybės paviršiai. Tačiau šiuo atveju iš betono mišinio gali išsiskirti vanduo. Didėjant plastinei mišinio klampai, o ribiniams šlyties įtempimams neviršijant 25 Pa ribos, didėja mišinio sluoksniavimosi tikimybė. Taip pat esant mažiems ribiniams šlyties įtempimams, sunku kontroliuoti norimą betono paviršius kokybę. Mišiniai pradeda lengvai tekėti, jų paviršiuje gali susidaryti putų, dėl kurių sunku atlikti apdailą. Kai santykinai didelė plastinė mišinio klampa, tai yra daugiau kaip 90 Pa·s, mišinys tampa netechnologiškas, su juo sunku dirbti, jis pasižymi gera adhezija. Esant santykinai dideliems ribiniams šlyties įtempimams, tai yra daugiau už 64 Pa, dažniausiai išvengiama betono mišinio sluoksniavimosi, galima įrengti monolitines betono konstrukcijas su nuolydžiu. Šiuo atveju gaunamos šiurkščios, kelių sluoksnių jungtys.

CIB (angl. *Concrete Industry Board*) parengtame standarte (CIB Report no. 24/CIB Report no. 24, 1973) pateikta kontrolinė skalė, pagal kurią galima įvertinti sukietėjusio betono paviršiaus kokybę. Betonas suskirstytas į klases, lyginant

atitinkamos monolitinės betono konstrukcijos paviršių su kontroline skale (įvertinimas balais) (Lemaire et al., 2005) (1.8 pav.).



1.8 pav. CIB standarto kontrolinės skalės kortelės su vertinimo balais (CIB Report no. 24CIB Report no. 24, 1973)

Betonas skirstomas į tam tikras klases pagal jam keliamus reikalavimus:

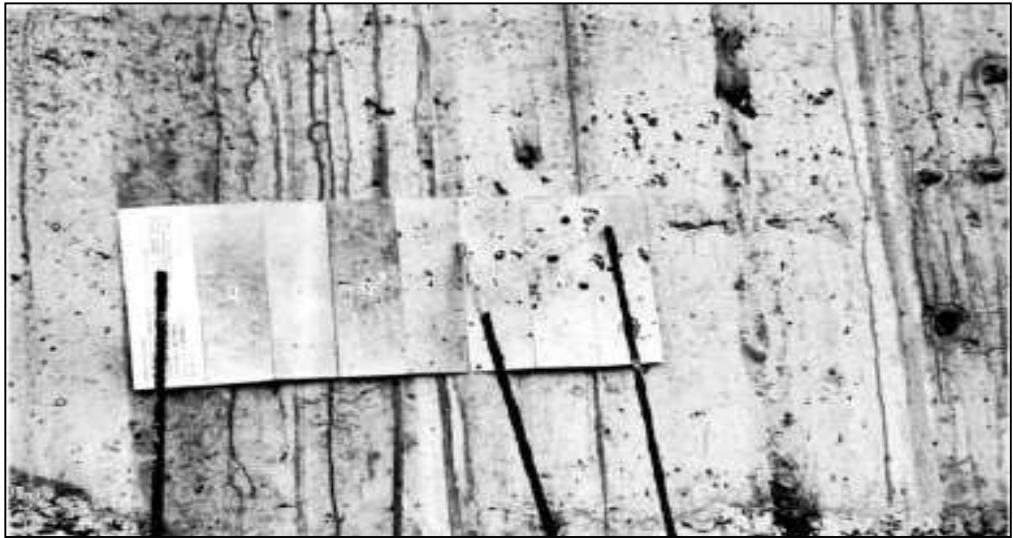
- specialusis – paviršiaus kokybei keliami patys aukščiausi reikalavimai;
- aukštos kokybės – paviršiaus kokybei keliami gana aukšti, tačiau žemesni nei specialiajam betonui reikalavimai;
- įprastas – paviršiaus kokybė nėra svarbiausias veiksnys;
- grubios tekstūros – paviršiaus kokybei nekeliami jokie reikalavimai.

Betono paviršiaus kokybė vertinama tokia tvarka: prie atskirų monolitines betono konstrukcijos paviršiaus vietų pridedamos labiausiai tą paviršių atitinkančios kontrolinės skalės kortelės ir vertinamas jų balų skirtumas (diapazonas). Pagal gautą skirtumą įvertinama betono paviršiaus kokybė (1.5 lent. ir 1.9 pav.). Šis metodas tinka, jeigu paviršinės betono poros yra pasiskirsčiusios po visą konstrukcijos plotą. Jeigu jos yra vienoje konstrukcijos vietoje, priimama, kad tai – tik vietinis paviršiaus defektas.

1.5 lentelė. Betono paviršiaus kokybės vertinimas pagal CIB standartą

Betono paviršiaus defektas	Betono klasės			
	Specialusis	Aukštos kokybės	Įprastinis	Šiurkštaus paviršiaus
Pasiskirsčiusios paviršinės betono poros. Didžiausias galimas balų skirtumas (diapazonas) tarp atitinkamų kontrolinės skalės kortelių	2–4	4–6	6>	-

*pastaba: Betono paviršiaus defektas – tai nevienodos formos oro pora, susiformavusi dėl įvairių priežasčių. Vertinant betono paviršiaus kokybę (oro porų skaičių), į nagrinėjamą paviršių žiūrima 2 m ir didesniu atstumu bei daugiau dėmesio kreipiama į didesnių matmenų (5–10 mm bei >15 mm) oro poras.



1.9 pav. Betono paviršiaus kokybės vertinimas pagal CIB standartą (CIB Report no. 24CIB Report no. 24, 1973)

Betono paviršiaus kokybę taip pat galime įvertinti pagal vietinius, didesnio ploto paviršinius defektus monolitinėje betono konstrukcijoje. Tai yra vizualus metodas, pagrįstas atstumu, iš kurio žiūrima į analizuojamą betono paviršiaus vietą monolitinėje konstrukcijoje (1.6 lent.).

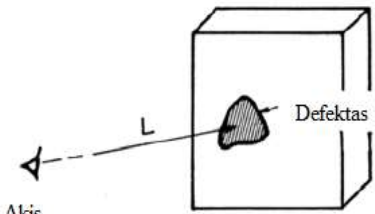
Pagrindinis CIB standarto metodo trūkumas yra tas, kad viename monolitinės betono konstrukcijos paviršiuje gali būti daug skirtingo dydžio porų, todėl jį panaudoti ir pritaikyti yra sudėtinga bei subjektyvu.

Kitas betono paviršiaus vertinimo metodas – patobulinta CIB standarto metodika (Lemaire, Escadeillas ir Ringot, 2005). Tai yra atvaizdo analizės metodas. Atitinkama betono paviršiaus vieta turi būti nufotografuota iš gana arti, kad būtų įmanoma analizuoti 1 mm² ploto defektus. Mokslininkai pateikia tokį gauto atvaizdo analizės algoritmą:

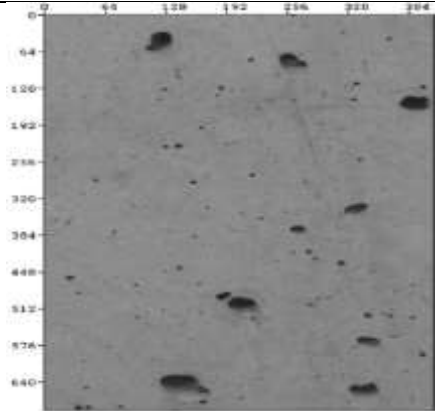
1. atvaizdui apdoroti naudojamas „Median“ filtras, kuris pašalina nereikšmingas mažas daleles (dulkes ir pan.);
2. naudojama didžiausia atvaizdo entropija. Paprastai šis metodas skirtas retiems atvaizdo objektams atskirti, tačiau tinka ir paviršinėms oro poroms;
3. pašalinamos poros, kurių matmenys labai išsiskiria;
4. nustatomas betono paviršiuje esančių porų kiekis bei jų dydis.

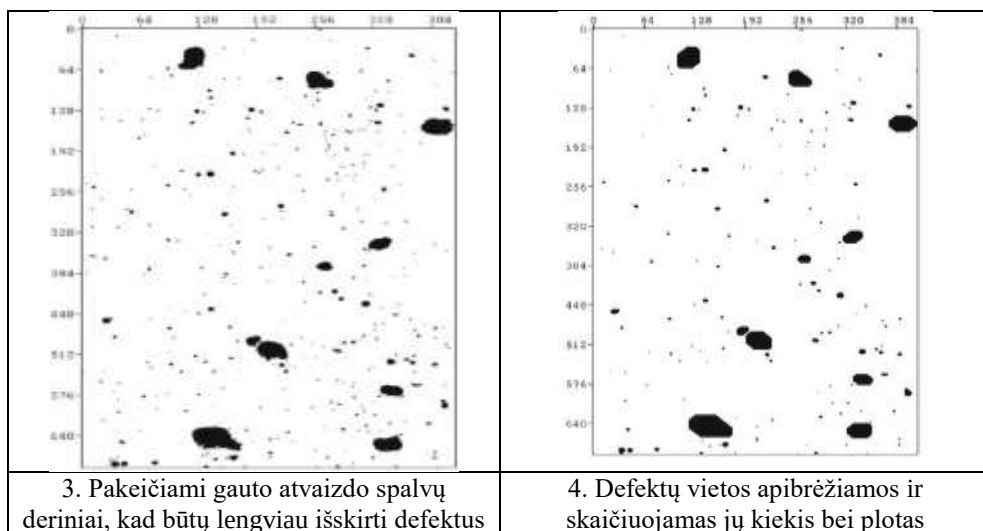
Šiai betono paviršiaus atvaizdų analizei atlikti galima naudoti atvirojo kodo programą „ImageJ“, kuri pagal duotą mastelį suskaičiuoja ir betono paviršiaus atitinkamų porų plotus.

1.6 lentelė. Betono paviršiaus kokybės vertinimas pagal patobulintą CIB metodiką, atsižvelgiant į vietinius, didesnių matmenų defektus monolitinės konstrukcijos paviršiuje

Betono paviršiaus defektas	Betono klasės			
	Specialus	Aukštos kokybės	Įprastinis	Šiurkšt. pav.
 Didžiausio ploto defektas pagal atstumą, iš kurio į jį žiūrima	3L	4L	5L	-

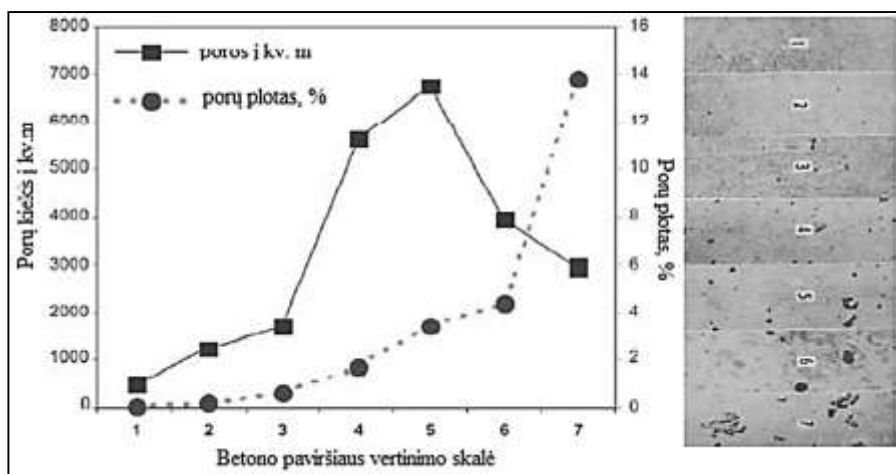
1.10 pav. pateiktas pavyzdys, kaip vaizdų analizės metodu analizuojama monolitinės betono konstrukcijos paviršiaus kokybė.

	
1. Betono paviršiaus atvaizdas	2. Duoto mastelio betono paviršius



1.10 pav. Betono paviršiaus atvaizdo analizės etapai

Mokslininkai (Lemaire, Escadeillas ir Ringot , 2005) patobulino CIB standarto betono paviršiaus vertinimo skalę, ją išanalizavę pagal pačią sukurta atvaizdo analizės metodą. Kaip matyti iš 1.11 pav., mokslininkai pateikė bei patikslino CIB standarto betono paviršiaus kokybės vertinimo skalę. Matyti, kad daugiausia oro porų kvadratiniam metre gaunama tuomet, kai betono paviršius atitinka 4 arba 5 kontrolinės skalės kortelės numerį, tai yra atitinkamai 5500–6500 paviršinių oro porų. O didžiausias oro porų plotas gaunamas tuomet, kai betono paviršius atitinka 7 numeriu pažymėta kontrolinės skalės numerį.



1.11 pav. Porų kiekio ir jų ploto šetis su betono paviršiaus kokybės vertinimo skale (Lemaire, Escadeillas ir Ringot, 2005)

Betono paviršiaus kokybę taip pat galima įvertinti pagal GOST 13015.0-83 standarto reikalavimus. Pagal jį betono paviršiai skirstomi į klases nuo A1 iki A7,

kur A1 – etaloninis, pats geriausias betono paviršius, A7 – prasčiausias. 1.7 lent. pateikiamas betono paviršiaus kokybės vertinimas pagal GOST 13015.0-83 standarto reikalavimus. Reikia atkreipti dėmesį, kad leidžiamos atskiros (ne daugiau kaip 1 vnt. 1 m² paviršiaus ploto) poros ar kavernos, kurių skersmuo arba didžiausias matmuo, ne didesnis kaip:

1. 2 mm – A2 paviršiaus kategorijai;
2. 6 mm – A3 paviršiaus kategorijai;
3. 15 mm – A4 paviršiaus kategorijai.

Nesutankinto betono plotai konstrukcijos paviršiuje neleidžiami. A3 paviršiaus kategorijai vietiniai iškilimai arba įdubų gylis turi būti ne didesni kaip 1 mm. Ribinius nudažymų ar ištrupėjimų matmenis konstrukcijos briaunose, kurios įeina į jungiamąjį mazgą ir statybos aikštelėje bus užbetonuotos, reikia priimti pagal A7 paviršiaus kategoriją. Konkrečių tipų betono konstrukcijų paviršiui gali būti keliami ir standartiniai ar techninės sąlygose nurodyti reikalavimai, kurie skiriasi nuo reikalavimų, pateiktų 1.7 lent.

1.7 lentelė. Betono konstrukcijų paviršiaus kokybės reikalavimai (pagal GOST 13015.0-83)

Betono konstrukcijos paviršiaus kategorija	Poros ar kavernos skersmuo arba didžiausias matmuo	Vietiniai iškilimai arba įdubų gylis	Briaunoje esančių nudažymų ar ištrupėjimų gylis	Suminis nudažymų ar ištrupėjimų ilgis 1 m ilgio briaunoje
Duomenys, mm				
A1	Ypač lygus paviršius (etalonas)		2	20
A2	1	1	5	50
A3	4	2	5	50
A4	10	1	5	50
A5	Nėra reikalavimų	3	10	100
A6	15	5	10	100
A7	20	Nėra reikalavimų	20	Nėra reikalavimų

Mokslininkai, dirbantys Norvegijos mokslo ir technologijų universitete bei jo padalinyje SINTEF, siūlo betono paviršiaus kokybę klasifikuoti pagal paviršinių porų dydį bei jų kiekį (Eide et al., 2011). Šiuo metu keli tyrėjai pasiūlė gamykloje suformuoto gelžbetonio elemento paviršiaus kokybę įvertinti, naudojant BIM bei 3D lazerinio skenavimo technologiją (Kim et al., 2015). Anot mokslininkų, norint įvertinti betono paviršiaus kokybę, reikia visų pirma žinoti, kokius kokybinius elemento rodiklius bei kiek tiksliai vertinsime. Toliau reikėtų apibrėžti tikslią procedūrą arba algoritmą tam tikram elementui vertinti, pasirinkti tinkamiausią įrangą (optimalaus skenerio bei jo parametrų parinkimas) bei mokėti įvertinti ir pristatyti gautus rezultatus. Autoriai išskiria tokius šio metodo trūkumus: gali būti įvertinta tik surenkamųjų elementų paviršiaus kokybė, o elementų storis turi būti nekintamas.

1.8 lentelėje pateikti 4-ių pagrindinių betono paviršiaus kokybės vertinimo metodų privalumai ir trūkumai.

1.8 lentelė. Betono paviršiaus kokybės nustatymo metodų palyginimas

Metodo pavadinimas	Privalumai	Trūkumai
CIB Report no. 24, 1973	1. Aiškios betono paviršiaus kokybės klasifikavimo klasės. 2. Lengvai įsisavinama metodika. 3. Prieinama visiems.	1. Metodika yra sena. 2. Paviršiaus kokybės klasė nustatoma pagal šablonus. 3. Metodas subjektyvus, nes remiasi tyrinėtojo nuomone.
GOST 13015.0-83	1. Lengva pritaikyti. Betono paviršiaus kokybė gali būti nustatoma pagal didžiausią defekto matmenį. 2. Prieinama visiems.	1. Metodika yra sena. 2. Subjektyvus vertinimas.
BIM bei 3D skenavimo technologija	1. Naujas betono paviršiaus kokybės vertinimo būdas. 2. Objektyvus, nes paviršiaus kokybė nustatoma kompiuterine programa. 3. Prieinama visiems.	1. Paviršiaus kokybė gali būti nustatoma tik surenkamiesiems elementams. 2. Elementų storis turi būti nekintamas. 3. Ribota panaudojimo galimybė.
BetonGUY 2.0	1. Naujas betono paviršiaus kokybės vertinimo būdas. 2. Objektyvus, nes naudojama kompiuterinė įranga. 3. Vertinamas didžiausias defekto matmuo. 4. Rezultatai suskirstomi pagal defektų kiekį bei jų dydį. 5. Greitas ir nesudėtingas vertinimo procesas.	1. Santykinai brangi įranga. 2. Programa dar nebaigta kurti ir viešai neprieinama.

Kiti tyrėjai pateikia daugiau betono paviršiaus defektų nustatymo metodų: naudojant tam tikrus filtrus, galima nustatyti nevienodą paviršiaus atspalvį (vizualus metodas) (Shih ir Wang, 2004; Zhu ir Brilakis 2009,). Vis populiariausias tampa betono paviršiaus kokybės vertinimas, naudojant lazerinį skenavimą (Akinci et al., 2006; Han et al., 2012; Park et al., 2007; Tang et al., 2010).

1.2.4. Betono paviršiaus kokybę lemiantys veiksniai

1. Pastebėti atskirų mokslininkų prieštaravimai dėl oro įtraukiančios įmaišos naudojimo. Vienų autorių teigimu, dėl jos gali išsiskirti vanduo, dėl to uždarytam orui sunkiau pasišalinti iš betono mišinio. O kiti mokslininkai teigia, kad ši įmaiša gali pagerinti betono paviršiaus kokybę, nes stambesnės įtraukto oro poros suskaidomos į smulkesnes, lengviau pasišalina iš mišinio.
2. Apžvelgti betono paviršiaus kokybės tyrimai, naudojant skirtingus klojinių tipus. Rezultatai parodė, kad geresnė betono paviršiaus kokybė gaunama naudojant klojinius, kuriuose yra išgręžtos mažos skylutės vandeniui nutekėti (įrengtas drenažas).
3. Klojant betono mišinį į klojinius reikia vengti laisvojo jo kritimo, nes dėl to gali mišinys sluoksniuotis bei išsiskirti vanduo, o tai neigiamai veiktų betono paviršiaus kokybę.
4. Egzistuoja du betono mišinio tankinimo giluminiu vibratoriumi etapai. Pirmojo metu dėl sumažėjusios vidinės trinties jėgų tarp kietosios fazės dalelių mišinys suslūgsta ir nusėda, taip užpildydamas visą klojinio tūrį. Antro etapo metu iš mišinio pašalinamas uždarytas oras. Pirmasis gali trukti 3–5 s, antrasis – 7–15 s. Bendra šio proceso trukmė turėtų būti 10–20 s.
5. Giluminio vibratoriaus veikimo zonos spindulys tankinamame betono mišinyje priklauso nuo technologinių mišinio savybių (kuo klampa mažesnė, tuo jis didesnis) bei nuo vibroelemento duomenų.
6. Užsienio šalių autorių tyrimai daugiausia susiję su susitankinančio betono mišinio reologinių savybių įtaka paviršiaus kokybei. Pasigendama tyrimų apie įprasto betono mišinio sudėties modifikavimo galimybes kuo aukštesnei paviršiaus kokybei išgauti. Tai ypač aktualu Lietuvoje įrengiamoms monolitinėms konstrukcijoms, kurių paviršiaus kokybei yra keliami aukšti reikalavimai.
7. Apžvelgus betono paviršiaus kokybės vertinimo būdus pastebėta, kad tiksliausiai monolitines betono konstrukcijas paviršiaus kokybę apibūdina oro porų (defektų) ir nagrinėjamo betono paviršiaus plotų santykis. Vizualūs betono paviršiaus kokybės vertinimo metodai tobulinami, taikant fotografavimo bei skenavimo principus, o tai leidžia eliminuoti subjektyvią žmogaus nuomonę. Paviršinių betono oro porų plotams skaičiuoti gali būti panaudota atvirojo kodo programa „ImageJ“, kuri, skenuodama betono paviršius, vertina nevienodus jų atspalvius.

1.2.5. Analitinės mokslo darbų apžvalgos apibendrinimas

Literatūros šaltinių analizė rodo, kad dažniausiai užsienio šalyse apie betono paviršiaus kokybę kalbama, nagrinėjant susitankinančius mišinius. Pavyzdžiui, Danijos technologijos institutas yra nustatęs reologinių susitankinančio betono mišinio savybių įtaką sukietėjusio betono paviršiaus kokybei. Jam pagaminti reikia didelio smulkiųjų dalelių kiekio, kuris būtinas specifinėms šio mišinio savybėms išgauti. Dauguma Lietuvos betono mišinio gamintojų jau sertifikavo susitankinančio mišinio sudėtis, tačiau žemiausia gniuždymo stiprumo klasė yra C30/37. Susitankinančiam betono mišiniui paruošti reikia didesnio cemento bei aktyvių mineralinių priedų ar mikroužpildų kiekio, papildomos įrangos. Visa tai didina

mišinio savikainą. Todėl dažniausiai monolitinėms betono konstrukcijoms įrengti Lietuvoje naudojami įprastiniai betono mišiniai.

Neaptikta literatūros šaltinių, kuriuose būtų analizuojamos labiausiai Lietuvoje paplitusios, įprastinės betono mišinių modifikavimo galimybės, siekiant išgauti tinkamą sukietėjusio betono paviršiaus kokybę. Vis dažniau pasitaiko atvejų, kai reikia taip modifikuoti įprastų betono mišinių sudėtis, kad jie savo technologinėmis savybėmis mažai kuo skirtųsi nuo susitankinančio betono mišinio.

Disertacijoje norima atkreipti dėmesį į įprastų, labiausiai Lietuvoje paplitusių betono mišinių savybių modifikavimą, tai yra keičiant jų reologines savybes gauti kuo aukštesnę sukietėjusio betono paviršiaus kokybę.

2. NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODIKA

2.1. Cementas

Tyrimams buvo naudotas AB „Akmenės cementas“ portlandcementis CEM II/A-LL 42,5R (žr. 2.1 lent.).

2.1 lentelė. CEM II/A-LL 42,5R fizikinės, mechaninės savybės bei cheminė sudėtis

Savitasis paviršius, m ² /kg	410
Cemento dalelių tankis, kg/m ³	3050
Normalaus tirštumo tešla, %	26,5
Tūrio kitimo tolygumas, mm	0,8
Rišimosi terminai: pradžia, min.	195
Stipris gniuždant po 2, 28 parų, MPa	27,1/54,0
Kaitmenys, % (masės)	5,05
Netirpmenys, % (masės)	-
Kalcio sulfatas, išreikštas SO ₃ kiekiu, %	2,48
Chloridai, % (masės)	0,015
Šarmai, skaičiuojant Na ₂ O ekvivalentu, % (masės)	<0,8

2.2. Smulkusis užpildas

Kaip smulkusis užpildas tyrimams naudoti Kvesų karjero 0/1 bei 0/4 frakcijos smėliai, kurių piltiniai tankiai atitinkamai: $\rho_{0/1}=1521 \text{ kg/m}^3$ ir $\rho_{0/4}=1711 \text{ kg/m}^3$. Piltiniai sutankintos būklės tankiai atitinkamai: $\rho_{0/1s}=1747 \text{ kg/m}^3$ bei $\rho_{0/4s}=1891 \text{ kg/m}^3$. Granulimetrinė užpildų sudėtis, nustatyta pagal standarto LST EN 933-1:2012 reikalavimus, pateikta 2.2 lentelėje.

2.3. Stambusis užpildas

Kaip stambusis užpildas tyrimams naudotas 4/16 frakcijos žvirgždas, kurio piltinis tankis $\rho_{4/16}=1657 \text{ kg/m}^3$, o piltinis sutankintos būklės tankis $\rho_{4/16s}=1823 \text{ kg/m}^3$. Granulimetrinė užpildų sudėtis, nustatyta pagal standarto LST EN 933-1:2012 reikalavimus, pateikta 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Smulkiojo ir stambiojo užpildų granulometrijos duomenys

Mišinio užpildas, fr.			
-	Smėlis, 0/1	Smėlis, 0/4	Žvirgždas, 4/16
Sieto akučių dydis, mm	Išbyra, %	Išbyra, %	Išbyra, %
0	0	0	0
0,125	3,2	4,6	0
0,25	28,0	17,4	0
0,5	92,5	56,0	0
1	98,1	71,9	0
2	99,9	87,7	0
4	100	97,5	0,4
8	100	100	25,4
16	-	-	93
32	-	-	100

2.4. Betono mišinio įmaišos

Tyrimams naudotos įmonės BASF „Construction Chemicals Italia Spa“ pagamintos betono įmaišos: plastifikuojanti, klampą keičianti, orą įtraukianti bei betono mišinyje susiformavusias oro poras naikinanti. Tyrime naudotų betono įmaišų fizikinės ir cheminės savybės bei dozavimas pateikti 2.3 lent.

2.3 lentelė. Techniniai betono įmaišų duomenys

Eil. Nr.	Betono įmaišos tipas	Įmaišos pavadinimas	Fizikinės ir cheminės savybės	Rekomenduoja mas dozavimas, % cemento masės
1.	Plastifikuojanti įmaiša	„Glenium SKY 628“	Polikarboksilato eterių polimerų pagrindu; gelsvas skystis; tirpalo tankis – 1,06 g/cm ³ ; didžiausias chloridų kiekis – 0,10 %;	0,6–1,4
2.	Mišinyje susiformavusias oro poras naikinanti įmaiša	„Rheomix 880“	Propoksilintų ir etoksilintų riebiųjų rūgščių mišinys; geltonai rusvas skystis; tirpalo tankis – 0,96 g/cm ³ ; nelakiųjų medžiagų kiekis – 95 ± 4,8 %.	0,1–1,3

2.3 lentelės tęsinys. Techniniai betono įmaišų duomenys

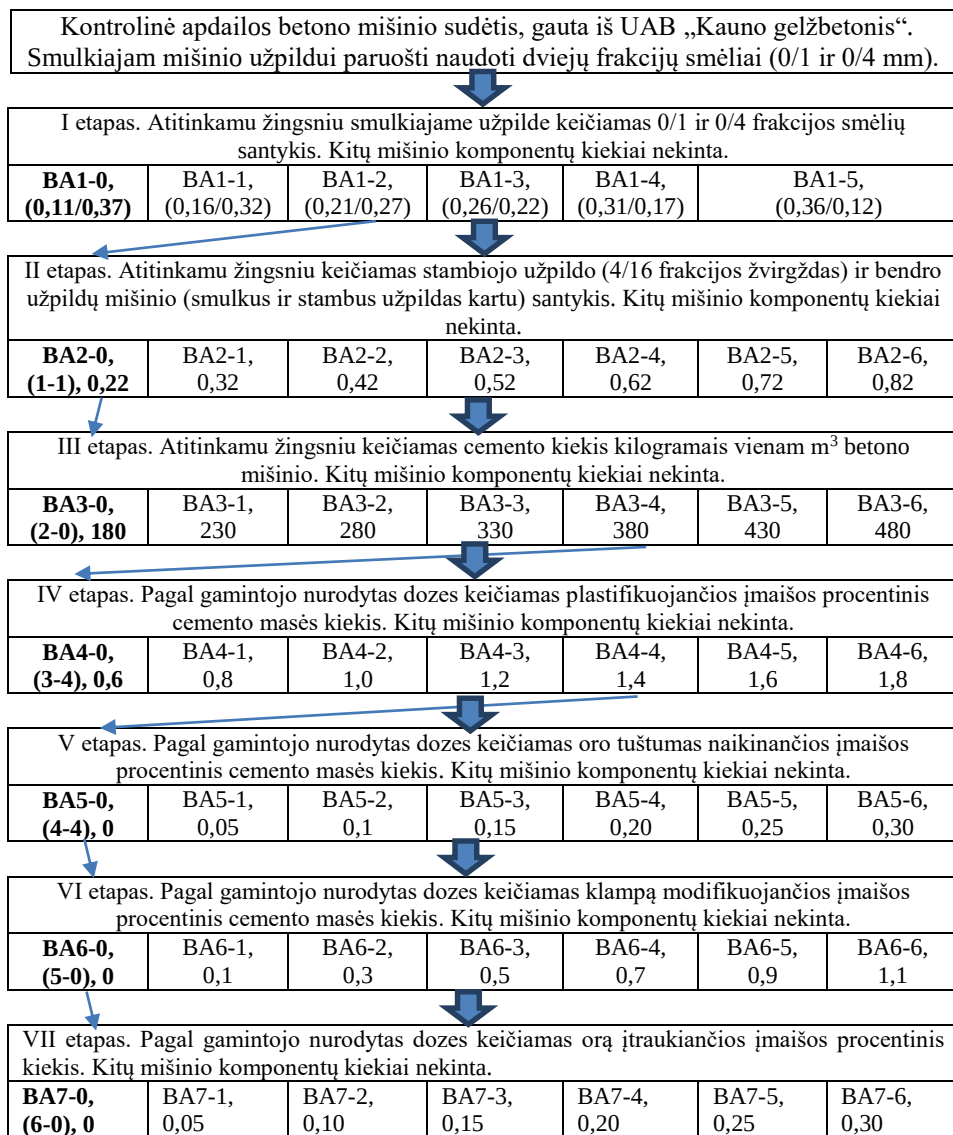
Eil. Nr.	Betono įmaišos tipas	Įmaišos pavadinimas	Fizikinės ir cheminės savybės	Rekomenduoja mas dozavimas, % cemento masės
3.	Klampą keičianti įmaiša	„Rheomatrix 100“	Didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų pagrindu; rudas skystis; tirpalo tankis – 1,01 g/cm ³ ; vandenilio jonų koncentracija, pH – 6–9; didžiausias chloridų kiekis – <0,1 %.	0,1–1,5
4.	Orą įtraukianti įmaiša	„Micro air G“ (LP)	Paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu; gelsvas skystis; tirpalo tankis – 1,0 g/cm ³ ; kurio pH – 9,0, Na ₂ O < 0,2 %, chloridų kiekis < 0,01 %	0,05–0,15

2.5. Cemento teslos ir betono mišinio ruošimas

Cemento teslos buvo maišomos priverstinio maišymo maišyklėje „Automix“. Cementas dozotas pagal masę, o vanduo ir betono įmaišos – pagal tūrį. Tyrimo metu teslos vandens ir cemento santykis (V/C) atitiko atskiros betono mišinio sudėties V/C santykį bei tai sudėčiai paruošti panaudoto betono įmaišos procentinį cemento masės kiekį. Cemento teslai ruošti naudotų betono įmaišų techniniai duomenys pateikti 2.3 lentelėje. Ji ruošta skirtingos paskirties betono įmaišų įtakai cemento teslos plastinei klampai įvertinti.

Betono mišinio sudėtys parinktos pagal LST 1974:2012 standarto reikalavimus. Mišiniams ruošti naudoti sausi užpildai. Įmaišos (išskyrus klampą keičiančias) įmaišytos kartu su vandeniu, naudojamu mišiniams paruošti. Betono įmaišų kiekiai skaičiuoti proc. nuo cemento masės (2.3 lentelė). Buvo parinktos 42 skirtingos betono mišinio sudėtys. Aukštesnei betono paviršiaus kokybei pagal reologines savybes (ribinius šlyties įtempimus bei plastinę klampą) išgauti buvo siekiama optimizuoti betono mišinio sudėtis. Daryta prielaida, kad mažesnės mišinio ribinių šlyties įtempimų bei plastinės klamos reikšmės lemia aukštesnės kokybės betono paviršius, todėl keičiant mišinių sudėtis buvo pasirenkamas tas komponentas (2.1 pav.), su kuriuo reologinių savybių reikšmės būdavo mažiausios, o mišinys išlikdavo technologiškas. 2.1 pav. storomis rodyklėmis pavaizduoti bandymo etapai, o plonomis – optimalaus betono mišinio komponentai, kurie būdavo naudojami naujam bandymo etapui. Įmaišos dozotos pagal gamintojų rekomendacijas (2.3 lentelė). Atskirų mišinio sudedamųjų dalių įtakai reologinėms

mišinio savybėms bei suketėjusio betono paviršiaus kokybei įvertinti, suplanuotas eksperimentas suskirstytas į 7 etapus (2.1 pav.).



2.1 pav. Įprastos betono mišinio sudėties modifikavimo atskiromis sudedamosiomis dalimis eiga, vertinant mišinio reologinių savybių kitimą

Betono mišiniai buvo ruošiami laboratorinėje priverstinio maišymo maišyklėje ZYKLOS „Pemat Mischer Mixer“ apie 3 minutes dviem etapais. Pirmojo metu į sudrėkintą betono maišyklę supiltas cementas, užpildai ir $\frac{2}{3}$ vandens maišomi apie 2 minutes, o antrojo – supilamas likęs vandens kiekis su betono įmaišomis, mišinys maišomas apie 1 minutę. Reikia paminėti, kad naudojant klampą keičiančią įmaišą,

pasikeitė betono įmaišų dozavimo ciliškumas. Atsižvelgiant į tiriamą etapą, pirma buvo dozuojama klampa keičianti, o po jos – plastifikuojanti įmaiša.

2.6. Reologinių cemento tešlos ir betono mišinio savybių nustatymas

Plastinė betono mišinio klampa skaičiuota pagal autorių (Gumuliauskas ir Abromavičius, 2000) pateiktą 27 formulę, kuri neįvertina skirtingos paskirties betono įmaišų įtakos mišinio klampai. Todėl disertacijos autorius, remdamasis kitų autorių moksliniais tyrimais, kad cemento tešlos klamos kitimas tiesiogiai veikia ir paties betono mišinio plastinę klampą, papildė 27 formulę atitinkamu koeficientu ir pasiūlė patobulintą mišinio plastinės klamos skaičiavimo formulę (28). Tam plastinė cemento tešlos klampa buvo nustatyta rotaciniu viskozimetru „Rheotest RN4“. Tyrimų metu patalpos oro temperatūra buvo 20 ± 2 °C, o cemento tešlos – 20 ± 1 °C.

Tyrimui naudotą viskozimetą sudaro: matavimo įrenginys; besisukantis cilindras; matavimo talpykla su bandomos tešlos atrama; kontrolinio laido sąsajos su programine įranga; jungtis bei pagrindas.

Pagrindiniai rotacinio viskozimetro duomenys pateikti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Pagrindiniai rotacinio viskozimetro „Rheotest RN4“ duomenys

Duomenys	Reikšmė
Sukimosi momentas, mNm	0,1–150
Apsisukimo greitis, aps./min.	0–1000
Dažnis, Hz	0,001–10
Cemento tešlos kiekis matavimo talpykloje, ml	35
Bendra įrenginio masė, kg	13,5
Cilindro tipo matavimo sistemos masė, kg	1,5

Reologinės betono mišinių savybės suskaičiuotos pagal autoriaus (Skripkiūnas, 2007) (26) bei (27) formules.

Ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai skaičiuoti pagal formulę (26):

$$\tau_0 = \frac{0.00815 \cdot \rho_m}{\left(\sqrt{\frac{0.498}{30 - SL}} - 0.001724 - 0.024 \right)^2}; \quad (26)$$

čia: τ_0 – betono mišinio ribiniai šlyties įtempimai, nustatomi pagal mišinio slankumą; kPa; ρ_m – betono mišinio tankis, g/cm³; SL – betono mišinio slankumas, cm.

Plastinė betono mišinio klampa skaičiuota pagal formulę (27):

$$\eta_b = \eta_v \cdot \exp \left(\frac{\frac{a_c \cdot \rho_v}{\rho_v + \frac{V}{C} \cdot \rho_c - b_c \cdot \rho_v} + \frac{a_{sm} \left(1 - \varphi_{st} - \varphi_o - \frac{V}{\rho_v} - \frac{C}{\rho_c} \right)}{1 - \varphi_{st} - b_{sm} \left(1 - \varphi_{st} - \varphi_o - \frac{V}{\rho_v} - \frac{C}{\rho_c} \right)} + \frac{a_{st} \cdot \varphi_{st}}{1 - b_{st} \cdot \varphi_{st}} \right) \quad (27)$$

čia: η_v – dinaminė vandens klampa 20 °C temperatūroje, Pa·s; φ_o – oro kiekis betono mišinyje; V, C – vandens, cemento kiekiai betono mišinyje (1 m³); ρ_v, ρ_c – vandens ir cemento tankiai, kg/m³; $\varphi_{sm}, \varphi_{st}$ – tūrinis smulkiojo užpildo kiekio santykis skiedinyje ir tūrinis stambiojo užpildo kiekio santykis betono mišinyje; a_c, a_{sm}, a_{st} – koeficientai, įvertinantys cemento, smulkiojo ir stambiojo užpildų dalelių formą ($a_c = 2,6$; $a_{sm} = 2,5$; $a_{st} = 2,6$); b_c, b_{sm}, b_{st} – koeficientai, įvertinantys cemento, smulkiojo ir stambiojo užpildų dalelių išsidėstymo tankumą atitinkamai skiedinyje ir betono mišinyje.

Disertacijos autorius formulę (28) papildė $K_{skaič}$ koeficientu, kuris įvertina plastinės betono mišinio klampos pokytį, kai naudojama skirtingos paskirties betono įmaiša:

$$\eta_b = \eta_v \cdot \exp \left(\frac{\frac{a_c \cdot \rho_v}{\rho_v + \frac{V}{C} \cdot \rho_c - b_c \cdot \rho_v} + \frac{a_{sm} \left(1 - \varphi_{st} - \varphi_o - \frac{V}{\rho_v} - \frac{C}{\rho_c} \right)}{1 - \varphi_{st} - b_{sm} \left(1 - \varphi_{st} - \varphi_o - \frac{V}{\rho_v} - \frac{C}{\rho_c} \right)} + \frac{a_{st} \cdot \varphi_{st}}{1 - b_{st} \cdot \varphi_{st}} \right) \cdot K_{skaič} \quad (28)$$

čia: $K_{skaič}$ – koeficientas, įvertinantis plastinės betono mišinio klampos pokytį, kai naudojama skirtingos paskirties betono įmaiša bei skirtingas cemento masės kiekis.

Technologinės betono mišinio savybės nustatytos bandymais pagal Lietuvos standartus: slankumas – LST EN 12350-2, sklidumas – LST EN 12350-5; mišinio tankis – LST EN 12350-6, įtraukto oro kiekis mišinyje – LST EN 12350-7.

2.7. Betono bandinių paviršiaus kokybei vertinti formavimas

Skirtingų reologinių savybių betono mišiniai tolesniuose tyrimuose buvo naudoti, formuojant betono bandinių prizmes, kurių matmenys 0,2 × 0,2 × 1,2 m. Bendras jų paviršiaus plotas sudaro 1 m². Bandiniams formuoti panaudota kompanijos PERI klojinių sistema „LM0303S“, kurios vaizdas pateiktas 2.2 pav. Vienai bandinių serijai (vienos mišinio sudedamosios dalies kitimas) buvo bandomos 3 arba 4 mišinių sudėty. Paviršiaus oro porų kiekis skaičiuotas kaip keturių bandinio paviršių oro porų vidurkis. Ši klojinių sistema naudojama įrengiant monolitines betono konstrukcijas, kurių paviršiaus kokybei yra keliami aukšti reikalavimai.



2.2 pav. Klojinių sistema bandiniams formuoti (a) ir suformuotų betono bandinių prizmės (b)

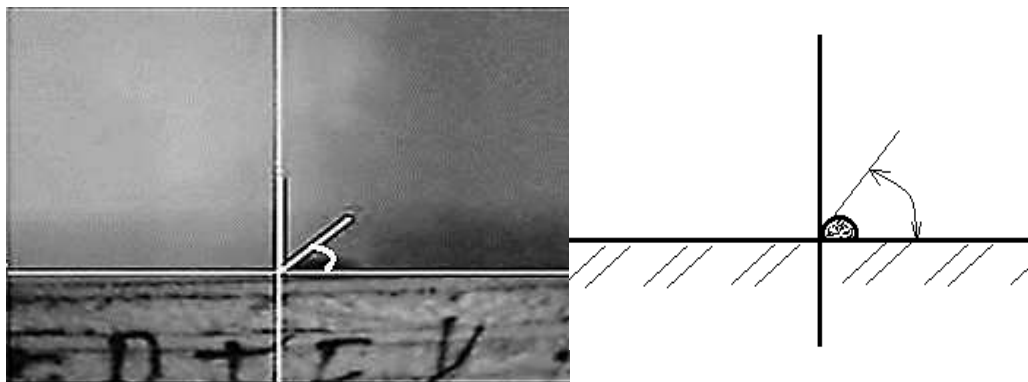
Tepalas klojinių paviršiui padengti pasirinktas, išmatavus kontaktinį vandens drėkinimo kampą. Tyrimams naudoti tepalai: mineralinių aliejų su priedais pagrindu „Ortolan SEP 711“ (pagaminta „MC-Bauchemie“) bei vandens emulsijos pagrindu „Rheofinish 215“ (pagaminta „BASF Construction Chemicals“) (2.5 lentelė). Klojinių tepalas „Rheofinish 215“ tinkamas monolitinėms betono konstrukcijoms įrengti, kai klojinių paviršius padengiamas tepalu iki betonavimo likus kelioms valandoms. Klojinių tepalas „Ortolan SEP 711“ naudojamas monolitinėms betono konstrukcijoms įrengti, kai tepalu padengtas klojinių paviršius gali būti iki kelių parų. Be to, klojinių tepalą „Rheofinish 215“ rekomenduojama naudoti, siekiant aukštos betono paviršiaus kokybės. Tyrimuose naudoti kompanijos PERI polimeru impregnuotos faneros klojinių fragmentai (bandiniai). Jie buvo padengti skirtingos rūšies klojinių tepalu.

Bandiniai buvo padengiami tepalu keliais etapais: paviršiuje paliekamas rekomenduojamas tepalo kiekis, tai yra nuvalant perteklių šluoste; paliekamas tepalo perteklius, nenuvalant jo (tepalas tepamas vieną kartą bandymo pradžioje). Tyrimas buvo atliekamas 6 paras, bandant išsiaiškinti, kaip kinta vandens lašo sklidimas skirtingu tepalu padengto bandinio paviršiuje. Kiekvieną bandymo parą buvo lašinamas naujas vandens lašas. Bandymai atlikti 20 ± 2 °C temperatūroje. Techniniai klojinių tepalų duomenys pateikti 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Techniniai klojinių tepalų duomenys

Eil. Nr.	Klojinių tepalas	Klojinių tepalo pavadinimas	Fizikinės ir cheminės savybės	Sąnaudos, ml/m ²
1.	Mineralinių aliejų su priedais pagrindu	„Ortolan SEP 711“	Mineraliniai aliejai su priedais; tirpalo tankis $\sim 0,85$ g/cm ³ .	apie 10–15 (įgeriančioms medžiagoms), apie 15–30 (neįgerianč.)
2.	Vandeninės tepalo emulsijos pagrindu	„Rheofinish 215“	Natūraliųjų riebiųjų rūgščių esterių alyvos pagrindu; tankis $\sim 0,96$ g/cm ³ .	apie 10–14 (lygus paviršius), apie 12–18 (grubus paviršius)

Tyrimuose naudoti kompanijos PERI polimeru impregnuotos faneros klojinių fragmentai (bandiniai). Naudotos kompiuterinės programos: bandiniams fotografuoti – „Photo impression 3 Arc soft“; drėkinimo kampui nustatyti – „Virtual protractor“. 2.3 pav. pavaizduotas kontaktinio vandens drėkinimo kampo matavimas.



Kampas su liestine 44°

2.3 pav. Kontaktinio vandens drėkinimo kampo matavimas

2.6 lent. pateikti drėkinimo kampo ($90-\alpha$) matavimo rezultatai. Žymėjimai: K – kontrolinis bandinys (be klojinių tepalo); RSP („Rheofinish 215“ su pertekliumi); RBP („Rheofinish 215“ be pertekliaus); OSP („Ortolan SEP 711“ su pertekliumi); OBP („Ortolan SEP 711“ be pertekliaus).

2.6 lentelė. Kontaktinio vandens drėkinimo kampo matavimų rezultatai

		0 parų		1 para		2 paros		3 paros		4 paros		5 paros		6 paros	
		α	$90 - \alpha$	α	$90 - \alpha$	α	$90 - \alpha$	α	$90 - \alpha$	α	$90 - \alpha$	α	$90 - \alpha$	α	$90 - \alpha$
Nr.	Band.														
1	K	3	87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	RBP	25	65	37	53	43	47	40	50	37	53	33	57	32	58
3	RSP	49	41	59	31	79	11	70	20	68	22	67	23	67	23
4	OBP	21	69	44	46	42	48	44	46	46	44	50	40	35	55
5	OSP	40	50	39	51	43	47	48	42	52	38	59	31	44	46

Iš 2.6 lent. pateiktų duomenų matyti, kad mažiausias vandens lašo liestinės kampas su horizontale, matuojant iš karto padengus tepalu, yra 41° . Ši vertė buvo gauta, naudojant vandens emulsijos tepalą, kai bandinio paviršiuje buvo jo perteklius. Tepalo perteklius klojinių paviršiuje turi įtakos sukietėjusio betono paviršiaus kokybei. Mineralinių aliejų su priedais pagrindu tepalo kiekio perteklius betono konstrukcijos paviršiuje suformuoja palyginti daug santykinai mažo skersmens oro porų. Todėl klojinių tepalo gamintojai nerekomenduoja naudoti jo pertekliaus. Naudojant gamintojų rekomenduojamą tepalo kiekį (be pertekliaus), vandens emulsijos pagrindu tepalu padengtame bandinio paviršiuje kontaktinio vandens drėkinimo kampo vertės gautos didesnės nei naudojant mineralinių aliejų su

priedais pagrindu tepalą. Iš pateiktos lentelės matyti, kad abu klojinių tepalai panašiai drėkina paviršių. Atsižvelgiant į kontaktinio vandens drėkinimo kampo verčių matavimo rezultatus, tolesniuose bandymuose klojinių paviršius buvo padengiamas tepalu „Rheofinish 215“. Klojinių paviršius buvo padengiamas purkštuvu, o tepalo perteklius šluostomas šluoste tol, kol klojinių paviršius ima blizgėti. Paruoštas betono mišinys į surinktą klojinių sistemą (2.2 pav.) buvo klojamas keliais etapais, kol užpildomas visas formos tūris (apie 48 litrus). Visais bandymo atvejais buvo stengiamasi išlaikyti tą patį formos užpildymo mišiniu etapų skaičių.

Į klojinių formą suklotas betono mišinys buvo tankinamas giluminiu vibratoriumi ENAR, kurio vibroelemento skersmuo 4 cm, masė 10 kg, dažnis 50 Hz. Tankinama tokia eiga: giluminis vibratorius vertikaliai kryptimi žemyn įvedamas į betono mišinį ir vertikaliai laikomas, kol uždarytas oras nustoja kilti į paviršių, o po tankinimo vibratorius lėtai ištraukiamas iš mišinio. Visais atvejais buvo stengiamasi išlaikyti vienodą mišinio tankinimo trukmę, tai yra apie 8 s.

Suformuoti betono bandiniai buvo laikomi patalpoje, kurios oro temperatūra 20 ± 3 °C, tris paras. Po trijų parų išformuoti bandiniai buvo laikomi atskiroje patalpoje tokioje pačioje temperatūroje. Suformavus reikiamą bandinių partiją, buvo vertinama betono bandinių paviršiaus kokybė.

2.8. Betono paviršiaus kokybės vertinimo metodika

Betono paviršiaus kokybei vertinti pasirinkta programinė įranga „BetonGUI 2.0“. Ja dirbta mokslinės stažuotės metu (2013 metų kovo–birželio mėn.) Norvegijos mokslo ir technologijų universitete, SINTEF padalinyje. Dalyvaujant moksliniame projekte COIN FA 2.1 „Highly flowable concrete with controlled surface“, buvo derinta programa bei tyrinėtąs programos ir realių duomenų atitikimas. Pati programa bei metodika buvo kurti SINTEF laboratorijoje. Stažuotės metu betono paviršiaus kokybės nustatymo metodika buvo derinama dviejuose objektuose, esančiuose Norvegijoje, Trondheimo mieste. Pirmasis – „Realfagbygget“, vienas iš Norvegijos mokslų ir technologijos universiteto fakultetų, kurio sienos įrengtos iš architektūrinio monolitinio betono. Šiame objekte buvo atliekami betono paviršiaus kokybės tyrimai, analizuojant paviršines oro poras, nustatant jų kiekį bei dydį. Antrasis objektas – požeminis tunelis „Strindheim“. Jo ilgis siekia apie 8 km, o konstrukcijos surinktos iš gamykloje pagamintų gelžbetonio elementų. Šiame objekte buvo atliekami tyrimai, susiję su betono paviršiaus atspalvio analize.

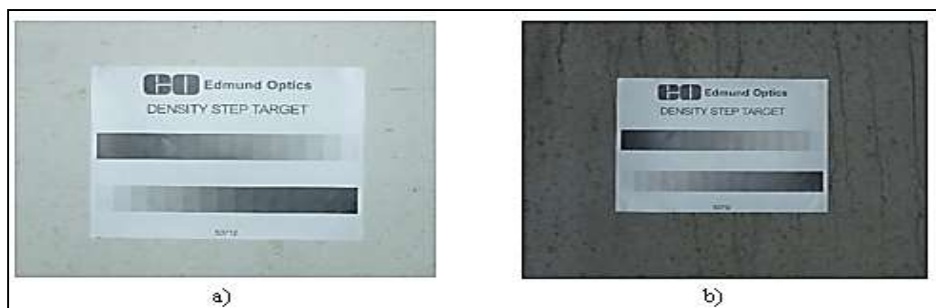
Betono paviršinių oro porų analizei, jų kiekiui bei dydžiui nustatyti naudota įranga:

- fotoaparatas „Nikon D3200“;
- fotoaparato objektyvas „Nikon DX AF-S NIKKOR 18-55“;
- blykstė „Quantum“;
- blykštės šviesos difuzorius „PhotoFlex LiteDome Q39 soft box medium“;
- baltos spalvos kalibravimo lapas „Lastolite“.

Matricos jautrumas (ISO) – keisdami fotoaparate šią reikšmę, keičiame matricos jautrumą. Kuo didesnė ši reikšmė, tuo jautriau matrica reaguoja į šviesą, o tai reiškia, kad fotoaparatas užfiksuos net kelis spindulėlius, o esant mažiausiai

reikšmei, tik didesnis šviesos srautas paveiks matricą. Naudojant dideles ISO reikšmes pasireiškia „triukšmas“ nuotraukose. Taigi dideles ISO reikšmes patartina naudoti tik esant blogam apšvietimui – patalpose, naktį, kai negalima naudoti blykstės (Peterson, 2008). Tyrimuose parinkta ISO reikšmė buvo pastovi ir nustatyta ties mažiausia ISO 100 riba.

Optimalūs fotografavimo įrangos parametrai, matuojant betono paviršiaus paviršinių oro porų kiekį, nustatyti bandymų metu, buvo žiūrima, kad nuotraukoje „Edmund Optics“ pilkumo skalės lapas kuo mažiau atspindėtų šviesą (2.4 pav.).



2.4 pav. „Edmund Optics“ pilkumo skalės lapo atspindėta šviesa: a – skalė stipriai atspindi šviesą; b – skalė mažiau atspindi šviesą.

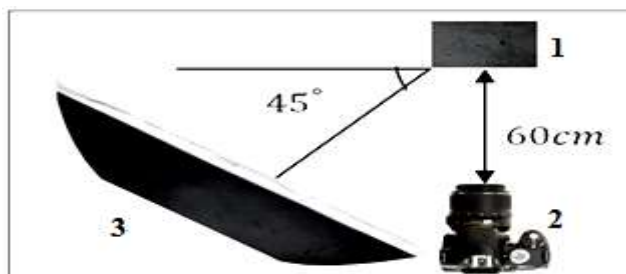
Pagrindinis uždavinys, nustatant optimalius fotografavimo parametrus, parinkti juos tokius, kad pilkumo skalės lapas kuo mažiau atspindėtų šviesą (tai turi įtakos galutiniams rezultatams), nufotografuotas betono paviršiaus atspalvis neimtų tamsėti ir nepradėtų skirtis nuo realaus. Optimalūs fotografavimo įrangos parametrai buvo pritaikyti, neatsižvelgiant į skirtingą aplinkos apšvietimą. Šiuo atveju blykstės paskirtis yra eliminuoti aplinkos apšvietimą. 2.7 lentelėje pateikti optimalūs fotografavimo įrangos parametrai, naudoti tolesniuose bandymuose.

2.7 lentelė. Optimalūs fotografavimo įrangos parametrai

Fotografavimo įrangos parametrai, reikšmė			
Diafragmos plyšio plotis, F	Ekspozicijos laikas, s	Matricos jautrumas, ISO	Blykstės intensyvumas, GN
8	1/160	100	15

Matuojant oro porų kiekį betono paviršiuje, blykstė nukreipta apytiksliai 45° kampų į fotografuojamą objektą 0,5 m atstumu nuo jo. Fotografuojant atstumas nuo objekto (nagrinėjamo paviršiaus) iki fotoaparato buvo pastovus ir lygus 0,6 m.

Fotoaparato bei blykstės išdėstymas, analizuojant paviršines oro poras, pateiktas 2.5 pav.



2.5 pav. Fotoaparato bei blykstės išdėstymas, analizuojant betono paviršiaus oro poras: 1 – fotografuojamas paviršius; 2 – fotoaparatas; 3 – blykstė bei šviesos srauto skleistuvas.
Atstumas tarp fotoaparato bei nagrinėjamo paviršiaus – 60 cm.

Betono paviršiaus kokybei (oro porų skaičiui) nustatyti naudota Norvegijos mokslininkų sukurta programa „BetonGUY 2.0“. Leidimas naudoti ją gautas atliekant mokslinę stažuotę bei dalyvaujant projekte COIN FA2.1 „Robust and highly flowable concrete with controlled surface quality“.

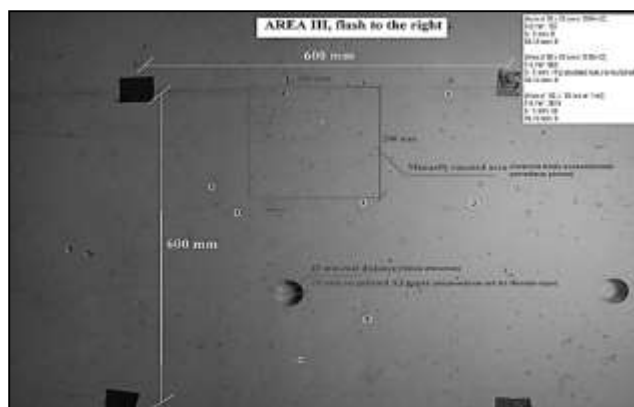
Programos patikimumui bei rezultatų atitikimui realiai išmatuotiems įvertinti reikėjo atlikti vizualų betono paviršinių oro porų skaičiavimą.

Paviršinių oro porų nustatymo rezultatai tikrinti Norvegijos mokslų ir technologijos universiteto pastate. Jo monolitinėms sienoms įrengti buvo naudotas betono mišinys su baltuoju cementu, todėl jo pilkumo skalės patikimumo rezultatai nebuvo tikrinti. 2.6 pav. pateiktas šio pastato monolitinių sienų fragmentas.



2.6 pav. „Realfagbygget“ pastato monolitinės sienos fragmentas

Kaip matyti iš 2.6 pav., buvo nagrinėjamas tam tikras betono paviršius (60×60 cm – $0,36$ m² plotas). Betono paviršinėms oro poroms skaičiuoti pasirinkta viena devintoji šio ploto, tai yra $0,04$ m² (20×20 cm) (2.7 pav.).



2.7 pav. Betono paviršinių oro porų analizė

Buvo nagrinėjamos dvi atskiros monolitinių sienų vietos, kurios pažiūrėti skyrėsi savo paviršiaus kokybe. Fotografuojant vieną paviršiaus plotą, blykstė buvo pastatoma iš kairės, o kitu atveju – iš dešinės pusės 45° kampu su fotografuojama siena (2.7 pav.). Blykstės atstumas nuo fotografuojamo objekto neviršijo 0,5 m.

Betono paviršiaus kokybė buvo vertinama atsižvelgiant į 2.8 lentelėje pateiktą informaciją (Eide, Kaspersen, Vikan ir Schulerud, 2011).

2.8 lentelė. Betono paviršiaus klasė pagal didžiausią porų skaičių į m²

Betono paviršiaus klasė, didžiausias porų skaičius į m ²						
Porų skersmuo, mm	A	B	C	D	E ¹	0 ²
1–5	250	800	2500	5000	-	-
5–10	5	20	50	100	-	-
10–15	1	5	10	20	-	-

Pastabos: 1 – pagal specifinius projekto reikalavimus;

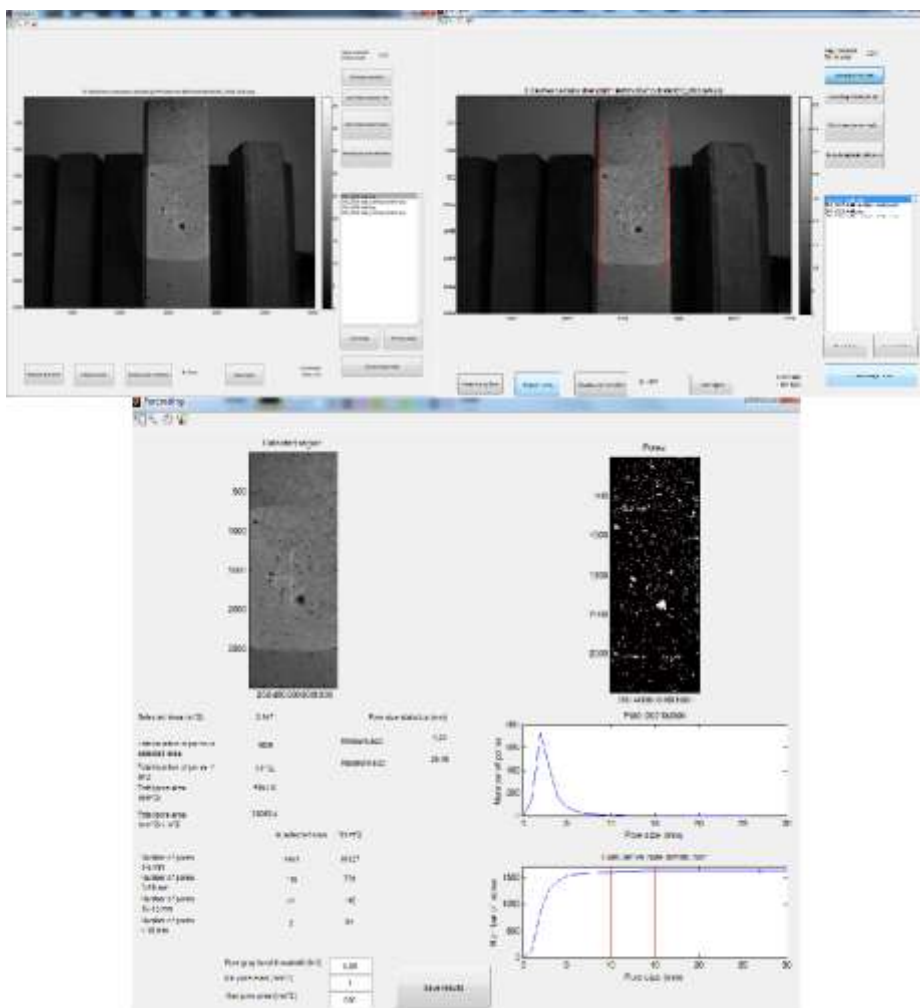
2 – nekeliami jokie reikalavimai.

Kaip matyti iš 2.8 lentelės, betono paviršiai pagal kokybę, atsižvelgiant į paviršinių oro porų kiekį, skirstomi į 5 pagrindines klases: A, B, C, D, 0² bei E¹ – pagal specifinius projekto reikalavimus. Šioje klasifikacijoje A – betono paviršiaus kokybei keliama ypach aukšti reikalavimai, 0² – nekeliami jokie reikalavimai. Betono paviršinės oro poros buvo randamos vizualiai 20 × 20 cm betono paviršiaus plote. Jame pagal mastelį buvo skaičiuojamos 1–5 mm didžiausio matmens oro poros. Gautas rezultatas proporcingai padidintas 1 m² paviršiaus ploto. 5–10 mm didžiausio matmens oro poros buvo suskaičiuotos 60 × 60 cm betono paviršiaus plote, rezultatas taip pat proporcingai padidintas 1 m² paviršiaus ploto. 10–15 mm didžiausio matmens oro poros nebuvo aptiktos šiuose tyrimuose. Gauti rezultatai pateikti 2.9 lentelėje.

2.9 lentelė. Betono paviršinių oro porų kiekis m² ploto

Betono paviršinių oro porų kiekis m ² , vnt.												
Skaiciuota autoriaus							Vertinta kompiuterine programa „BetongGUY, threshold: 0,90 – 0,92“					
	Fotoaparato blykstė kairėje, nukreipta 45° kampu			Fotoaparato blykstė dešinėje, nukreipta 45° kampu			Fotoaparato blykstė kairėje, nukreipta 45° kampu			Fotoaparato blykstė dešinėje, nukreipta 45° kampu		
	Porų skersmuo, mm			Porų skersmuo, mm			Porų skersmuo, mm			Porų skersmuo, mm		
Betono paviršius I	1–5	5–10	10–15	1–5	5–10	10–15	1–5	5–10	10–15	1–5	5–10	10–15
	975	5	0	975	5	0	977	5	0	994	5	0
Įvert.	C			C			C			C		
Betono paviršius II	1–5	5–10	10–15	1–5	5–10	10–15	1–5	5–10	10–15	1–5	5–10	10–15
	2275	33	0	2675	33	0	2518	33	0	2768	33	0
Įvert.	C			D			D			D		

Iš 2.9 lentelės matyti, kad oro porų skaičius, nustatytas autoriaus bei įvertintas programa „BetongGUY 2.0“, nesiskiria daugiau kaip 10 %. Taip pat reikia paminėti, kad atliekant šiuos tyrimus su programa „BetongGUY 2.0“, pilkumo slenkstis arba riba („Threshold“) buvo nustatyta, esant 0,90–0,92. 2.9 pav. pateiktas betono paviršiaus kokybės vertinimo vaizdas programa „BetongGUY 2.0“.



2.9 pav. Programa „BetongGUY 2.0“ vertinta betono paviršiaus kokybė

Betono paviršiaus oro porų skaičiui įvertinti naudotas fotonuotraukos RAW formatas. Nuotrauka įkelta bei apdorota programa „BetongUY 2.0“. Joje nustatytas bandinio mastelis, tai yra pažymima viena jo kraštinė su žinomais matmenimis. Pagal turimus duomenis programa nustato paviršinių oro porų skaičių bei jų dydį.

3. REOLOGINĖS BETONO MIŠINIO SAVYBES LEMIANTYS VEIKSNIAI

3.1. 0/1 ir 0/4 fr. smėlių kiekių santykio smulkiajame užpilde įtaka reologinėms mišinio savybėms

Smulkiojo užpildo (smulkiosios frakcijos) kiekio įtakai reologinėms betono mišinio savybėms įvertinti buvo keičiama pasirinkta kontrolinė betono mišinio sudėtis (žr. 2.1 pav.) ir parinktos šešios įprastinio betono mišinio sudėtys (žym.

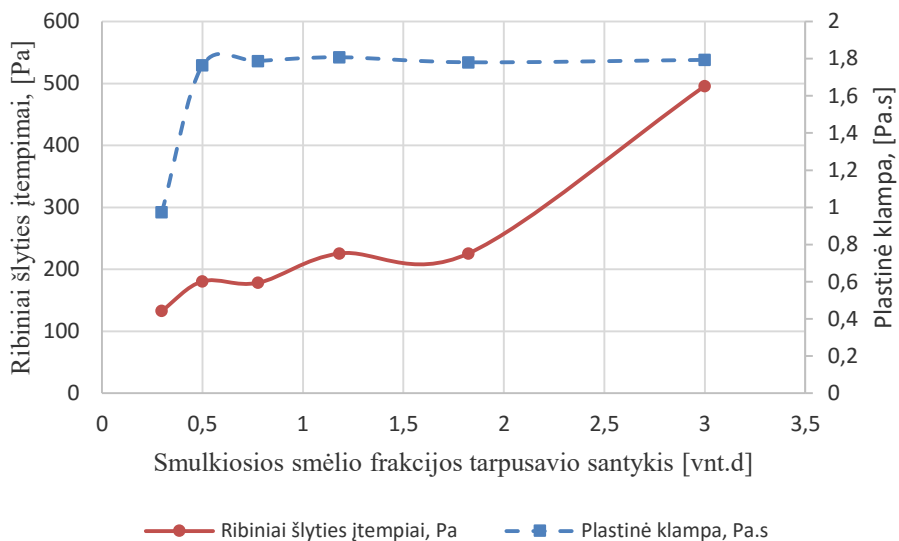
BA1-0–BA1-5). Modifikuojant kontrolinę betono mišinio sudėtį, buvo keičiamas 0/1 bei 0/4 frakcijos smėlių kiekio santykis smulkiajame užpildų mišinyje: 0,11/0,37 (0,297); 0,16/0,32 (0,50); 0,21/0,27 (0,78); 0,26/0,22 (1,18); 0,31/0,17 (1,82); 0,36/0,12 (3,00). 3.1 lentelėje pateiktos betono mišinių sudėtys bei technologinių mišinių savybių (įtraukto oro kiekio mišinyje, slankumo bei mišinio tankio) vidutinės vertės.

3.1 lentelė. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plast. įmaiš. kiekis, l	V/C
1	2	3	4	5	6	7	8
BA1-0	330	178	986	701	208	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,5		>220 (270)				2380
BA1-1	330	178	986	607	303	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,3		>220 (260)				2310
BA1-2	330	178	986	512	398	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,1		>220 (260)				2330
BA1-3	330	178	986	417	493	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,1		>220 (250)				2310
BA1-4	330	178	986	322	588	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,5		>220 (250)				2310
BA1-5	330	178	986	227	682	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,9		200				2320

Iš 3.1 lentelės matyti, kad didėjant 0/1 frakcijos smėlio kiekiui smulkiajame užpildų mišinyje, betono mišinio slankumas kinta nuo 270 iki 200 mm; oro kiekis mišinyje – nuo 4,5 iki 4,9 %; mišinio tankis – nuo 2380 iki 2320 kg/m³. Mišinio konsistencija pagal LST EN 12350-2:2009 standarto reikalavimus slankumo klasei kito nuo S5 (≥220 mm) iki S4 (nuo 160 iki 210 mm). Didinant 0/1 frakcijos smėlio kiekio santykį smulkiajame užpildų mišinyje, oro kiekis mišinyje padidėja apie 8,9 % (BA1-5), o mišinio tankis sumažėja 2,52 % (BA1-5), palyginti su kontroline sudėtimi (BA1-0).

Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo 0/1 ir 0/4 frakcijos smėlių tarpusavio santykio smulkiajame užpildų mišinyje pateikta 3.1 pav.



3.1 pav. Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo 0/1 ir 0/4 frakcijos smėlių santykio smulkiajame užpildų mišinyje

Iš 3.1 pav. pateiktų kreivių matyti, kad ribiniai įprastinio betono mišinio šlyties įtempimai bei plastinė mišinio klampa didėja, didėjant 0/1 bei 0/4 frakcijos smėlių santykiui, nuo 0,11/0,37 (BA1-0) iki 0,36/0,12 (BA1-5). Plastinė mišinio klampa žymiai padidėja (apie 1,8 karto), smėlių santykiui padidėjus nuo 0,11/0,37 (BA1-0) iki 0,16/0,32 (BA1-1), o ribiniai šlyties įtempimai padidėja apie 1,36 karto, smėlių santykiui padidėjus nuo 0,11/0,37 (BA1-0) iki 0,16/0,32 (BA1-1). Padidėjus 0/1 frakcijos smėlio kiekiui smulkiajame užpildų mišinyje bei esant pastovioms kitoms mišinio sudedamosioms, smulkesnio smėlio paviršiui sudrėkinti reikia daugiau vandens mišinyje. Tokiu atveju, sumažėjus laisvo vandens kiekiui, betono mišinyje pradeda didėti vidinė trintis tarp užpildų dalelių, dėl to didėja plastinė klampa bei ribiniai šlyties įtempimai.

Danijos technologijos universitete (DTU) atlikti tyrimai, kuriuose reologinės susitankinančio betono mišinio savybės buvo siejamos su sukietėjusio betono paviršiaus kokybe. Aukštos kokybės betono paviršiai gauti tada, kai ribiniai mišinio šlyties įtempimai buvo maži. Taip pat, norint gauti tinkamą betono paviršiaus kokybę, smulkiųjų dalelių kiekis ($<0,25$ mm) mišinyje turi būti didinamas, o plastinė klampa turi būti tokia, kad betono mišinys būtų plastiškas ir iš jo neišsiskirtų vanduo. Autorių nustatytos susitankinančio betono mišinio savybių tendencijos paviršiaus kokybei buvo pritaikytos įprastiniam betono mišiniui. Todėl atsižvelgiant į DTU mokslininkų nustatytas reologinių susitankinančio mišinio savybių ir paviršiaus kokybės tendencijas (3.1 pav.), tolesniems tyrimams pasirinkta betono mišinio sudėtis BA1-1, kurioje smėlių (0/1 ir 0/4 fr.) santykis yra 16/32 (0,50). Šiuo atveju ribiniai šlyties įtempimai buvo lygūs 180,54 Pa, o plastinė klampa – 1,76 Pa·s. Todėl nagrinėjant smulkiojo užpildo kiekio įtaką reologinėms mišinio

savybėms, minėta sudėtis (BA1-1) buvo pasirinkta tolesniems tyrimams ir modifikuojama, keičiant kitas mišinio sudedamąsias dalis.

3.2. Stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio santykio įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

Nustatant stambiojo užpildo santykio su bendru mišinio užpildu įtaką reologinėms savybėms, toliau buvo modifikuojama BA1-1 mišinio sudėtis bei parinktos septynios įprastinio betono mišinio sudėtys (BA2-0–BA2-6). Modifikuojant betono mišinio sudėtį, buvo keičiamas stambiojo užpildo (4/16 frakcijos žvirgždas) kiekis bendrame užpildų mišinyje: 0,22; 0,32; 0,42; 0,52; 0,62; 0,72; 0,82. 3.2 lent. pateiktos betono mišinių sudėtys bei mišinių technologinių savybių vidutinės vertės.

3.2 lentelė. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

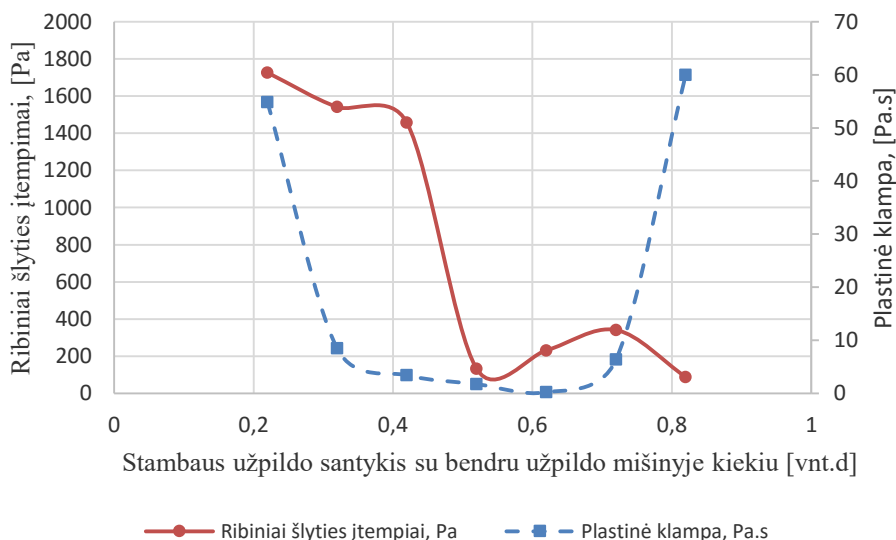
Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik. įmaišos kiekis (1,2 %), l	V/C
1	2	3	4	5	6	7	8
BA2-0 (BA1-1)	330	178	986	607	303	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,3		>220 (260)				2360
BA2-1	330	178	796	733	366	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,6		60				2320
BA2-2	330	178	607	860	429	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	6,2		40				2210
BA2-3	330	178	417	986	492	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	5,5		10				2130
BA2-4	330	178	1175	480	240	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	1,4		>220 (250)				2370

3.2 lentelės tęsinys. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik. įmaišos kiekis (1,2 %), l	V/C
BA2-5	330	178	1365	354	177	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	0,9		>220 (230)				2400
BA2-6	330	178	1554	228	114	3,74	0,54
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	0,9		>220 (280)				2420

Iš 3.2 lentelės matyti, kad didėjant 4/16 frakcijos žvirgždo kiekiui, betono mišinio slankumas kinta nuo 10 iki 280 mm; oro kiekis mišinyje – nuo 0,9 iki 6,2 %; mišinio tankis – nuo 2210 iki 2420 kg/m³. Mišinio konsistencija pagal slankumo klasę kito nuo S1 (nuo 10 iki 40 mm) iki S5 (≥220 mm). Didėjant 4/16 frakcijos žvirgždo kiekiui, oro kiekis mišinyje sumažėja apie 6,1 karto (BA2-6), o mišinio tankis padidėja apie 1,136 karto (BA2-6), palyginti su kontroline sudėtimi (BA2-3). Kai 4/16 frakcijos žvirgždo santykis su bendru užpildo kiekiu sudaro 0,62, 0,72 bei 0,82, betono mišiniai tampa netechnologiški, tai yra stebimas žymus vandens atsiskyrimas iš mišinio.

Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo 4/16 frakcijos žvirgždo kiekio santykio bendrame užpildų mišinyje pateikta 3.2 pav.



3.2 pav. Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo 4/16 frakcijos žvirgždo kiekio bendrame užpildų mišinyje

Iš 3.2 pav. pateiktų kreivių matyti, kad ribiniai įprastinio betono mišinio šlyties įtempimai gerokai sumažėja (apie 11 kartų), padidėjus 4/16 frakcijos žvirgždo santykiui nuo 0,42 (BA2-1) iki 0,52 (BA2-0). Tuo metu plastinė mišinio klampa sumažėja apie 6,52 karto, padidėjus 4/16 frakcijos žvirgždo santykiui bendrame užpildų mišinyje nuo 0,22 (BA2-3) iki 0,32 (BA2-2). Vėliau stebimas didelis mišinio plastinės klamos augimas (apie 9,52 karto), kai 4/16 frakcijos žvirgždo santykis bendrame užpildų mišinyje padidėja nuo 0,72 (BA2-5) iki 0,82 (BA2-6). Padidėjus 4/16 frakcijos žvirgždo kiekiui bendrajame užpildų mišinyje bei esant pastovioms kitoms mišinio sudedamosioms, klamos padidėjimui įtakos turėjo skiedinio dalies, užtikrinančios tinkamą kietosios fazės dalelių praskyrimą mišinyje, trūkumas. Kai yra nepakankamas stambaus užpildo dalelių praskyrimas mišinyje, 4/16 frakcijos žvirgždo dalelės, kontaktuodamos tarpusavyje, žymiai padidina vidinę trintį tarp užpildų, dėl to gerokai padidėja plastinė mišinio klampa bei mišinio pasipriešinimas tekėjimui.

Vadovaujantis ankstesne prielaida bei atsižvelgiant į tai, kad esant 4/16 frakcijos žvirgždo santykiui su bendru užpildo kiekiu 0,62, 0,72 bei 0,82, betono mišiniai tampa netechnologiški, betono mišinio sudėtis BA2-0 pasirinkta tolesniems tyrimams ir modifikuojama, keičiant kitas mišinio sudedamąsias dalis. BA2-0 mišinio sudėties ribiniai šlyties įtempimai yra lygūs 180,54 Pa, o plastinė klampa 1,76 Pa·s.

3.3. Smulkiųjų dalelių kiekio įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

Nagrinėjant smulkiųjų dalelių (cemento kartu su smėlio dalelėmis iki 0,25 mm) kiekio įtaką reologinėms betono mišinio savybėms, toliau keista BA2-0 mišinio sudėtis bei parinktos septynios įprastinio betono mišinio sudėtys (BA3-0 – BA3-6). Modifikuojant betono mišinio sudėtį, buvo keičiami cemento ir smulkiųjų dalelių kiekiai mišinyje. Cemento: 180 kg; 230 kg; 280 kg; 330 kg; 380 kg; 430 kg; 480 kg. Smulkiųjų dalelių: 401,86 kg; 441,36 kg; 480,96 kg; 520,46 kg; 559,96 kg; 599,56 kg; 639,06 kg. Smulkiojo užpildo 0/1 bei 0/4 frakcijos smėlių tarpusavio santykis nekito ir buvo lygus 0,33/0,67, o stambiojo užpildo kiekis sudarė 0,52 nuo bendrų užpildų kiekio. Reikia pažymėti, kad, keičiantis cemento kiekiui, atitinkamai keitėsi ir plastifikuojančios įmaišos kiekis. 3.3 lent. pateiktos betono mišinių sudėtys bei mišinių technologinių savybių vidutinės vertės.

3.3 lentelė. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik. įmaiš. kiekis, l	V/C
1	2	3	4	5	6	7	8
	330	178	986	607	303	3,74	0,54
BA3-0 (BA2-0)	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,3		>220 (260)				2360

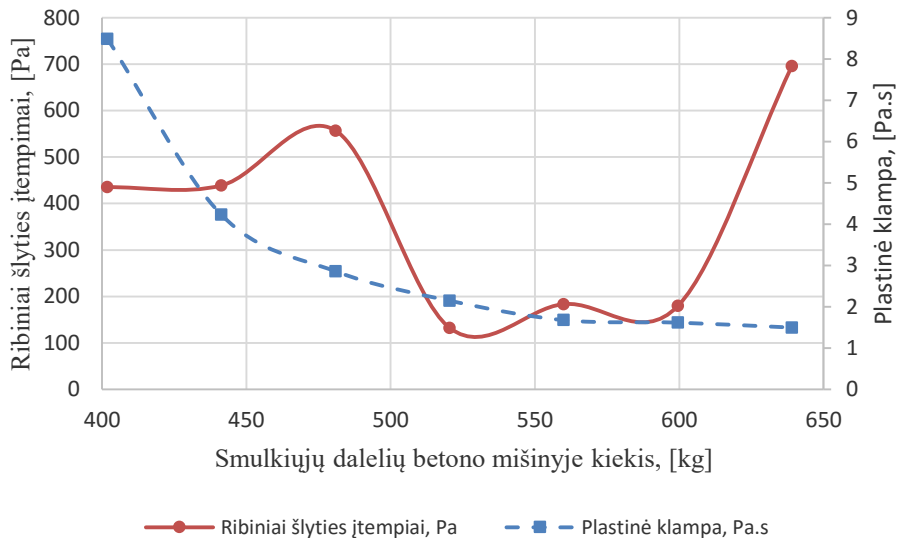
3.3 lentelės tęsinys. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik. įmaiš. kiekis, l	V/C
	280	178	986	640	320	3,17	0,64
BA3-1	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	3,5		190				2330
	230	178	986	674	336	2,60	0,77
BA3-2	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	3,4		210				2320
	180	178	986	707	353	2,04	0,99
BA3-3	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	2,4		210				2300
	380	178	986	574	286	4,30	0,47
BA3-4	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	3,3		>220 (260)				2400
	430	178	986	540	270	4,87	0,41
BA3-5	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	3,1		>220 (260)				2350
	480	178	986	507	253	5,43	0,37
BA3-6	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	3,6		170				2390

Iš 3.3 lentelės matyti, kad didėjant smulkiųjų dalelių kiekiui (cementas + smėlio dalelės iki 0,25 mm) mišinyje, slankumas kinta nuo 170 iki 290 mm; oro kiekis mišinyje – nuo 2,4 iki 4,3%; tankis – nuo 2300 iki 2400 kg/m³. Mišinio konsistencija pagal slankumo klasę kito nuo S4 (nuo 160 iki 210 mm) iki S5 (≥220 mm). Mažiausias oro kiekis mišinyje 2,4 % (BA3-3) bei mišinio tankis 2300 kg/m³ gautas, esant smulkiųjų dalelių kiekiui apie 402 kg 1 m³ mišinio.

Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo smulkiųjų dalelių kiekio mišinyje pateikta 3.3 pav. Iš kreivių matyti, kad ribiniai įprastinio betono mišinio šlyties įtempimai padidėja (apie 1,2 karto), padidėjus smulkiųjų dalelių kiekiui mišinyje nuo 402 kg (BA3-3) iki 481 kg (BA3-1) 1 m³ mišinio. Padidėjus smulkiųjų dalelių kiekiui mišinyje iki 520 kg (BA3-0), ribiniai mišinio šlyties įtempimai žymiai sumažėja (apie 4,2 karto). Toliau didinant smulkiųjų dalelių kiekį mišinyje iki 639 kg (BA3-6), ribiniai šlyties įtempimai pradeda didėti ir pasiekia didžiausią reikšmę (apie 700 Pa). Tuo metu plastinė mišinio klampa palaipsniui mažėja, didėjant smulkiųjų dalelių kiekiui mišinyje nuo 402 kg (BA3-3) iki 639 kg (BA3-6) 1 m³ mišinio, tai yra mišinio klampa sumažėja apie 5,59 karto. Padidėjus smulkiųjų dalelių kiekiui (cementas + smėlio dalelės iki 0,25 mm) mišinyje, atitinkamai kintant plastifikuojančios įmaišos kiekiui, V/C santykiui bei esant

pastovioms kitoms mišinio sudedamosioms, betono mišinio plastinės klamos mažėjimas siejamas su cemento tešlos kiekio padidėjimu mišinyje, dėl to stambieji užpildai mažiau kontaktuoja vieni su kitais, mažėja vidinė tarpusavio trintis bei pasipriešinimas mišinio tekėjimui. Be to, plastifikuojančios įmaišos kiekio didėjimas mišinyje turėjo įtakos ir cemento tešlos, kartu ir betono mišinio, klamos mažėjimui. Tokiu atveju, sumažėjus vidinei užpildų trinciai, reikalingi mažesni šlyties įtempiai, kuriems esant betono mišinys pradeda tekėti.



3.3 pav. Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo smulkiųjų dalelių kiekio

Šiuo atveju, atsižvelgiant į ankstesnę prielaidą, betono mišinio sudėtis BA3-4, kurios ribiniai šlyties įtempimai yra 183,60 Pa, o plastinė klampa 1,683 Pa·s, buvo pasirinkta tolesniems tyrimams ir modifikuojama, keičiant kitas mišinio sudedamąsias dalis. Vadinasi, 560 kg 1 m³ mišinio smulkiųjų dalelių kiekis priimamas kaip racionalus. Toliau didinant smulkiųjų dalelių kiekį iki 639 kg 1 m³ mišinio, žymiai padidėja ribiniai šlyties įtempimai. Jiems didėjant, mažėja betono mišinio plastiškumas. Mažinant smulkiųjų dalelių kiekį nuo 560 kg iki 402 kg 1 m³ mišinio, mišiniai tampa netechnologiški, pradeda atsiskirti vanduo.

3.4. Įmaišų įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

Pagal 2.6 skyriuje pateiktą 28 formulę buvo suskaičiuota betono mišinio klampa, įvertinant skirtingos paskirties betono įmaišų įtaką mišinio klampai. Minėtoje formulėje atsirado koeficientai, įvertinantys betono mišinio plastinės klamos pokytį, kai naudojama skirtingos paskirties betono įmaiša bei skirtingas jos kiekis. Klamos pokyčio koeficientas ($K_{\text{skaič}}$) buvo skaičiuojamas kaip cemento tešlos be įmaišos klamos santykis su cemento tešlos klampa, kai naudojama atitinkamos paskirties betono įmaiša.

3.4 lentelė. Koeficientai, įvertinantys betono mišinio plastinės klamos pokytį, kai naudojama skirtingos paskirties betono įmaiša bei skirtingas cemento masės kiekis

Eil. Nr.	Įmaišos kiekis, %	Cemento tešlos plastinė klampa, Pa·s	Klamos pokyčio koeficientas, K _{skaic}
Plastifikuojanti įmaiša			
1.	0	0,506	-
2.	0,6	0,0930	0,184
3.	0,8	0,0928	0,183
4.	1,0	0,0430	0,085
5.	1,2	0,039	0,077
6.	1,4	0,039	0,077
7.	1,6	0,043	0,085
Plastifikuojanti įmaiša (1,4 %) ir mišinyje susiformavusias tuštumas naikinti įmaiša			
1.	0	0,039	0,077
2.	0,05	0,043	0,085
3.	0,1	0,036	0,071
4.	0,15	0,043	0,085
5.	0,20	0,043	0,085
6.	0,25	0,043	0,085
7.	0,30	0,032	0,063
Plastifikuojanti įmaiša (1,4 %) ir klampą keičianti įmaiša			
1.	0	0,039	0,077
2.	0,1	0,032	0,063
3.	0,3	0,032	0,063
4.	0,5	0,032	0,063
5.	0,7	0,032	0,063
6.	0,9	0,034	0,067
7.	1,1	0,046	0,091
Plastifikuojanti įmaiša (1,4 %) ir orą įtraukianti įmaiša			
1.	0	0,039	0,077
2.	0,05	0,029	0,057
3.	0,1	0,029	0,057
4.	0,15	0,029	0,057
5.	0,20	0,029	0,057
6.	0,25	0,03	0,059
7.	0,30	0,032	0,063

Plastifikuojančios įmaišos įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

Nagrinėjant plastifikuojančios įmaišos įtaką reologinėms betono mišinio savybėms (2.3 lentelė), toliau buvo modifikuojama BA3-4 mišinio sudėtis bei parinktos šešios betono mišinio sudėtys (BA4-0–BA4-6). Modifikuojant betono mišinio sudėtį, buvo keičiamas plastifikuojančios įmaišos kiekis cemento masėje procentais: 0,6 %; 0,8 %; 1,0 %; 1,2 %; 1,4 %; 1,6 %; 1,8 %. Smulkaus užpildo 0/1 bei 0/4 fr. smėlių tarpusavio santykis (bendro užpildų kiekio atžvilgiu) buvo pastovus ir lygus 0,33/0,67; stambiojo užpildo kiekio santykis – 0,52; cemento kiekis – 380 kg 1 m³ mišinio. 3.5 lent. pateiktos betono mišinių sudėtys bei jų technologinės savybės.

Iš 3.5 lentelės matyti, kad didėjant plastifikuojančios įmaišos kiekiui nuo 0,6 iki 1,8 % cemento masės, betono mišinio slankumas padidėja nuo 140 iki 270 mm; oro kiekis mišinyje sumažėja – nuo 4,8 iki 1,9 %; mišinio tankis padidėja – nuo 2360 iki 2400 kg/m³. Mišinio konsistencija pagal slankumo klasę kito nuo S3 (nuo 100 iki 150 mm) iki S5 (≥220 mm). Didėjant plastifikuojančios įmaišos kiekiui nuo 0,6 iki 1,8 % cemento masės, oro kiekis mišinyje sumažėja apie 3 kartus. Kai įmaišos kiekis yra didesnis nei 1,4 % cemento masės, betono mišinys tampa netechnologiškas, iš mišinio pradeda išsiskirti vanduo.

3.5 lentelė. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

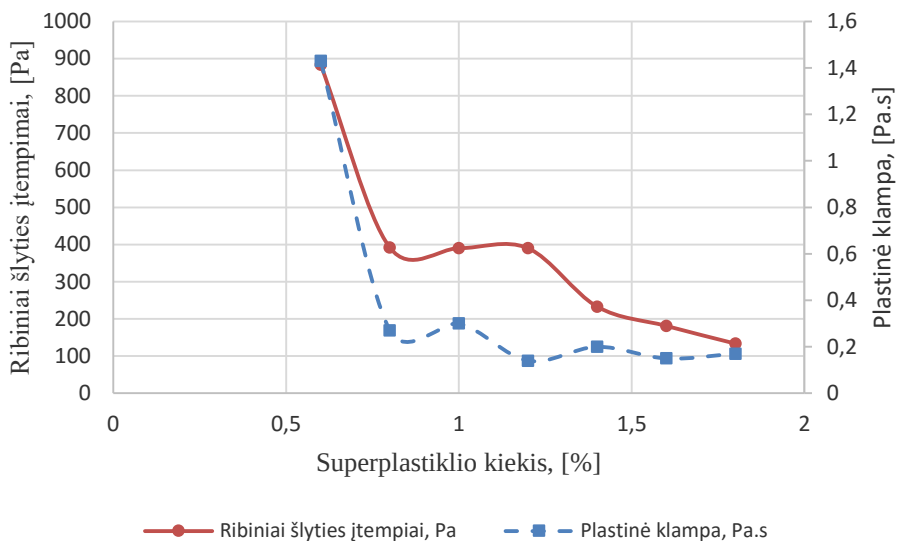
Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik. įmaiš. kiekis, l	V/C
BA4-0 (BA3-4)	380	178	986	574	286	4,30 (1,2 %)	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	3,30		>220 (260)				2400
BA4-1	380	178	986	574	286	4,03 (1,0 %)	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	3,50		220				2360
BA4-2	380	178	986	574	2,86	2,87 (0,8 %)	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,40		>220 (240)				2390
BA4-3	380	178	986	574	2,86	2,15 (0,6 %)	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	4,80		>220 (240)				2360
BA4-4	380	178	986	574	2,86	5,02 (1,4 %)	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	2,20		>220 (250)				2400

3.5 lentelės tęsinys. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik. įmaiš. kiekis, l	V/C
BA4-5	380	178	986	574	2,86	5,74 (1,6 %)	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	1,90		>220 (260)				2380
BA4-6	380	178	986	574	2,86	7,25 (1,8 %)	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm				Tankis, kg/m ³
	1,60		>220 (250)				2380

Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo plastifikuojančios įmaišos kiekio pateikta 3.4 pav. Iš šiame paveiksle pateiktų kreivių matyti, kad ribiniai įprastinio betono mišinio šlyties įtempimai sumažėja apie 6,6 karto, padidėjus plastifikuojančios įmaišos kiekiui nuo 0,6 iki 1,8 % cemento masės. Padidėjus įmaišos kiekiui nuo 0,6 iki 0,8% cemento masės, stebimas žymus tiek mišinio ribinių šlyties įtempimų (apie 2,26 karto), tiek plastinės mišinio klampos sumažėjimas (apie 5,29 karto). Didėjant plastifikuojančios įmaišos kiekiui nuo 0,6 iki 1,8 % cemento masės, plastinė mišinio klampa sumažėja apie 8,28 karto.

Didėjant plastifikuojančios įmaišos kiekiui mišinyje bei esant pastovioms kitoms mišinio sudedamosioms, ribinių betono mišinio šlyties įtempimų ir plastinės klampos mažėjimui įtakos turi polikarboksilo eterių pagrindu pagamintos įmaišos molekulių adsorbcija cemento dalelių paviršiuje – cemento dalelių dispergavimas vyksta ne tik dėl elektrostatinio, bet ir dėl šoninių polimero grandinių erdvinio karkaso poveikio cemento dalelių pasiskirstymui. Disperguotos arba atskirtos viena nuo kitos cemento dalelės veikia kaip slydimą gerinanti arba užpildo dalelių betono mišinyje trintį mažinanti medžiaga. Vadinasi, plastifikuojančios įmaišos kiekio didėjimas mišinyje turėjo įtakos sumažėjusiai ir cemento teslos, ir betono mišinio klampai.



3.4 pav. Plastifikuojančios įmaišos kiekio įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

Remiantis prielaida, kad ribiniai mišinio šlyties įtempimai būtų kuo mažesni, o klampa tokia, kad iš mišinio neatsiskirtų vanduo, pasirinkta BA4-4 betono mišinio sudėtis (plastifikuojančios įmaišos kiekis 1,4 % cemento masės). Gauti mišinio ribiniai šlyties įtempimai buvo lygūs 234,43 Pa, o plastinė klampa 0,146 Pa.s. Toliau mažėjant mišinio ribiniams šlyties įtempimams, betono mišiniai tampa netechnologiški, tai yra iš mišinio pradeda atsiskirti vanduo. Didėjant ribiniams šlyties įtempimams, mažėja betono mišinio plastiškumas.

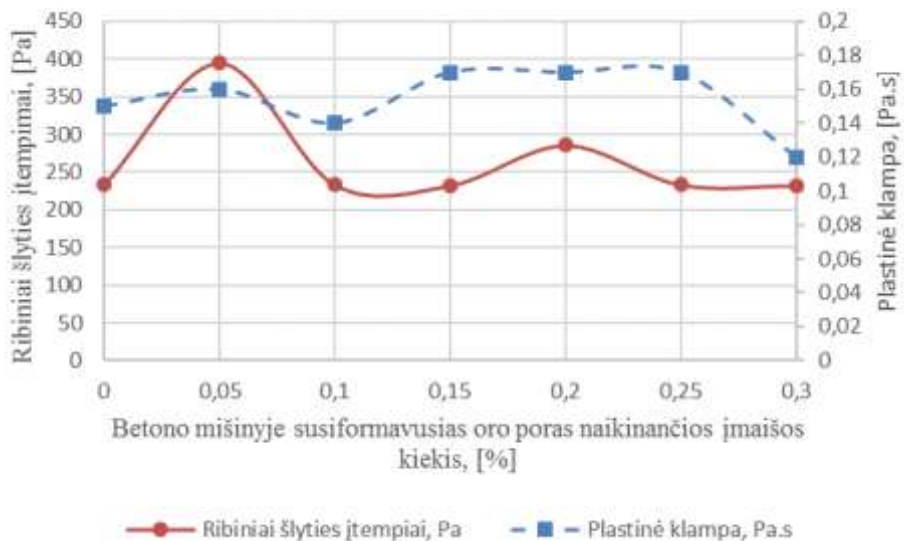
Mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

Nagrinėjant susiformavusias oro poras mišinyje naikinančios įmaišos (2.3 lentelė) įtaką reologinėms betono mišinio savybėms, buvo modifikuojama BA4-4 mišinio sudėtis bei parinktos šešios betono mišinio sudėty (BA5-0–BA5-6). Modifikuojant sudėtį, buvo keičiamas mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekis cemento masėje: 0 %; 0,05 %; 0,1 %; 0,15 %; 0,20 %; 0,25 %; 0,30 %. Smulkaus užpildo 0/1 bei 0/4 fr. Smėlių tarpusavio santykis (bendro užpildų kiekio atžvilgiu) buvo pastovus ir lygus 0,33/0,67; stambiojo užpildo kiekio santykis – 0,52; cemento kiekis – 380 kg 1 m³ mišinio; plastifikuojančios įmaišos – 1,4 % cemento masės. 3.6 lent. pateiktos betono mišinių sudėty bei jų technologinės savybės.

3.6 lentelė. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgžd as fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik · įmaiš. kiekis, l	Oro tuštum · naik. įmaiš. kiekis, l	V/C
BA5-0 (BA4-4)	380	178	986	574	286	5,02	-	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,20		>220 (250)					2400
BA5-1	380	178	986	574	286	5,02	0,20	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,10		220					2390
BA5-2	380	178	986	574	286	5,02	0,39	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	1,7		>220 (250)					2390
BA5-3	380	178	986	574	286	5,02	0,59	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,00		>220 (250)					2380
BA5-4	380	178	986	574	286	5,02	0,78	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	1,90		>220 (240)					2390
BA5-5	380	178	986	574	286	5,02	0,98	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	1,90		>220 (250)					2390
BA5-6	380	178	986	574	286	5,02	1,18	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	1,95		>220 (250)					2380

Iš 3.6 lentelėje pateiktų technologinių savybių rezultatų matyti, kad didėjant susiformavusias oro poras mišinyje naikinančios įmaišos kiekiui nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, betono mišinio slankumas nekinta ir yra S5 (≥ 220 mm) klasės ribose, tai yra svyruoja 240÷250 mm; oro kiekis mišinyje nežymiai sumažėja – nuo 2,2 iki 1,95 %; mišinio tankis taip pat nežymiai sumažėja – nuo 2400 iki 2380 kg/m³.



3.5 pav. Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekio

Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekio pateikta 3.5 pav. Iš šiame pav. pateiktų kreivių matyti, kad didėjant įmaišos kiekiui nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, įprastinio betono mišinio ribiniai šlyties įtempimai svyruoja nuo 234,43 iki 232,48 Pa. Kai įmaišos kiekis yra 0,05 % cemento masės, apie 1,69 karto padidėja ribiniai mišinio šlyties įtempimai. Didėjant įmaišos kiekiui nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, plastinė mišinio klampa svyruoja nuo 0,15 iki 0,12 Pa.s.

Didėjant susiformavusias oro poras mišinyje naikinančios įmaišos kiekiui mišinyje bei esant pastovioms kitoms mišinio sudedamosioms, ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai ir plastinė klampa kito nedaug. Kadangi įmaiša propoksilintų ir etoksilintų riebiųjų rūgščių pagrindu turi įtakos mišinyje susiformavusių oro porų kiekiui, įtraukto oro kiekio mišinyje kitimas lėmė atstumo tarp užpildo dalelių mišinyje kitimą bei veikė jų tarpusavio trintį ir pasipriešinimą tekėjimui. Įtraukto oro burbuliukai veikia kaip slydimo pagalvės tarp užpildo dalelių mišinyje.

Betono mišinio klampą keičiančios įmaišos įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

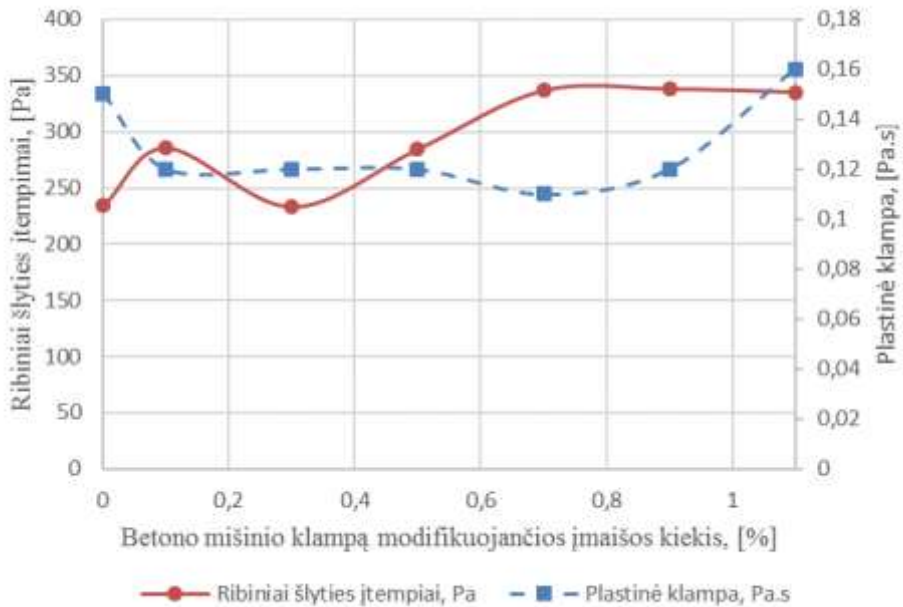
Nagrinėjant klampą keičiančios įmaišos (2.3 lentelė) įtaką reologinėms betono mišinio savybėms, buvo modifikuojama BA4-4 mišinio sudėtis bei parinktos septynios betono mišinio sudėty (BA6-0–BA6-6). Modifikuojant betono mišinio sudėtį, buvo keičiamas klampą modifikuojančios įmaišos kiekis cemento masės: 0 %; 0,1 %; 0,3 %; 0,5 %; 0,7 %; 0,9 %; 1,1 %. Smulkaus užpildo 0/1 bei 0/4 fr. smėlių tarpusavio santykis (bendro užpildų kiekio atžvilgiu) buvo pastovus ir lygus 0,33/0,67; stambiojo užpildo kiekio santykis – 0,52; cemento kiekis – 380 kg 1m³

mišinio; plastifikuojančios įmaišos kiekis – 1,4 % cemento masės. 3.7 lent. pateiktos betono mišinių sudėtys bei jų technologinės savybės.

3.7 lentelė. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgžd as fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik . įmaiš. kiekis, l	Klamp amodi fik. įm aiš. kiekis, l	V/C
BA6-0 (BA4-4)	380	178	986	574	286	5,02	-	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,20		>220 (250)					2400
BA6-1	380	178	986	574	286	5,02	0,38	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,50		>220 (240)					2390
BA6-2	380	178	986	574	286	5,02	1,14	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,10		>220 (250)					2390
BA6-3	380	178	986	574	286	5,02	1,90	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,20		>220 (240)					2380
BA6-4	380	178	986	574	286	5,02	2,66	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,60		>220 (230)					2370
BA6-5	380	178	986	574	286	5,02	3,42	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,70		>220 (230)					2380
BA6-6	380	178	986	574	286	5,02	4,18	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,90		>220 (230)					2360

Iš 3.7 lentelės matyti, kad didėjant klampą keičiančios įmaišos kiekiui nuo 0 iki 1,1 % cemento masės, betono mišinio slankumas nežymiai sumažėja nuo 250 iki 230 mm; oro kiekis mišinyje padidėja – nuo 2,2 iki 2,9 %; mišinio tankis sumažėja – nuo 2400 iki 2360 kg/m³. Mišinio konsistencija pagal slankumo klasę kito S5 (≥220 mm) klasės ribose. Didėjant įmaišos kiekiui nuo 0 iki 1,1 % cemento masės, oro kiekis mišinyje sumažėja apie 1,13 karto.



3.6 pav. Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo klampą keičiančios įmaišos kiekio

Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo klampą keičiančios įmaišos kiekio pateikta 3.6 pav. Iš šiame paveiksle pateiktų kreivių matyti, kad šios įmaišos kiekio didinimas nuo 0 iki 1,1 % cemento masės, mišinio ribiniams šlyties įtempimams didesnės reikšmės neturi. O įmaišos kiekiui padidėjus nuo 0 iki 0,1 % cemento masės, plastinė mišinio klampa sumažėja nuo 0,15 iki 0,11 Pa·s. Toliau didinant įmaišos kiekį nuo 0,1 iki 0,9 % cemento masės, plastinė mišinio klampa mažai svyruoja. Tačiau padidėjus įmaišos kiekiui nuo 0,9 iki 1,1 % cemento masės, plastinė mišinio klampa nežymiai padidėja nuo 0,12 iki 0,16 Pa·s.

Klampą keičianti įmaiša didelės įtakos reologinėms mišinio savybėms neturi, tačiau ją naudoti tikslinga, norint išvengti betono mišinio vandens atsiskyrimo bei sluoksniaimosi. Didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų pagrindu įmaiša suriša mišinyje esantį vandens perteklių, todėl sumažėjus skystosios fazės kiekiui mišinyje, padidėjusi vidinė kietosios fazės dalelių trintis didina mišinio plastinę klampą.

Orą įtraukiančios įmaišos įtaka reologinėms betono mišinio savybėms

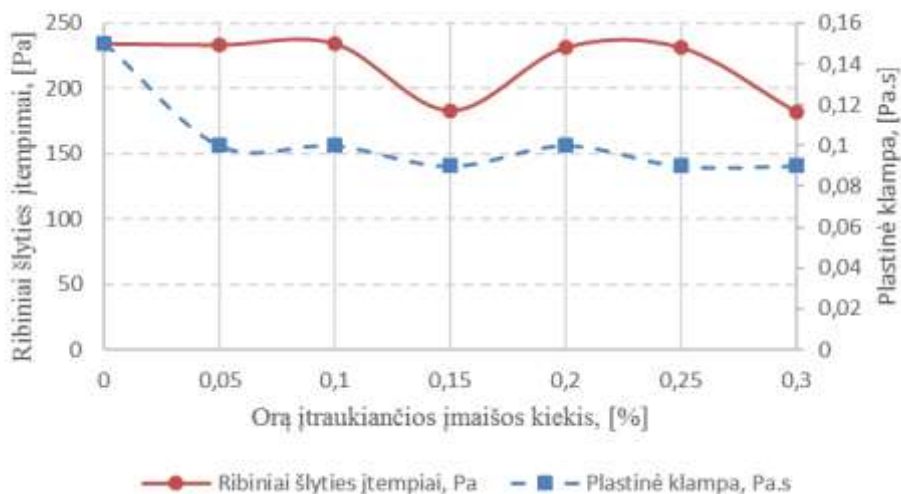
Nagrinėjant orą įtraukiančios įmaišos (2.3 lentelė) įtaką reologinėms betono mišinio savybėms, buvo modifikuojama BA4-4 mišinio sudėtis bei parinktos septynios betono mišinio sudėty. Modifikuojant betono mišinio sudėtį, buvo keičiamas orą įtraukiančios įmaišos kiekis: 0 %; 0,05 %; 0,1 %; 0,15 %; 0,20 %; 0,25 %; 0,30 % cemento masės. Smulkaus užpildo 0/1 bei 0/4 fr. smėlių tarpusavio santykis (bendro užpildų kiekio atžvilgiu) buvo pastovus ir lygus 0,33/0,67; stambiojo užpildo santykis su bendru užpildo kiekiu – 0,52; cemento kiekis – 380 kg

1 m³ mišinio; plastifikuojančios įmaišos kiekis – 1,4 % cemento masės. 3.8 lent. pateiktos betono mišinių sudėtys bei jų technologinės savybės.

3.8 lentelė. Betono mišinių sudėtys ir jų technologinės savybės

Betono mišinio sudėtis Betono mišinio kodas	Cem. kiekis, kg	Vand. kiekis, l	Žvirgždas fr. 4/16 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/4 kiekis, kg	Smėlis fr. 0/1 kiekis, kg	Plastifik. įmaiš. kiekis, l	Orą įtraukiančios įmaišos kiekis, l	V/C
BA7-0	380	178	986	574	286	5,02	-	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,20		>220 (250)					2400
BA7-1	380	178	986	574	286	5,02	0,38	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,30		>220 (250)					2390
BA7-2	380	178	986	574	286	5,02	0,76	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	2,60		>220 (250)					2400
BA7-3	380	178	986	574	286	5,02	1,14	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	5,1		>220 (260)					2390
BA7-4	380	178	986	574	286	5,02	0,95	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	4,00		>220 (240)					2370
BA7-5	380	178	986	574	286	5,02	0,19	0,47
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	3,00		>220 (250)					2370
BA7-6	380	178	986	574	286	5,02	2,66	0,57
	Oro kiekis, %		Slankumas, mm					Tank. kg/m ³
	3,60		>220 (260)					2380

Iš 3.8 lentelėje pateiktų technologinių savybių rezultatų matyti, kad didėjant orą įtraukiančios įmaišos kiekiui nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, betono mišinio slankumas yra S5 (≥220 mm) klasės ribose, tai yra svyruoja tarp 240÷260 mm; oro kiekis mišinyje padidėja nuo 2,2 iki 3,6 %; mišinio tankis sumažėja nuo 2400 iki 2380 kg/m³. Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo orą įtraukiančios įmaišos kiekio pateikta 3.7 pav.



3.7 pav. Reologinių betono mišinio savybių priklausomybė nuo orą įtraukiančios įmaišos kiekio

Iš 3.7 pav. pateiktų kreivių matyti, kad didėjant orą įtraukiančios įmaišos kiekiui nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai mažėja nuo 234,4 (BA7-0) iki 182 Pa (BA7-6), o plastinė mišinio klampa – nuo 0,15 iki 0,09 Pa·s.

Didėjant orą įtraukiančios įmaišos kiekiui mišinyje bei esant pastovioms kitoms mišinio sudedamosioms, ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai ir plastinė klampa nežymiai mažėja. Kadangi įmaiša paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu turi įtakos įtraukto oro kiekiui mišinyje, įtraukto oro kiekio mišinyje didėjimas lėmė atstumo tarp užpildo dalelių mišinyje didėjimą bei lėmė mažesnę jų tarpusavio trintį ir pasipriešinimą tekėjimui. Gauti rezultatai patvirtina kai kurių autorių nuomonę, kad įtraukto oro poros mažina vidinę stambesnių užpildo dalelių trintį. Taip pat mišinio tūryje nevienodai pasiskirsčiusios oro poros, kurios atsiranda maišant mišinį, lengviau pasišalina iš betono mišinio (Zhang ir Chia, 2004).

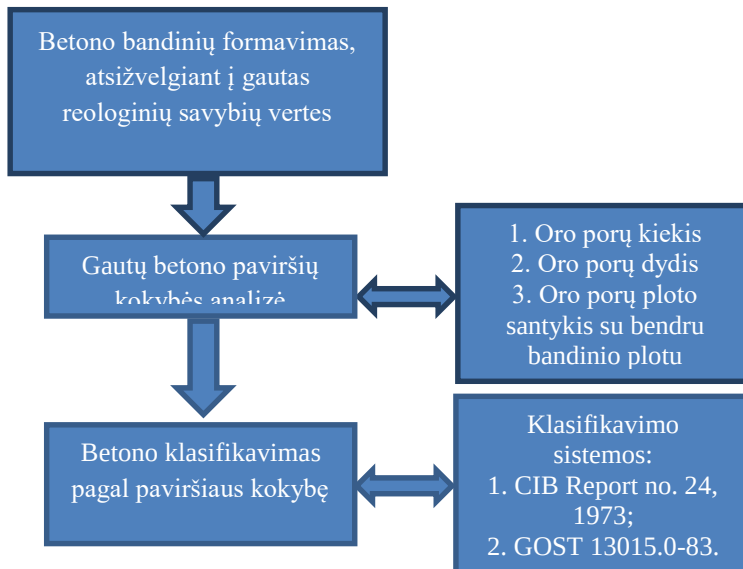
3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Ribiniai betono mišinio šlyties įtempimai gerokai sumažėja (apie 11 kartų), padidėjus 4/16 frakcijos žvirgždo santykiui bendrame užpildų mišinyje nuo 0,42 iki 0,52. O plastinė mišinio klampa sumažėja apie 6,52 karto padidėjus 4/16 frakcijos žvirgždo santykiui bendrame užpildų mišinyje nuo 0,22 iki 0,32.
2. Ribiniai įprasto betono mišinio šlyties įtempimai didėja (apie 1,2 karto), padidinus smulkiųjų dalelių kiekį mišinyje nuo 402 kg iki 481 kg 1 m^3 mišinio. Padidinus iki 520 kg, ribiniai šlyties įtempimai žymiai sumažėja (apie 4,2 karto).
3. Ribiniai įprastinio betono mišinio šlyties įtempimai sumažėja apie 6,6 karto, padidinus plastifikuojančios įmaišos polikarboksilato eterių polimerų pagrindu kiekį nuo 0,6 iki 1,8 % cemento masės. Įmaišos kiekį padidinus nuo 0,6 iki 0,8 % cemento masės, stebimas žymus tiek mišinio ribinių šlyties įtempimų (apie 2,26 karto), tiek plastinės mišinio klamos mažėjimas (apie 5,29 karto).

4. Didinant susiformavusias oro poras mišinyje naikinančios įmaišos propoksilintų ir etoksilintų riebiųjų rūgščių pagrindu kiekį nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, betono mišinio slankumas yra S5 (≥ 220 mm) klasės ribose; oro kiekis mišinyje nekinta. Šios įmaišos didinimas žymesnės įtakos betono reologinėms mišinio savybėms neturėjo.
5. Didinant klampą modifikuojančios įmaišos didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų pagrindu kiekį nuo 0 iki 1,1 % cemento masės, betono mišinio slankumas sumažėja nuo 250 iki 230 mm; oro kiekis mišinyje padidėja nuo 2,2 iki 2,9 %. Mišinio konsistencija pagal slankumą kito S5 (≥ 220 mm) klasės ribose. Didinant įmaišos kiekį nuo 0 iki 1,1 % cemento masės, oro kiekis mišinyje sumažėja apie 1,13 karto. Klampą keičianti įmaiša didelės įtakos reologinėms mišinio savybėms neturi, tačiau ją tikslinga naudoti, norint išvengti betono mišinio vandens atsiskyrimo bei sluoksniavimosi.
6. Didinant orą įtraukiančios įmaišos paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu kiekį nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, betono mišinio slankumas yra S5 (≥ 220 mm) klasės ribose; oro kiekis mišinyje padidėja nuo 2,2 iki 3,6 %. Didinant šios įmaišos kiekį betono mišinyje nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, pastebimas betono mišinio ribinių šlyties įtempimų bei plastinės klampos sumažėjimas.

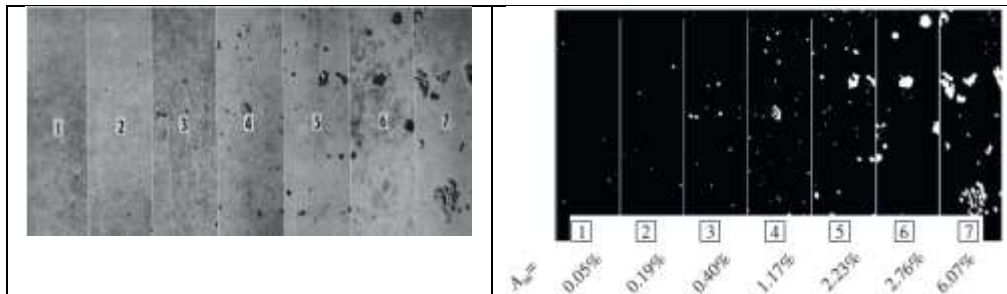
4. REOLOGINIŲ MIŠINIO SAVYBIŲ ĮTAKA SUKIETĖJUSIO BETONO PAVIRŠIAUS KOKYBEI

Šiame skyriuje nagrinėjama ribinių įprastinio betono mišinio šlyties įtempimų ir klampos įtaka sukietėjusio betono paviršiaus kokybei. 4.1 pav. pateikta betono paviršiaus kokybės nustatymo bei klasifikavimo bandymo eigos schema.



4.1 pav. Betono paviršiaus kokybės nustatymo bei klasifikavimo bandymo eigos schema

Betono paviršiaus kokybė vertinama programine įranga „BetonGUY 2.0“, kuri analizuoja nagrinėjamų betono paviršių vaizdus. Ištirta atskirų mišinio sudedamųjų dalių įtaka betono paviršinių oro porų kiekiui bei dydžiui. Pagal atitinkamas priklausomybes matematiškai aprašomas atskirų mišinio sudedamųjų dalių ir suketėjusio betono paviršiaus kokybės rodiklių ryšys, pateikiamos paviršinių betono defektų santykinio ploto priklausomybės nuo reologinių mišinio savybių.



4.2 pav. Betono paviršiaus klasifikavimas pagal CIB standartą (da Silva et al., 2014)

Betono paviršiaus kokybei įvertinti naudotos programos „BetongUY 2.0“ galutiniai duomenys yra paviršinių oro porų kiekis bei jų didžiausias matmuo. Kokybės klasei nustatyti buvo vertinamos tik didesnės oro poros, tai yra 10–15 mm bei >15 mm jų didžiausio matmens. Suskirstant paviršius į klases buvo priimta, kad defektas yra artimas apskritimo formai, o skaičiuojant jų plotus priimtas 5 mm defektų spindulys 10–15 mm bei 7,5 mm >15 mm dydžio poroms. Betono bandinių paviršiai skirstomi į klases pagal paviršinių defektų plotą vienam kvadratiniam metrui. Paviršiai klasifikuojami pagal CIB (angl. *Concrete Industry Board*) standarto (CIB Report no. 24, 1973) kontrolinę skalę (4.2 pav.) bei GOST 13015.0-83 dokumento reikalavimus (1.7 lentelė), vertinant didžiausią poros ar kavernos matmenį.

4.1. Reologinių betono mišinio savybių įtaka suketėjusio paviršiaus kokybei, keičiant 0/1 ir 0/4 fr. smėlių santykį smulkiajame užpildų mišinyje

Tiriant smulkiojo užpildo kiekio įtaką suketėjusio betono paviršiaus kokybei, buvo vertinami iš trijų skirtingų sudėčių suformuotų betono bandinių paviršiai. Remiantis anksčiau nustatytomis reologinių savybių charakteristikomis, pasirinkti trys santykiai smulkiajame užpildų mišinyje tarp 0/1 bei 0/4 frakcijos smėlių kiekių: 0,297 (BA1-0) – ribinis taškas, esant mažiausiam santykiui; 0,500 (BA1-1) – tarpinis taškas, esant vidutiniam santykiui; 1,824 (BA1-4) – ribinis taškas, esant didžiausiam santykiui.

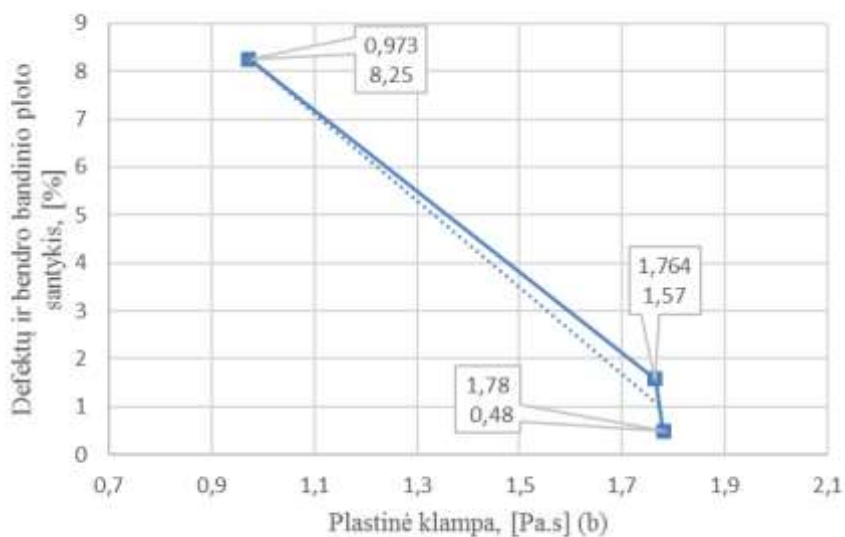
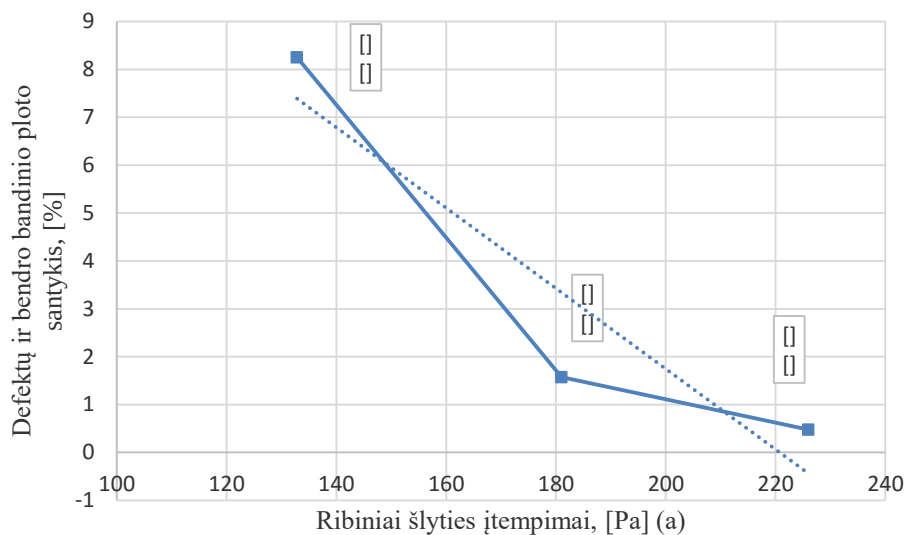
Pagrindiniai betono paviršiaus kokybės vertinimo rodikliai buvo paviršiaus oro porų kiekis bei jų dydis nagrinėjamame kvadratiniam metre. Oro poros buvo suskirstytos ne vien tik pagal jų kiekį, bet ir pagal didžiausią jų matmenį, t. y.: 1–5 mm ir 5–10 mm bei 10–15 mm ir didesnės nei 15 mm. Vertinant betono paviršiaus oro porų kiekį, buvo kreipiamas dėmesys į didesnių matmenų paviršiaus defektus, t. y. 10–15 mm bei didesnės nei 15 mm. Tokios oro poros žmogaus akimi matomos iš

didesnio atstumo. Technologinės bei reologinės nagrinėtų betono mišinio sudėčių savybės pateiktos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Betono mišinių serijos BA1 savybės

Savybė	Betono mišinio sudėtis		
-	BA1-0	BA1-1	BA1-4
Technologinės savybės			
Tankis, kg/m ³	2380	2310	2310
Slankumas, mm	>220 (270)	>220 (260)	>220 (250)
Oro kiekis, %	4,5	4,3	4,5
Reologinės savybės			
Ribiniai šlyties įtempimai, Pa	132,85	181,00	226,00
Plastinė klampa, Pa·s	0,94	1,76	1,78
Defektų ir bendro bandinio ploto santykis bei paviršiaus kokybės klasė			
-	8,25	1,57	0,48
Klasė, CIB Report No. 24, 1973	7	4–5	3–4
Klasė, GOST 13015.0-83	A7	A5	A4

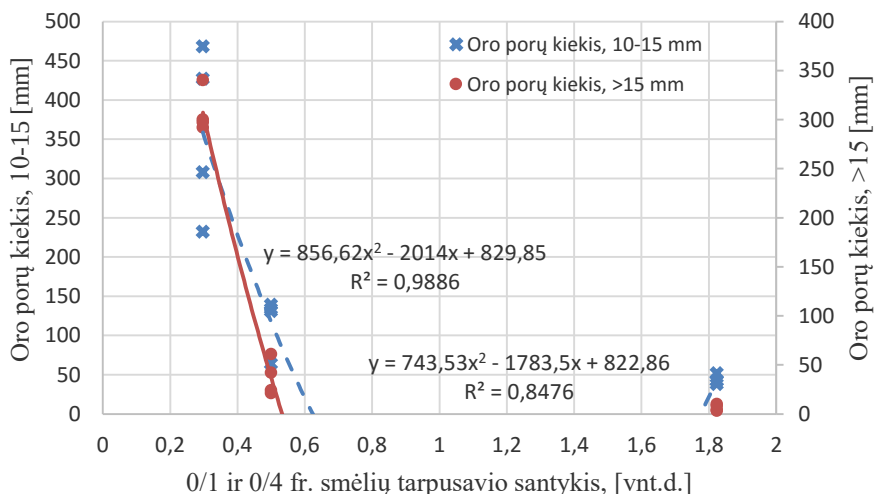
4.3 pav. pateiktos betono paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybės nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių: ribinių šlyties įtempimų (a) bei (b) plastinės klamos (b). Kaip matyti iš 4.3 pav., įprastos betono mišinio sudėties modifikavimas, keičiant 0/1 ir 0/4 fr. smėlių kiekių santykį smulkiajame užpildų mišinyje, tai yra ribinių šlyties įtempimų ir plastinės klamos didėjimas turi teigiamos įtakos, mažinant paviršinių defektų santykinį plotą. Ribiniams šlyties įtempimams esant 226 Pa, o plastinei klampai – 1,78 Pa·s, gaunamas aukštos paviršiaus kokybės betonas (pagal CIB Report No. 24: 3–4 klasė).



4.3 pav. Paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybė nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių, kintant 0/1 ir 0/4 fr. smėlių santykiui smulkiajame užpildų mišinyje: (a) ribinių šlyties įtempimų ir (b) plastinės klampos

Kaip matyti iš 4.4 pav., betono paviršiaus oro porų kiekis kvadratiniam metrui nagrinėjamo ploto žymiai sumažėjo, didinant 0/1 frakcijos smėlio kiekį smulkiajame užpildų mišinyje, kartu didėjant ribiniams mišinio šlyties įtempimams ir klampai. Taip pat stebimas žymus didesnių oro porų (kavernų) kiekio sumažėjimas nagrinėjamame paviršiaus plote: 10–15 mm oro porų skaičius sumažėjo nuo 359 iki 43 vnt., o didesnių oro porų nei 15 mm skaičius sumažėjo nuo 307 iki 6 vnt. Remiantis gautais tyrimų rezultatais, didėjantis 0/1 frakcijos smėlio kiekio santykis

smulkiajame užpildų mišinyje ne tik padidina ribinius įprastinio betono mišinio šlyties įtempimus ir klampą, bet ir turi teigiamos įtakos monolitinių betono konstrukcijų paviršiaus kokybei.



4.4 pav. Paviršinių oro porų kiekio pokytis pagal į 0/1 ir 0/4 fr. smėlių kiekių tarpusavio santykį smulkiajame užpilde

Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio P ir 0/1 bei 0/4 frakcijos smėlių kiekių tarpusavio santykio smulkiajame užpildų mišinyje ryšio forma (4.4 pav.) matematiškai gali būti aprašyta pagal (29) priklausomybę:

$$P_{0/1-0/4} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (29)$$

čia: $P_{0/1-0/4}$ – oro porų kiekis sukietėjusio betono paviršiuje, vnt.; x – 0/1 ir 0/4 fr. smėlių kiekių smulkiajame užpildų mišinyje tarpusavio santykis.

Lygties koeficientai a , b ir c 10–15 mm skersmens oro poroms yra atitinkamai lygūs: 856,62; -2014; 829,85 bei didesnėms nei 15 mm skersmens oro poroms – 743,53; -1783,50; 822,86. Lygties empiriniai k-tai R^2 yra lygūs 0,9886 ir 0,8476; atitinkamai koreliacijos k-tai r yra lygūs 0,862 ir 0,965. Gauti koreliacijos koeficientai yra artimi vienetui, o kintamųjų ryšys bus tuo stipresnis, kuo r reikšmė bus arčiau 1. Remiantis koreliacijos koeficientų reikšmių dydžiais, tarp kintamųjų yra stiprus ryšys.

Didinant 0/1 frakcijos smėlio kiekį smulkiajame užpildų mišinyje, kartu didinant ribinius mišinio šlyties įtempimus ir klampą, gauta monolitinių betono konstrukcijų paviršiaus kokybė pagerėja nuo 7 iki 3–4 klasių pagal CIB Report No. 24 bei nuo A7 iki A4 pagal GOST 13015.0-83 (4.1 lentelė).

4.2. Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio santykį

Tiriant stambiojo užpildo kiekio įtaką sukietėjusio betono paviršiaus kokybei, buvo vertinami iš trijų skirtingų sudėčių suformuotų betono bandinių paviršiai. Remiantis anksčiau nustatytomis reologinių savybių charakteristikomis, pasirinkti trys stambiojo užpildo (žvirgždo) bei bendro užpildų mišinio kiekio santykiai: 0,32 (BA2-2) – ribinis taškas, esant mažiausiam santykiui; 0,52 (BA2-0) – tarpinis taškas, esant vidutiniam santykiui; 0,72 (BA2-5) – ribinis taškas, esant didžiausiam santykiui.

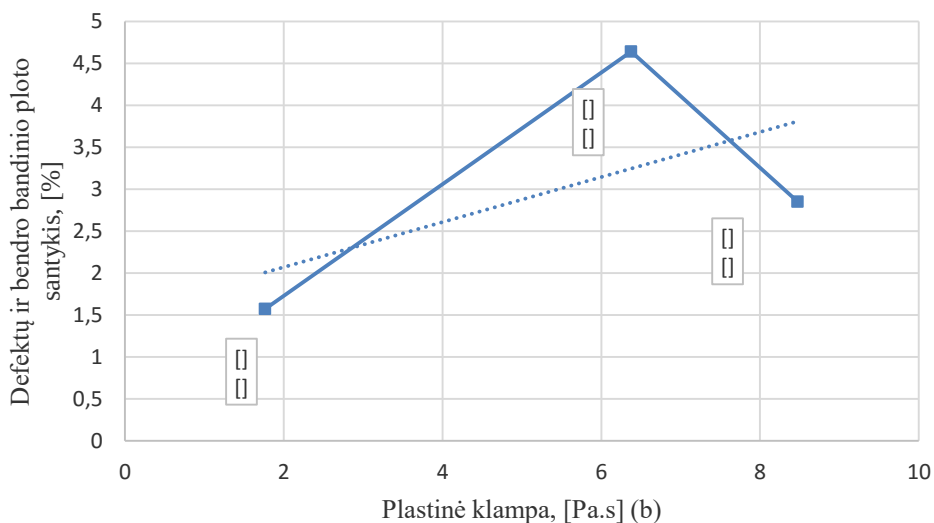
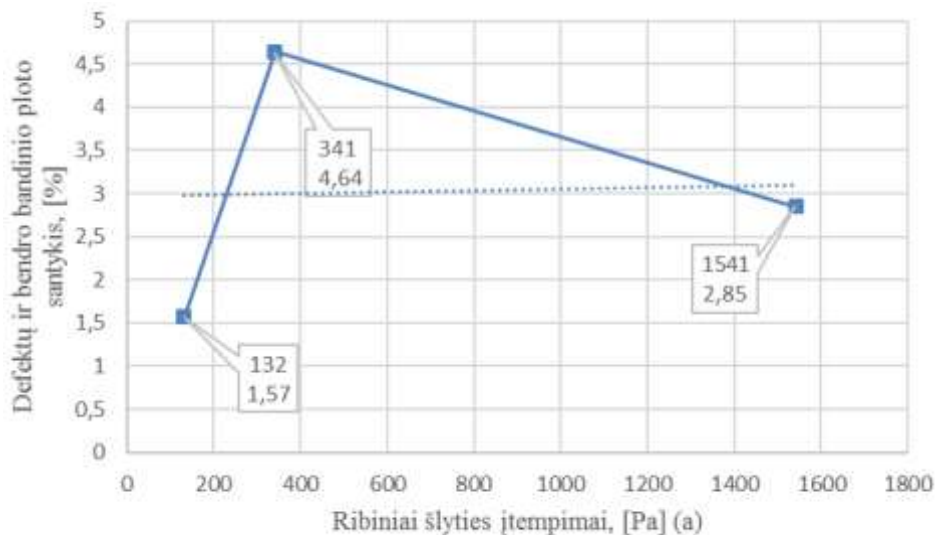
Technologinės bei reologinės nagrinėtų betono mišinio sudėčių savybės pateiktos 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Betono mišinių serijos BA2 savybės

Savybė			
-	BA2-2	BA2-0	BA2-5
Technologinės savybės			
Tankis, kg/m ³	2206	2310	2400
Slankumas, mm	40	>220 (260)	>220 (230)
Oro kiekis, %	6,2	4,3	0,9
Reologinės savybės			
Ribiniai šlyties įtempimai, Pa	1541	132	341
Plastinė klampa, Pa·s	8,47	1,76	6,35
Defektų ir bendro bandinio ploto santykis bei paviršiaus kokybės klasė			
-	2,85	1,57	4,64
Santykinis paviršiaus defektų plotas, %	2,85	1,57	4,64
Klasė, CIB Report No. 24, 1973	5–6	4–5	6–7
Klasė, GOST 13015.0-83	A7	A5	A7

4.5 pav. pateiktos betono paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1m² ploto santykio priklausomybės nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių. Iš 4.5 pav. pateiktų kreivių matyti, kad įprastos betono mišinio sudėties modifikavimas, keičiant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio

santykį, tai yra ribinių šlyties įtempimų ir plastinės klampos mažėjimas mažina santykinį paviršiaus defektų plotą. Ribiniams šlyties įtempimams esant 132 Pa, o plastinei klampai – 1,764 Pa·s, gaunamas aukštos paviršiaus kokybės betonas (pagal CIB Report no. 24: 4-5 klasė). Ribiniams šlyties įtempimams esant 1541 Pa, o plastinei klampai – 8,473 Pa·s, taip pat gaunamas pažiūrėti aukštos paviršiaus kokybės betonas, tačiau defektų ploto santykio mažėjimas pasireiškia, nes pastebėtas didelis cementinio pieno atsiskyrimas, kuris plonu sluoksniu padengė paviršines poras (toks betono mišinys netinkamas naudoti toliau).

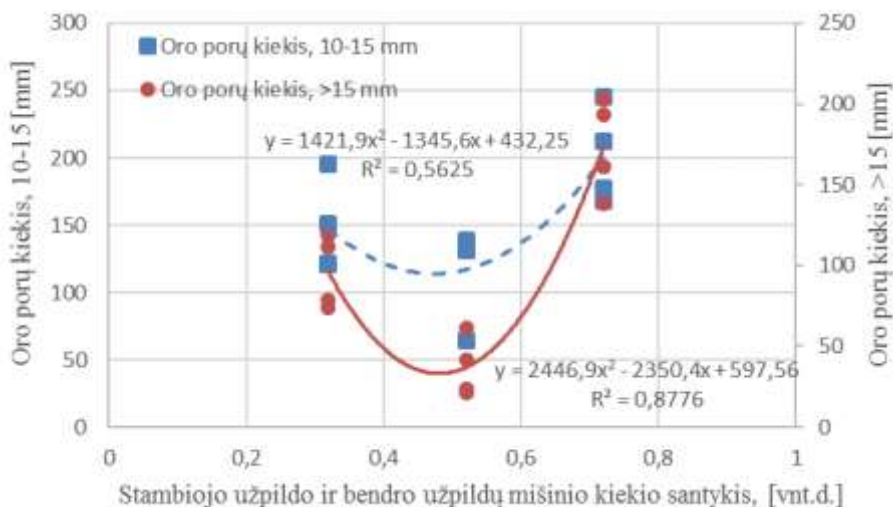


4.5 pav. Paviršinių defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybė nuo reologinių

įprastinio betono mišinio savybių, kintant stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio santykiui: (a) ribinių šlyties įtempimų ir (b) plastinės klampos

Kaip matyti iš 4.6 pav., betono paviršiaus oro porų kiekis kvadratiniam nagrinėjamo ploto metrui sumažėjo, didinant stambiojo užpildo bei bendro užpildų mišinio kiekio santykį nuo 0,32 iki 0,52, kartu žymiai sumažinant mišinio ribinius šlyties įtempimus ir klampą. Šiuo atveju 10–15 mm dydžio oro porų kiekis sumažėjo nuo 148 iki 117 vnt., o >15 mm sumažėjo nuo 96 iki 37 vnt.

Toliau didinant stambiojo užpildo santykį nuo 0,52 iki 0,72, oro porų kiekis žymiai padidėja, kartu didėja reologinių mišinio savybių reikšmės. 10–15 mm oro porų kiekis padidėja nuo 117 iki 200 vnt., o >15 mm padidėja nuo 37 iki 174 vnt. Esant stambiojo užpildo (4/16 frakcijos žvirgždas) bei bendro užpildų mišinio kiekių santykiui 0,52, pasiekiamas optimalus mišinio užpildų susitankinimo laipsnis, reologinių mišinio savybių reikšmės yra mažiausios, o betono paviršiaus kokybė yra geriausia.



4.6 pav. Paviršinių oro porų kiekio pokytis pagal stambiojo užpildo santykį su bendru mišinio užpildo kiekiu

Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio P ir stambiojo užpildo (4/16 frakcijos žvirgždo) bei bendro užpildų mišinio kiekio santykio ryšio forma (B) (4.6 pav.) matematiškai gali būti aprašyta pagal priklausomybę (30):

$$P_{4/16-B} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (30)$$

čia: $P_{4/16-B}$ – oro porų kiekis sukietėjusio betono paviršiuje, vnt.; x – stambiojo užpildo (žvirgždo) bei bendro užpildų mišinio kiekio santykis. Lygties koeficientai a, b, c 10–15 mm skersmens oro poroms yra atitinkamai: 1421,9; -134,5; 432,25 bei didesnėms už 15 mm skersmens oro poroms – 2446,9; -2350,4; 597,56.

Lygties empiriniai k -tai R^2 yra lygūs 0,5625 ir 0,8776, atitinkamai koreliacijos k -tai r yra lygūs 0,750 ir 0,937. Gauti koreliacijos koeficientai yra artimi vienetui.

Minėta lygtis geriau apibūdina stambiausias oro poras (>15 mm). Remiantis koreliacijos koeficientų reikšmių dydžiais, tarp kintamųjų yra stiprus ryšys.

Esant optimaliam stambaus užpildo santykiui su bendru užpildų mišinio kiekiu, gautos reologinės įprastinio betono mišinio savybės sudaro sąlygas prie klojinio sienelės paviršiaus uždarytam orui pasišalinti, dėl to suketėjusio betono paviršiuje susiformuoja mažesnis paviršinių oro porų kiekis. Esant 4/16 frakcijos žvirgždo ir bendro užpildų mišinio kiekio santykiui 0,52, kartu mažiausioms ribinių šlyties įtempimų ir klampos vertėms, gaunamas mažiausias paviršinių defektų užimamas plotas į 1 m^2 bei gauta monolitinių betono konstrukcijų paviršiaus kokybė priskiriama 4–5 klasėms (CIB Report No. 24, 1973) bei A5 klasei (GOST 13015.0-83) (4.2 lentelė).

4.3. Reologinių betono mišinio savybių įtaka suketėjusio paviršiaus kokybei, keičiant smulkiųjų dalelių kiekį

Tiriant smulkiųjų dalelių kiekio (cementas + smėlio dalelės iki 0,25 mm) įtaką suketėjusio betono paviršiaus kokybei, buvo vertinami iš keturių skirtingų sudėčių suformuotų betono bandinių paviršiai. Remiantis anksčiau nustatytomis reologinių savybių charakteristikomis, pasirinkti keturi skirtingi smulkiųjų dalelių kiekiai betono mišinyje: ~441 kg (BA3-2) – ribinis taškas, esant mažiausiam kiekiui; ~520 kg (BA3-0) ir ~560 kg (BA3-4) – tarpinis taškas, esant vidutiniam kiekiui; bei ~600 kg (BA3-5) – ribinis taškas, esant didžiausiam kiekiui.

Technologinės bei reologinės nagrinėtų betono mišinio sudėčių savybės pateiktos 4.3 lentelėje.

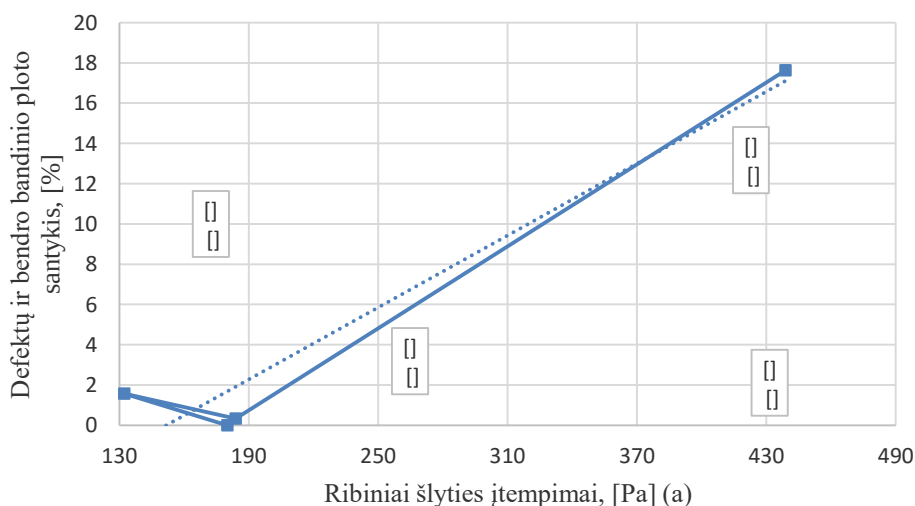
4.3 lentelė. Betono mišinių serijos BA-3 savybės

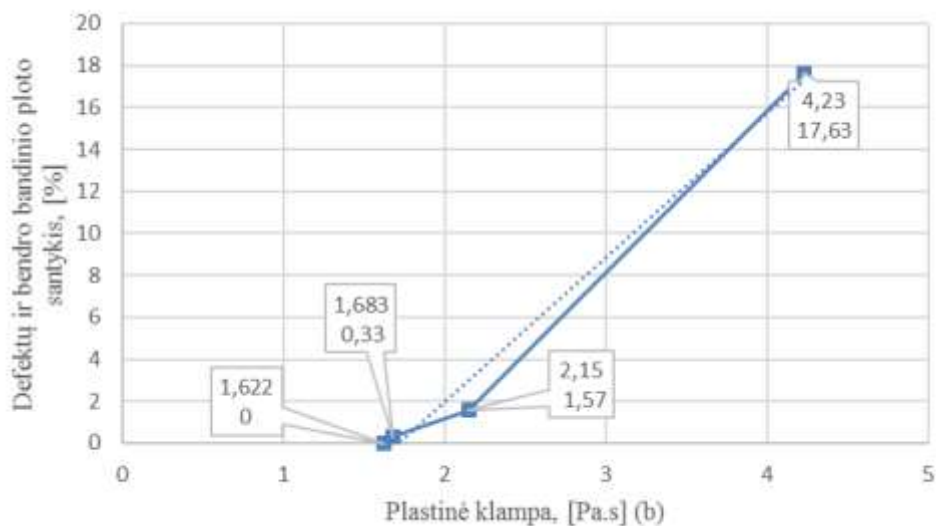
Savybė	Betono mišinio sudėtis			
-	BA3-2	BA3-0	BA3-4	BA3-5
Technologinės savybės				
Tankis, kg/m^3	2320	2310	2400	2350
Slankumas, mm	210	>220 (260)	>220 (260)	>220 (260)
Oro kiekis, %	3,4	4,3	3,3	3,1
Reologinės savybės				
Ribiniai šlyties įtempimai, Pa	439	180,54	184	180
Plastinė klampa, Pa·s	4,29	1,76	1,68	1,62

4.3 lentelės tęsinys. Betono mišinių serijos BA-3 savybės

Savybė	Betono mišinio sudėtis			
-	BA3-2	BA3-0	BA3-4	BA3-5
Defektų ir bendro bandinio ploto santykis ir paviršiaus kokybės klasė				
-	17,63	1,57	0,33	0
Santykinis paviršiaus defektų plotas, %	17,63	1,57	2,05	0
Klasė, CIB Report No. 24, 1973	7	4–5	2–3	1
Klasė, GOST 13015.0-83	A7	A4	A3	A1

4.7 pav. pateiktos betono paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybės nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių. Iš šiame pav. pateiktų kreivių matyti, kad įprastos betono mišinio sudėties modifikavimas, keičiant smulkiųjų dalelių kiekį (cementas + smėlio dalelės iki 0,25 mm), tai yra ribinių šlyties įtempimų ir plastinės klampos mažėjimas turi teigiamos įtakos, mažinant santykinį paviršiaus defektų plotą. Ribiniams šlyties įtempimams esant 180 Pa, o plastinei klampai – 1,622 Pa·s, gaunamas aukščiausios paviršiaus kokybės betonas (pagal CIB Report No. 24: 1 klasė). Didėjant ribiniams šlyties įtempimams bei plastinei klampai, pastebimas žymus santykinio paviršiaus defektų ploto didėjimas.

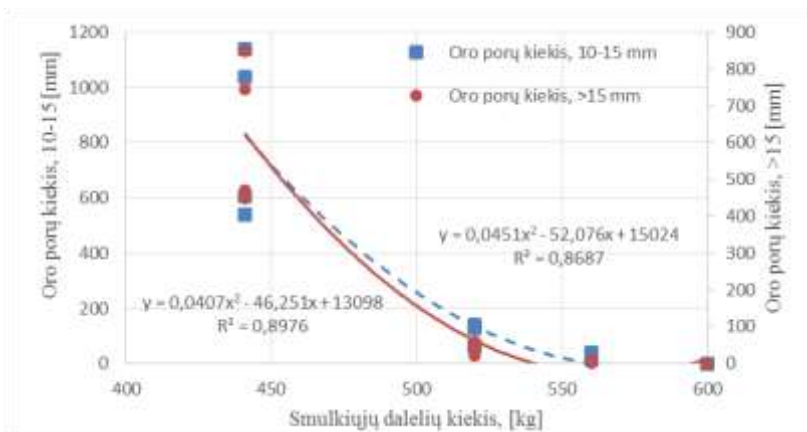




4.7 pav. Paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybė nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių, kintant smulkiųjų dalelių kiekiui: (a) ribinių šlyties įtempimų ir (b) plastinės klamos

Kaip matyti iš 4.8 pav., betono paviršiaus oro porų kiekis kvadratiniam nagrinėjamo ploto metrui žymiai sumažėjo, didinant smulkiųjų dalelių kiekį, kartu žymiai mažinant ribinius mišinio šlyties įtempimus ir klampą. Šiuo atveju 10–15 mm dydžio oro porų kiekis sumažėjo nuo 830 iki 0 vnt., o >15 mm sumažėjo nuo 630 iki 0 vnt.

Smulkiųjų dalelių kiekio didinimas turi teigiamos įtakos, gerinant įprastinio betono paviršiaus kokybę. Tačiau reikia atsižvelgti į tai, kad smulkiųjų dalelių (cementas + smėlio dalelės iki 0,25 mm) kiekio didinimas didina betono savikainą. Kuo didesnis smulkiųjų dalelių kiekis, tuo mažiau oro porų aptinkama sukietėjusio betono paviršiuje.



4.8 pav. Paviršinių oro porų kiekio pokytis pagal smulkiųjų dalelių kiekį

Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio P ir smulkiųjų dalelių kiekio ryšio forma (S_m) (4.8 pav.) matematiškai gali būti aprašyta pagal priklausomybę (31):

$$P_{Sm} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (31)$$

čia: P_{Sm} – oro porų kiekis sukietėjusio betono paviršiuje, vnt.; x – smulkiųjų dalelių kiekis, kg. Lygties koeficientai a, b, c 10–15 mm skersmens oro poroms yra atitinkamai: 0,0451; -52,076; 15024 bei didesnėms nei 15 mm skersmens oro poroms – 0,0427; -46,251; 13098.

Empiriniai lygties koeficientai R^2 yra lygūs 0,8687 ir 0,8976, atitinkamai koreliacijos k-tai r yra lygūs 0,932 ir 0,948. Gauti koreliacijos koeficientai yra artimi vienetui. Remiantis koreliacijos koeficientų reikšmių dydžiais, tarp kintamųjų yra stiprus ryšys.

Kai smulkiųjų dalelių kiekis mišinyje yra 441 kg 1 m³ mišinio, gaunamos didžiausios įprastinio betono mišinio ribinių šlyties įtempimų ir klampos vertės, o gauta betono paviršiaus kokybė priskiriama žemiausiai 7 klasei. Esant smulkiųjų dalelių kiekiui mišinyje 520÷600 kg 1 m³ mišinio, betono mišinio ribinių šlyties įtempimų ir klampos vertės skiriasi nedaug, tačiau betono paviršiaus klasė pakinta nuo 4–5 iki aukščiausios 1 klasės. Norint gauti kuo aukštesnę betono paviršiaus kokybę, rekomenduojamas didesnis smulkiųjų dalelių kiekis betono mišinyje. Reikia atkreipti dėmesį, kad smulkaus užpildo kiekis neturi viršyti cemento kiekio daugiau kaip 2 kartus (Cheng & Liu, 2013).

Smulkiųjų dalelių kiekis (cementas + smėlio dalelės iki 0,25 mm) ~600 kg vienam kubiniam metrui mišinio (BA3-5) yra optimalus, jam esant gautos ribinių šlyties įtempimų ir platinės klampos dydžių vertės sudaro palankias sąlygas prie klojinio sienelės paviršiaus uždarytam orui pasišalinti, klojant ir tankinant mišinį.

4.4. Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant įmaišos tipą

Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant plastifikuojančios įmaišos kiekį betono mišinyje

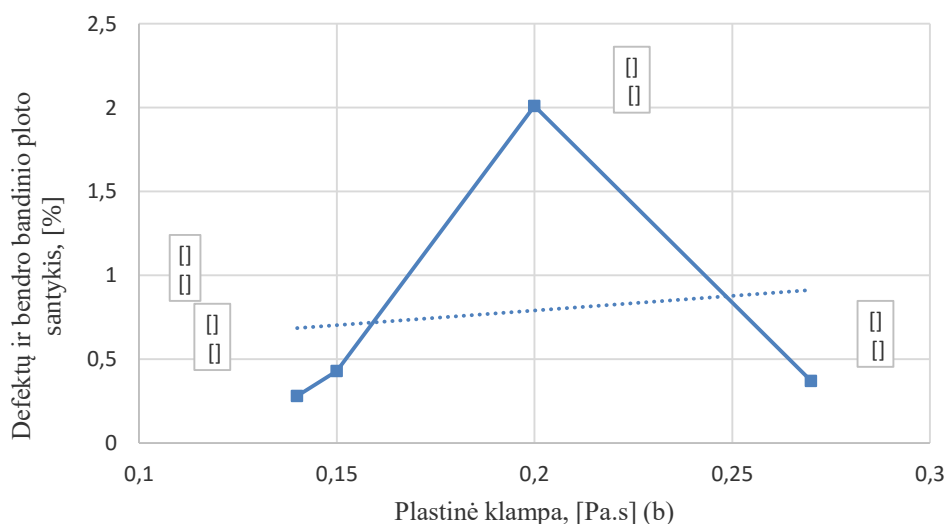
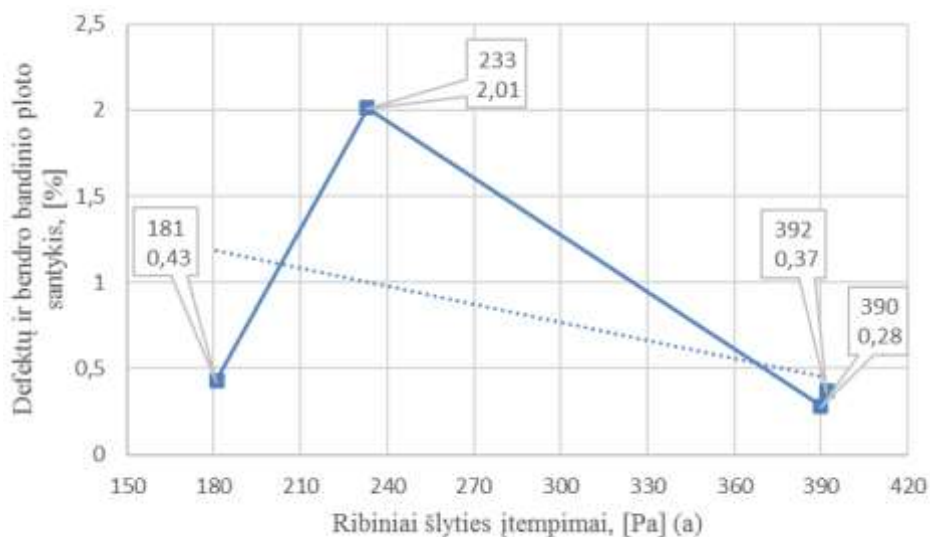
Tiriant plastifikuojančios įmaišos polikarboksilato eterių polimerų pagrindu kiekio įtaką sukietėjusio betono paviršiaus kokybei, buvo vertinami iš keturių skirtingų sudėčių suformuotų betono bandinių paviršiai. Remiantis anksčiau nustatytais reologinių savybių charakteristikomis, pasirinkti keturi skirtingi plastifikuojančios įmaišos kiekiai: 0,8 % (BA4-2) – ribinis taškas, esant mažiausiam kiekiui; 1,2 % (BA4-0) ir 1,4 % (BA4-4) – tarpinis taškas, esant vidutiniam kiekiui; bei 1,6 % (BA4-5) – ribinis taškas, esant didžiausiam kiekiui.

Technologinės bei reologinės nagrinėtų betono mišinio sudėčių savybės pateiktos 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. Betono mišinių serijos BA-4 savybės

Savybė	Betono mišinio sudėtis			
-	BA4-2	BA4-0	BA4-4	BA4-5
Technologinės savybės				
Tankis, kg/m ³	2390	2400	2400	2380
Slankumas, mm	>220 (240)	>220 (260)	>220 (250)	>220 (260)
Oro kiekis, %	4,4	3,3	2,2	1,9
Reologinės savybės				
Ribiniai šlyties įtempimai, Pa	286	184	234	182
Plastinė klampa, Pa·s	1,493	1,683	1,900	1,963
Defektų ir bendro bandinio ploto santykis bei paviršiaus kokybės klasė				
-	0,37	0,28	2,01	0,43
Santykinis paviršiaus defektų plotas, %	0,37	0,28	2,01	0,43
Klasė, CIB Report No. 24, 1973	2–3	2–3	4–5	3–4
Klasė, GOST 13015.0–83	A3	A3	A5	A4

4.9 pav. pateiktos betono paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybės nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių. Iš šiame pav. pateiktų kreivių matyti, kad ribiniams šlyties įtempimams esant apie 180 Pa, o plastinei klampai apie 0,14 Pa·s, santykinis paviršiaus defektų plotas apie 0,3 %; ribiniams šlyties įtempimams padidėjus iki 233 Pa, o plastinei klampai iki 0,20 Pa·s pastebimas iki ~2 % padidėjęs santykinis paviršiaus defektų plotas. Ribiniams šlyties įtempimams didėjant toliau, santykinis paviršiaus defektų plotas žymiai sumažėja, tačiau pasireiškia mišinio sluoksniavimasis, tokio mišinio nebegalima naudoti toliau.

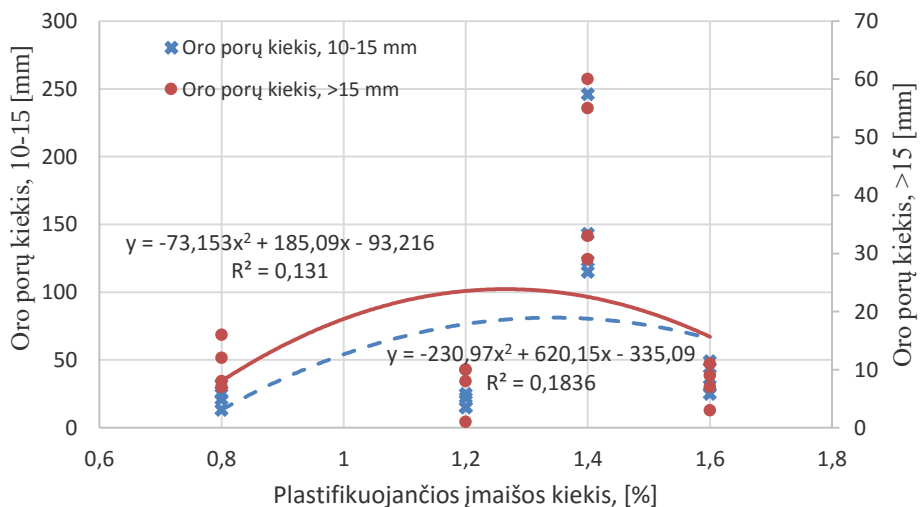


4.9 pav. Paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybė nuo įprastinio betono mišinio reologinių savybių, kintant plastifikuojančios įmaišos kiekiui: (a) ribinių šlyties įtempimų ir (b) plastinės klampos

Kaip matyti iš 4.10 pav., betono paviršiaus oro porų kiekis kvadratiniam nagrinėjamo ploto metrui sumažėjo, didinant plastifikuojančios įmaišos kiekį nuo 0,8 iki 1,2 % cemento masės, kartu žymiai mažinant mišinio ribinius šlyties įtempimus. Šiuo atveju 10–15 mm dydžio oro porų kiekis sumažėjo nuo 22 iki 18 vnt., o >15 mm sumažėjo nuo 11 iki 7 vnt. Plastifikuojančios įmaišos kiekį padidinus nuo 1,2 iki 1,4 % cemento masės, stebimas paviršinių oro porų skaičiaus padidėjimas. 10–15 mm oro poros padidėjo nuo 18 iki 156 vnt., o >15 mm nuo 7 iki 44 vnt. Toliau didinant plastifikuojančios įmaišos kiekį nuo 1,4 iki 1,6 % cemento

masės, mažėja paviršinių oro porų kiekis, tačiau šiuo atveju yra pastebimas cementinio pieno atsiskyrimas. Toks betono mišinys yra netechnologiškas.

Plastifikuojančios įmaišos kiekis turi didelės bei nevienodo pobūdžio įtakos betono paviršiaus kokybei. Remiantis gautais tyrimų rezultatais, matyti, kad plastifikuojančios įmaišos kiekis 1,2 % cemento masės yra optimalus betono paviršiaus kokybės atžvilgiu.



4.10 pav. Paviršinių oro porų kiekio pokytis pagal plastifikuojančios įmaišos kiekį

Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio P ir superplastiklio kiekio ryšio forma (SP) (4.10 pav.) matematiškai, atsižvelgiant į didžiausią koreliacijos k -to reikšmę, gali būti aprašyta pagal priklausomybę (32):

$$P_{sp} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (32)$$

čia: P_{sp} – oro porų kiekis sukietėjusio betono paviršiuje, vnt.; x – superplastiklio kiekis, %. Lygties koeficientai $a, b, c > 15$ mm skersmens oro poroms yra atitinkamai: -73,153; 185,09; -93,216 bei 10–15 mm skersmens oro poroms: -230,97; 620,15 ir -335,09.

Lygties empiriniai k -tai R^2 yra lygūs 0,131 ir 0,1836, atitinkamai koreliacijos k -tai r yra lygūs 0,362 ir 0,486. Gauti koreliacijos koeficientai yra artimi atitinkamai 0,3 ir 0,4. Šiuo atveju, remiantis koreliacijos koeficientų reikšmių dydžiais, tarp kintamųjų yra silpnas ryšys.

Kintant plastifikuojančios įmaišos polikarboksilato eterių polimerų pagrindu kiekiui nuo 0,8 % iki 1,6 % cemento masės, ribiniai įprasto betono mišinio šlyties įtempimai mažėja, klampa didėja, o gauta betono paviršiaus kokybės klasė pagal paviršiaus defektų plotą 1 m² kinta nuo 2–3 iki 4–5 klasių.

Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekį

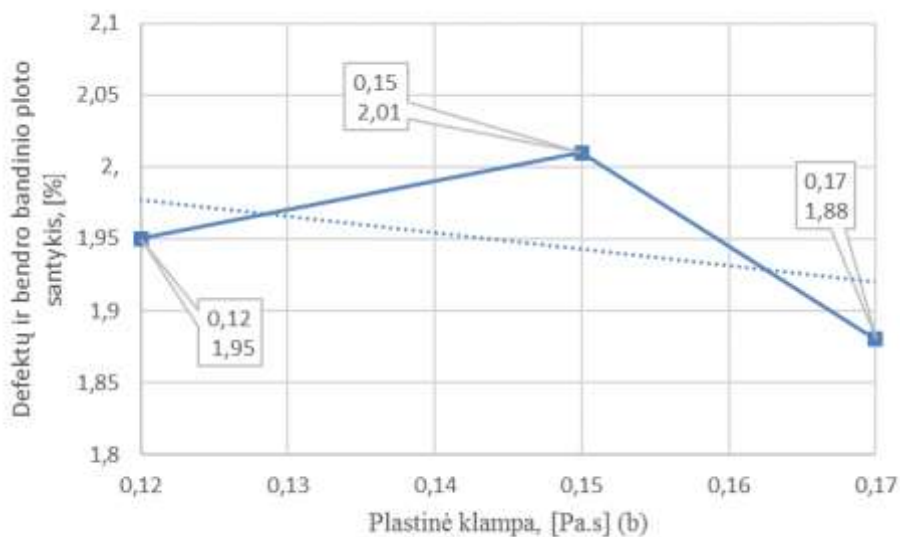
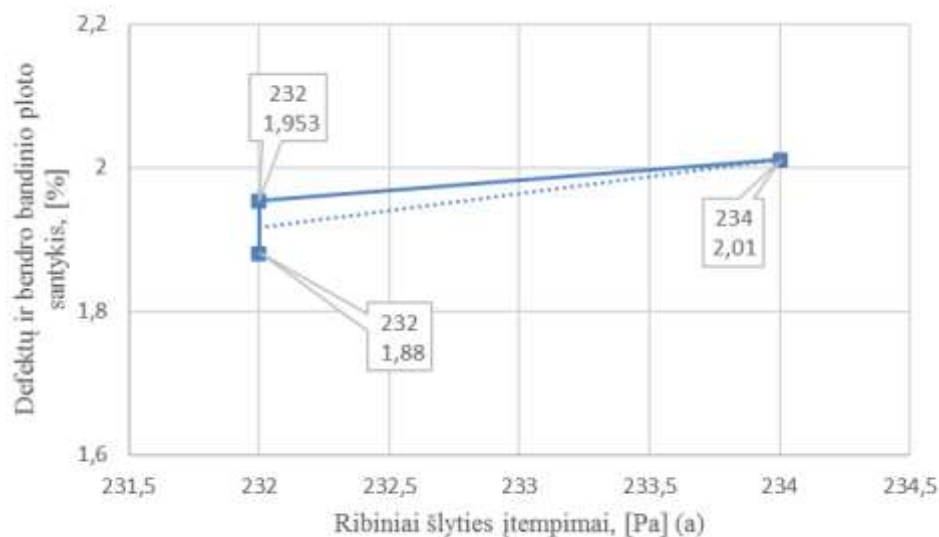
Tiriant mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos propoksilintų ir etoksilintų riebiųjų rūgščių pagrindu kiekio įtaką sukietėjusio betono paviršiaus kokybei, buvo vertinami iš trijų skirtingų sudėčių suformuotų betono bandinių paviršiai. Remiantis anksčiau nustatytomis reologinių savybių charakteristikomis, pasirinkti trys skirtingi įmaišos kiekiai: 0 % (BA5-0) – ribinis taškas, esant mažiausiam kiekiui; 0,15 % (BA5-3) – tarpinis taškas, esant vidutiniam kiekiui; 0,30 % (BA5-6) – ribinis taškas, esant didžiausiam kiekiui.

Nagrinėtų betono mišinio sudėčių technologinės bei reologinės savybės pateiktos 4.5 lentelėje.

4.5 lentelė. Betono mišinių serijos BA-5 savybės

Savybė	Betono mišinio sudėtis		
-	BA5-0	BA5-3	BA5-6
Technologinės savybės			
Tankis, kg/m ³	2400	2380	2380
Slankumas, mm	>220 (250)	>220 (250)	>220 (250)
Oro kiekis, %	2,2	2,00	1,95
Reologinės savybės			
Ribiniai šlyties įtempimai, Pa	234	232	232
Plastinė klampa, Pa·s	1,900	1,942	1,953
Defektų ir bendro bandinio ploto santykis bei paviršiaus kokybės klasė			
-	2,01	1,88	1,95
Santykinis paviršiaus defektų plotas, %	2,01	1,88	0,24
Klasė, CIB Report No. 24, 1973	4–5	2–3	4–5
Klasė, GOST 13015.0-83	A5	A3	A5

4.11 pav. pateiktos betono paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybės nuo įprastinio betono mišinio reologinių savybių: ribinių šlyties įtempimų (a) bei plastinės klamos (b). Iš 4.11 pav. pateiktų kreivių matyti, kad įprastos betono mišinio sudėties modifikavimas, keičiant mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekį, tai yra nežymus ribinių šlyties įtempimų mažėjimas ir plastinės klamos didėjimas neturi didelės įtakos, mažinant santykinį paviršiaus defektų plotą.

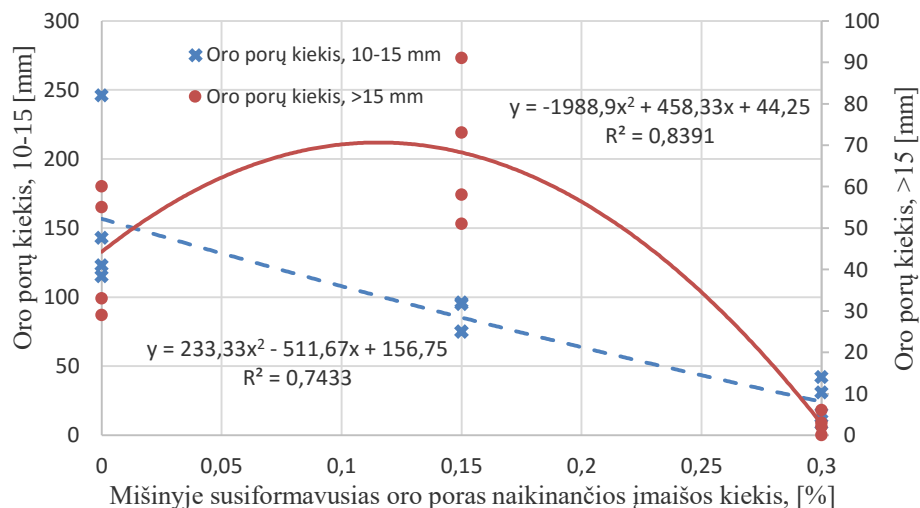


4.11 pav. Paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybė nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių, kintant mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekiui: (a) ribinių šlyties įtempimų ir (b) plastinės klamos

Kaip matyti iš 4.12 pav., betono paviršiaus oro porų kiekis kvadratiniam nagrinėjamo ploto metrui sumažėjo, didinant mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekį nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, o mišinio reologinių savybių reikšmėms didesnės įtakos tai neturėjo. Šiuo atveju 10–15 mm dydžio oro porų kiekis sumažėjo nuo 157 iki 24 vnt., o >15 mm sumažėjo nuo 44 iki 3 vnt.

Mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos naudojimas turi teigiamos įtakos betono paviršiaus kokybei. Oro poras naikinti įmaiša

propoksilintų ir etoksilintų riebiųjų rūgščių pagrindu suardo mišinyje susiformavusias oro poras maišant, klojant bei tankinant mišinį, dėl to sumažinama tokių oro porų formavimosi tikimybė sukietėjusio betono paviršiuje.



4.12 pav. Paviršiaus oro porų kiekio pokytis pagal mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekį

Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio P ir mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekio ryšio forma (OP) (4.12 pav.) matematiškai, atsižvelgiant į didžiausius koreliacijos k-tus, gali būti aprašyta pagal (33) priklausomybę:

$$P_{OP} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (33)$$

čia: P_{OP} – oro porų kiekis sukietėjusio betono paviršiuje, vnt.; x – mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekis, %. Lygties koeficientai a, b, c 10–15 mm skersmens poroms yra atitinkamai: 233,33; -511,67; 156,75 bei 10–15 mm skersmens poroms: -1988,9; 458,33 bei 44,25.

Lygties empiriniai k-tai R^2 yra lygūs 0,7433 ir 0,8391, atitinkamai koreliacijos k-tai r yra lygūs 0,862 ir 0,916. Gauti koreliacijos koeficientai yra artimi vienetui. Remiantis koreliacijos koeficientų reikšmių dydžiais, tarp kintamųjų yra stiprus ryšys.

Kintant mišinyje susiformavusias oro poras naikinančios įmaišos kiekiui nuo 0 % iki 0,3 % cemento masės, reologinių įprasto betono mišinio savybių reikšmės kito mažai, o gauta betono paviršiaus kokybės klasė pagal paviršiaus defektų plotą 1 m² kito nuo 4–5 iki 2–3 klasių (CIB Report No. 24, 1973) bei nuo A5 iki A3 (GOST 13015.0–83).

Klampą keičiančios įmaišos kiekio įtaka reologinėms betono mišinio savybėms bei betono paviršiaus porų kiekiui

Tiriant betono mišinio klampą modifikuojančios įmaišos didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų pagrindu kiekio įtaką suketėjusio betono paviršiaus kokybei, buvo vertinami iš trijų skirtingų sudėčių suformuotų betono bandinių paviršiai. Remiantis anksčiau nustatytais reologinių savybių charakteristikomis, pasirinkti trys skirtingi įmaišos kiekiai: 0 % (BA6-3) – ribinis taškas, esant mažiausiam kiekiui; 0,5 % (BA6-3) – tarpinis taškas, esant vidutiniam kiekiui; 1,1 % (BA6-6) – ribinis taškas, esant didžiausiam kiekiui.

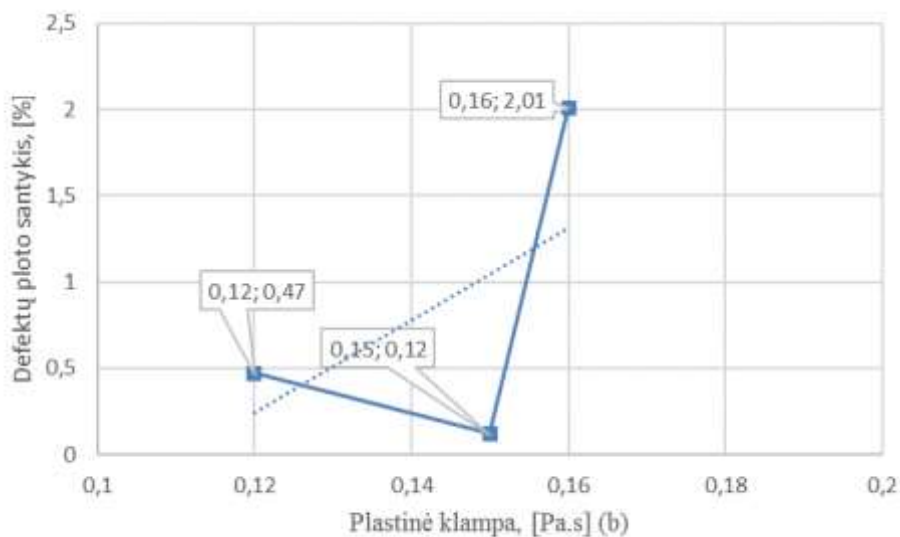
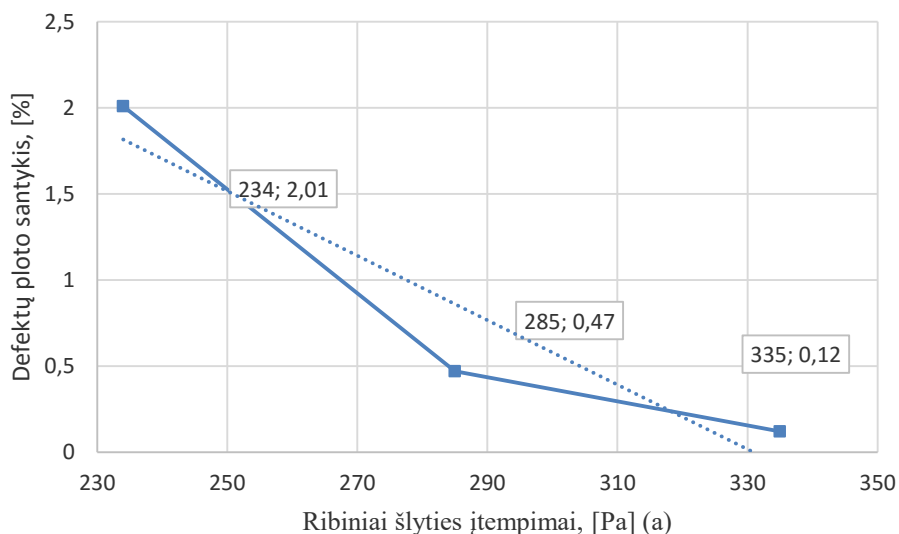
Technologinės bei reologinės nagrinėtų betono mišinio sudėčių savybės pateiktos 4.6 lentelėje.

4.6 lentelė. Betono mišinių serijos BA6 savybės

Savybė	Betono mišinio sudėtis		
-	BA6-0	BA6-3	BA6-6
Technologinės savybės			
Tankis, kg/m ³	2400	2380	2360
Slankumas, mm	>220 (250)	>220 (240)	>220 (230)
Oro kiekis, %	2,2	2,2	2,9
Reologinės savybės			
Ribiniai šlyties įtempimai, Pa	234	285	335
Plastinė klampa, Pa·s	1,900	1,900	1,759
Defektų ir bendro bandinio ploto santykis bei paviršiaus kokybės klasė			
-	2,01	0,47	0,12
Santykinis paviršiaus defektų plotas, %	2,01	0,47	0,12
Klasė, CIB Report no. 24, 1973	4–5	3–4	1–2
Klasė, GOST 13015.0-83	A5	A4	A2

4.13 pav. pateiktos betono paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybės nuo įprastinio betono mišinio reologinių savybių: ribinių šlyties įtempimų (a) bei plastinės klamos (b). Iš 4.13 pav. pateiktų kreivių matyti, kad įprastos betono mišinio sudėties gerinimas, keičiant klampą modifikuojančios įmaišos kiekį, tai yra ribinių šlyties įtempimų didėjimas pastebimai sumažino santykinį paviršiaus defektų plotą nuo 2,01 iki 0,12 %, o plastinės klamos didėjimas turėjo dvejopą poveikį santykiniam paviršiaus defektų plotui. Plastinei

klampai didėjant nuo 0,47 iki 1,759 Pa·s, santykinis paviršiaus defektų plotas sumažėjo nuo 0,47 iki 0,12 %, toliau didinant plastinę klampą nuo 1,759 iki 1,9 Pa·s, pastebėtas žymus santykinio paviršiaus defektų ploto padidėjimas nuo 0,12 iki 2,01 %.

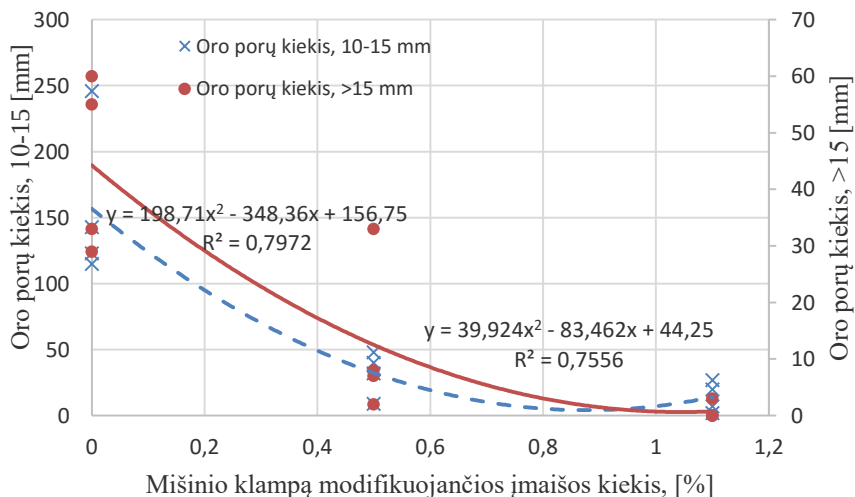


4.13 pav. Paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybė nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių, kintant klampą modifikuojančios įmaišos kiekiui: (a) ribinių šlyties įtempimų ir (b) plastinės klamos

Kaip matyti iš 4.14 pav., betono paviršiaus oro porų kiekis kvadratiniam nagrinėjamo ploto metrui sumažėjo, didinant klampą keičiančios įmaišos kiekį nuo 0

iki 1,1 % cemento masės, o reologinių mišinio savybių reikšmėms didesnės įtakos tai neturėjo. Šiuo atveju 10–15 mm dydžio oro porų kiekis sumažėjo nuo 157 iki 14 vnt., o >15 mm sumažėjo nuo 44 iki 1 vnt.

Klampą keičiančios įmaišos naudojimas turi teigiamos įtakos betono paviršiaus kokybei. Klampą modifikuojanti įmaiša didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų pagrindu suriša mišinyje esantį vandens perteklių, dėl to jam nereikia pasišalinti iš mišinio klojimo bei tankinimo metu, t. y. jis neuždaromas prie klojinio sienelės paviršiaus, o sukietėjusio betono paviršiuje nėra galimybės formuoti paviršinės poroms.



4.14 pav. Paviršinių porų kiekio pokytis pagal klampą keičiančios įmaišos kiekį

Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio P ir betono mišinio klampą keičiančios įmaišos kiekio ryšio forma (KM) (4.14 pav.) matematiškai gali būti aprašyta pagal priklausomybę (34):

$$P_{KM} = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (34)$$

čia: P_{KM} – oro porų kiekis sukietėjusio betono paviršiuje, vnt.; x – oro tuštumas naikinančios įmaišos kiekis, %. Lygties koeficientai a, b, c 10–15 mm skersmens oro poroms yra atitinkamai: 198,71; -348,36; 156,75 bei >15 mm skersmens oro poroms: 39,924; -83,462 bei 44,25.

Lygties empiriniai k -tai R^2 yra lygūs 0,7972 ir 0,7556, atitinkamai koreliacijos k -tai r yra lygūs 0,893 ir 0,869. Gauti koreliacijos koeficientai yra artimi vienetui. Remiantis koreliacijos koeficientų reikšmių dydžiais, tarp kintamųjų yra stiprus ryšys.

Kintant klampą keičiančios įmaišos kiekiui nuo 0 % iki 1,1 % cemento masės, reologinių įprasto betono mišinio savybių reikšmės kito mažai, o gauta betono paviršiaus kokybės klasė pagal paviršiaus defektų plotą 1 m² kito nuo 4–5 iki 1–2 klasių.

Reologinių betono mišinio savybių įtaka sukietėjusio paviršiaus kokybei, keičiant orą įtraukiančios įmaišos kiekį

Tiriant betono mišinio orą įtraukiančios įmaišos paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu kiekio įtaką sukietėjusio betono paviršiaus kokybei, buvo vertinami iš trijų skirtingų sudėčių suformuotų betono bandinių paviršiai. Remiantis anksčiau nustatytomis reologinių savybių charakteristikomis, pasirinkti trys skirtingi įmaišos kiekiai: 0 % (BA7-0) – ribinis taškas, esant mažiausiam kiekiui; 0,15 % (BA7-3) – tarpinis taškas, esant vidutiniam kiekiui; 0,30 % (BA7-6) – ribinis taškas, esant didžiausiam kiekiui.

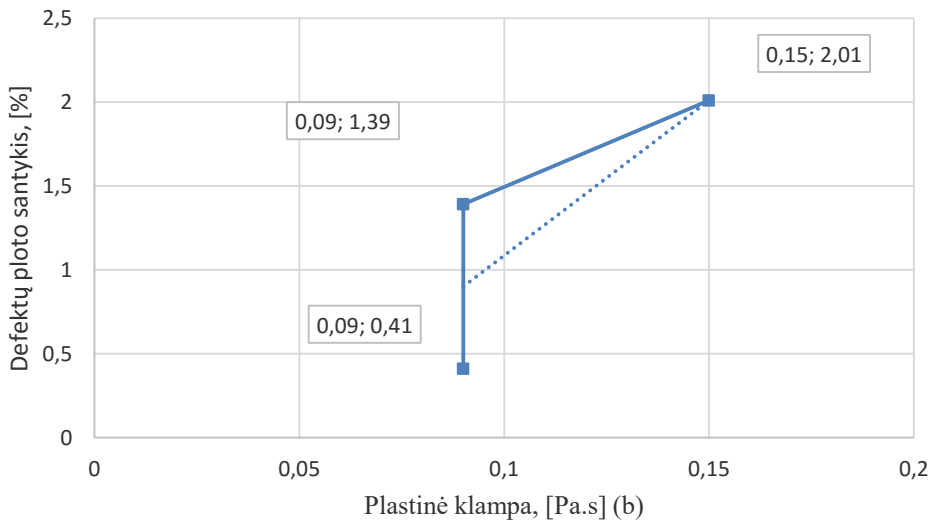
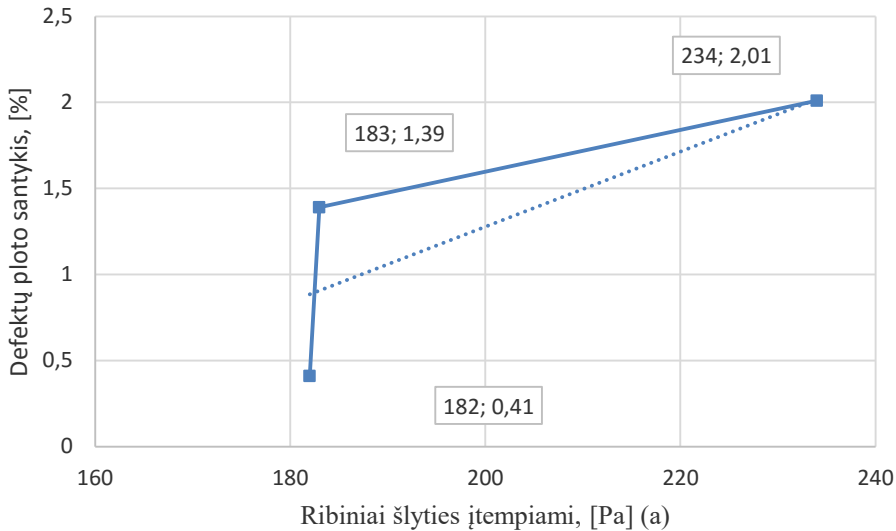
Technologinės bei reologinės nagrinėtų betono mišinio sudėčių savybės pateiktos 4.7 lentelėje.

4.7 lentelė. Betono mišinių serijos BA-7 savybės

Savybė	Betono mišinio sudėtis		
-	BA7-0	BA7-3	BA7-6
Technologinės savybės			
Tankis, kg/m ³	2400	2390	2380
Slankumas, mm	>220 (250)	>220 (260)	>220 (260)
Oro kiekis, %	2,2	5,1	3,6
Reologinės savybės			
Ribiniai šlyties įtempimai, Pa	234	183	182
Plastinė klampa, Pa·s	1,900	1,383	1,630
Defektų ir bendro bandinio ploto santykis bei paviršiaus kokybės klasė			
-	2,01	1,39	0,41
Santykinis paviršiaus defektų plotas, %	2,01	1,39	0,41
Klasė, CIB Report No. 24, 1973	4–5	4–5	—4
Klasė, GOST 13015.0-83	A5	A5	A4

4.15 pav. pateiktos betono paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybės nuo įprastinio betono mišinio reologinių savybių: ribinių šlyties įtempimų (a) bei plastinės klamos (b). Iš šiame pav. pateiktų kreivių matyti, kad įprastos betono mišinio sudėties modifikavimas, keičiant orą įtraukiančios

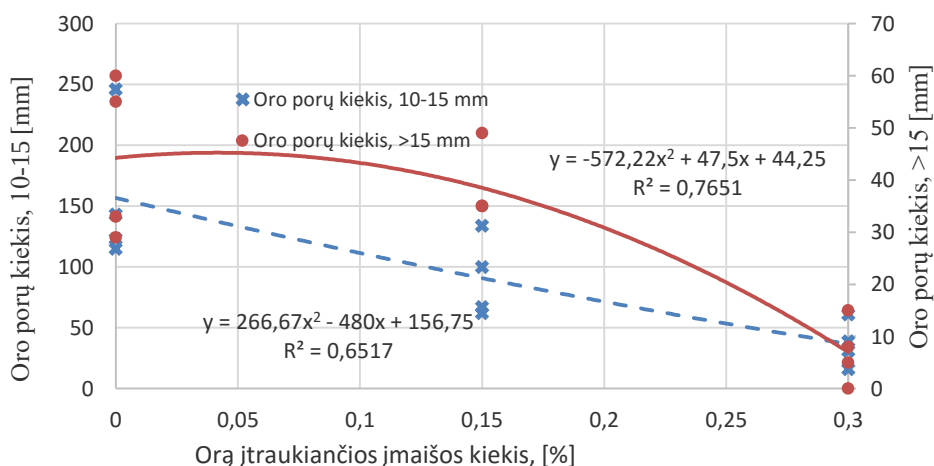
įmaišos kiekį, tai yra ribinių šlyties įtempimų bei plastinės klampos mažėjimas pastebimai padidino santykinę paviršiaus defektų plotą nuo 0,41 iki 2,01 %.



4.15 pav. Paviršiaus defektų ir nagrinėjamo 1 m² ploto santykio priklausomybė nuo reologinių įprastinio betono mišinio savybių, kintant orą įtraukiančios įmaišos kiekiui: (a) ribinių šlyties įtempimų ir (b) plastinės klampos

Kaip matyti iš 4.16 pav., betono paviršiaus oro porų kiekis kvadratiniam nagrinėjamo ploto metrui sumažėjo, didinant orą įtraukiančios įmaišos kiekį nuo 0 iki 0,3 % cemento masės, o mišinio reologinių savybių reikšmės tam neturėjo didesnės įtakos. Šiuo atveju 10–15 mm dydžio oro porų kiekis sumažėjo nuo 157 iki 37 vnt., o >15 mm sumažėjo nuo 44 iki 7 vnt.

Orą įtraukiančios įmaišos naudojimas turi teigiamos įtakos betono paviršiaus kokybei. Paviršinės betono poros susidaro, kai nepasišalinęs įtrauktas oras būna uždarytas prie klojinio sienelės paviršiaus. Kai kurių autorių nuomone, šios oro poros, labiau tikėtina, atsiras naudojant orą įtraukiančią įmaišą. Mokslininkai pažymi, kad orą įtraukiančios įmaišos sukelia vandens išsiskyrimą iš betono mišinio ir uždarytam orui tampa daug sunkiau pasiekti betono mišinio paviršių bei pasišalinti (Contractors ir Institute, 2005). O mokslininkas (Samuelsson, 1970o) prieštarauja šiam teiginiui, kad orą įtraukianti įmaiša blogina sukietėjusio betono paviršiaus kokybę. Autorius teigia, kad orą įtraukiančios įmaišos gali pagerinti betono paviršiaus kokybę, nes mišinyje susiformavusias stambias įtraukto oro poras suskaido į smulkesnes, kurios lengviau pasišalina į paviršių. Gauti tyrimų rezultatai patvirtina šio mokslininko nuomonę, kad orą įtraukiančios įmaišos naudojimas turi teigiamos įtakos sukietėjusio betono paviršiaus kokybei.



4.16 pav. Paviršinių oro porų kiekio pokytis pagal orą įtraukiančios įmaišos kiekį

Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio P ir betono mišinio orą įtraukiančios įmaišos kiekio ryšio forma (O) (4.16 pav.) matematiškai gali būti aprašyta pagal priklausomybę (35):

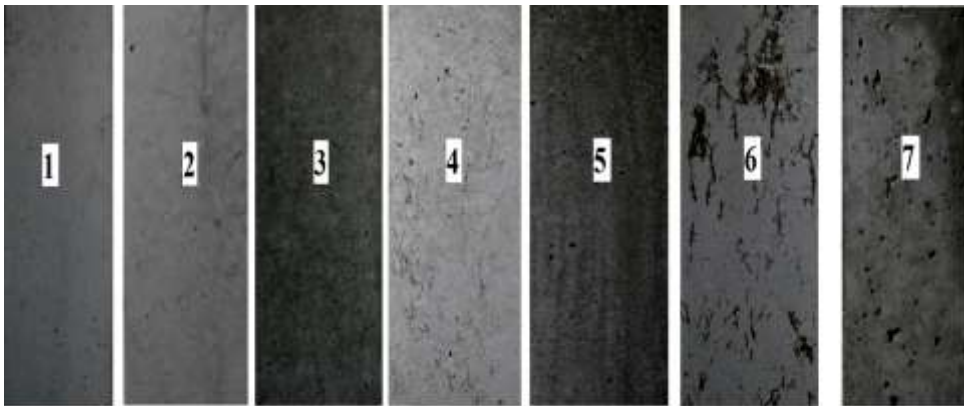
$$P_o = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (35)$$

čia: P_o – oro porų kiekis sukietėjusio betono paviršiuje, vnt.; x – oro tuštumas naikinančios įmaišos kiekis, %. Lygties koeficientai a, b, c 10–15 mm skersmens oro poroms yra atitinkamai: 266,67; -480; 156,75 bei >15 mm skersmens oro poroms: -572,22; 47,5 bei 44,25.

Lygties empiriniai k -tai R^2 yra lygūs 0,6517 ir 0,7651, atitinkamai koreliacijos k -tai r yra lygūs 0,807 ir 0,875. Gauti koreliacijos koeficientai yra artimi vienetui. Remiantis koreliacijos koeficientų reikšmių dydžiais, tarp kintamųjų yra stiprus ryšys.

Kintant orą įtraukiančios įmaišos kiekiui nuo 0 % iki 0,3 % cemento masės, ribiniai įprasto betono mišinio šlyties įtempiai ir klampa mažėjo, o gauta betono paviršiaus kokybės klasė pagal paviršiaus defektų plotą 1 m² kito nuo 4–5 iki 3–4 klasių.

4.17 pav. pateikti skirtingų betono paviršiaus klasių bandinių atvaizdai. Šis paveikslas sudarytas iš skirtingų reologinių savybių įprastinių modifikuotų betono mišinių suformuotų bandinių, kurių paviršius vertintas vaizdų analizės metodu, naudojant „BetonGUY 2.0“ programinę įrangą.



4.17 pav. Betono paviršiaus skirstymas į klases pagal tyrimų rezultatus (disertacijos autoriaus sudaryta skalė)

Apžvelgus reologinių pakeisto įprastinio betono mišinio savybių įtaką paviršiaus kokybei, matyti, kad siekiant, jog ji būtų aukšta, reikia atsižvelgti į mišinio sudėties modifikavimui pasirinktos atskiros sudedamosios dalies kiekį ir tipą. Taip pat svarbu pabrėžti, kad į betono paviršiaus kokybę reikia žiūrėti kaip į kompleksinį procesą, kuriam įtakos turi ne tik atskiros mišinio dalys, bet ir naudojamų klotinių tipas, tepalo rūšis ir kiekis, klojimo ir tankinimo procesai, žmogiškasis veiksnys ir kita. Tyrimuose taikytas skaitmeninis vaizdų analizės metodas betono paviršiaus kokybę leido įvertinti objektyviau nei žmogaus vaizdinis vertinimas, kai galutinį sprendimą priima žmogus. Pagal mišinio reologinių savybių įtaką pasirinktiems paviršiaus vertinimo kokybiniams rodikliams (paviršinių oro porų kiekį, jų pasiskirstymo dydį nagrinėjamame plote bei paviršinių defektų santykinį plotą) nagrinėjamus paviršius galima priskirti atskiroms betono paviršiaus klasėms (4.17 pav.).

4.8. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Kai stambiojo užpildo (4/16 fr. žvirgždas) ir bendro užpildų mišinio kiekio santykis buvo 0,52, gautas aukščiausios kokybės betono paviršius. Padidinus stambiojo užpildo santykį nuo 0,52 iki 0,72, padidėja stambių paviršiaus oro porų kiekis. Tai ypač m, stebint stambias (>15 mm) oro poras. Reikia pažymėti, kad taip pat buvo pastebėtas smulkesnių oro porų kiekio sumažėjimas, tačiau tai

- lėmė vandens perteklius, kai buvo per mažai smulkiojo užpildo. Tokia betono mišinio sudėtis negali būti naudojama dėl per didelio vandens atsiskyrimo.
2. Betono paviršiaus kokybei didelę įtakos turi smulkiojo užpildo bei smulkiųjų dalelių, kurių skersmuo yra ne didesnis kaip 0,25 mm, kiekis. Pastebėta, kad smulkiųjų dalelių kiekiui esant 430 kg 1 m³ mišinio, gaunamas labai aukštos kokybės betono paviršius, kuriame nėra susiformavusių didesnių kaip 10 mm didžiausio matmens paviršiaus defektų.
 3. Plastifikuojančios įmaišos kiekio betono mišinyje kitimas turi pastebimos įtakos betono paviršiaus kokybei. Kai mažas šios įmaišos kiekis (0,8 % nuo cemento masės), stebimas nemažas (90 vnt.) vidutinio dydžio (10–15 mm) oro porų kiekis į vieną kvadratinį metrą suketėjusio betono paviršiaus. Nustatyta, kad optimalus superplastiklio kiekis yra 1,2–1,4 % cemento masės. Šiuo atveju stambiausių oro porų skaičius gautas mažiausias (26 vnt. 10–15 mm bei 7 vnt. >15 mm).
 4. Mišinyje naudojama (0,3 % cemento masės) susiformavusias oro poras naikinanči įmaiša turėjo didelę, palyginti su paviršiais, kurie gauti nenaudojant šios įmaišos, įtaką betono paviršiaus kokybei. Ji sumažino didžiausių paviršinių oro porų kiekį nuo 156 iki 24 vnt. 10–15 mm bei atitinkamai nuo 44 iki 3 vienetų >15 mm 1 m² betono paviršiaus.
 5. Klampą modifikuojančios įmaišos taip pat pastebimai gerina betono paviršiaus kokybę, tai yra mažina didžiausių paviršiaus defektų skaičių. Lyginant betono paviršius, gautus nenaudojant šios įmaišos bei jos kiekiui esant 1,1 % cemento masės, didžiausių paviršiaus porų skaičius sumažėjo nuo 156 vnt. 10–15 mm bei 44 vnt. >15 mm iki atitinkamai 14 bei 1 vnt. 1 m² betono paviršiaus.
 6. Orą įtraukianti įmaiša turėjo dvejopos įtakos paviršinių oro porų skaičiui. Galima teigti, kad ji pastebimai gerina paviršiaus kokybę, nes mažina didžiausių oro porų kiekį. Jų sumažėjo tada, kai į betono mišinį buvo dėtas didžiausias (0,3 % cemento masės) kiekis. Lyginant skirtingus šios įmaišos kiekius (0,15 % bei 0,30 %), betono paviršiaus oro porų kiekio kitimas yra nevienodo pobūdžio. Kai yra mažesnis šios įmaišos kiekis, gana pastebimai mažėja smulkių oro porų iki 15 mm skaičius, tačiau stambiausioms poroms teigiamos įtakos neturi. Didesnis šios įmaišos kiekis gerokai mažina didžiausių oro porų skaičių, tačiau didina smulkiausių.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Neaptikta literatūros šaltinių, kuriuose būtų analizuojamos Lietuvoje labiausiai paplitusių įprastinių betono mišinių modifikavimo galimybės, siekiant tinkamos suketėjusio betono paviršiaus kokybės. Taip pat nėra vienos bendros sistemos ar metodikos, kuri objektyviai leistų įvertinti betono paviršiaus kokybę. Beveik visos metodikos remiasi subjektyvia tyrėjo nuomone, apibūdinant vienokį ar kitokį kintamąjį, kuris yra reikalingas betono paviršiaus kokybei įvertinti.
2. Naudojant programinę įrangą „BetongGUY 2.0“ vaizdų analizės metodu nustatytas betono paviršinių oro porų kiekis pagal jų didžiausią matmenį. Gauti

rezultatai perskaičiuoti į santykinį paviršiaus defektų plotą ir, remiantis užsienio literatūroje pateikta betono paviršiaus kokybės vertinimo skale, betono paviršiai suskirstyti į atitinkamas klases pagal CIB report No. 24 bei GOST 13015.0-83 standartus.

3. Stambiojo užpildo santykį su bendru mišinio užpildo kiekiu įprastiniame betono mišinyje padidinus nuo 0,32 iki 0,52, itin sumažėja ribiniai mišinio šlyties įtempiai bei plastinė klampa. 10–15 mm dydžio oro porų kiekis sumažėja nuo 148 iki 117 vnt., o didesnių kaip 15 mm oro porų kiekis sumažėja nuo 96 iki 37 vnt.
4. Smulkiųjų dalelių kiekio (cementas + smėlio dalelės iki 0,25 mm) didinimas įprastiniame betono mišinyje nuo 441 iki 600 kg 1 m³ mišinio žymiai mažina ne tik ribinius šlyties įtempius ir plastinę klampą, bet ir santykinį paviršiaus defektų plotą nuo 17,3 iki 0 %.
5. Plastifikuojančios įmaišos polikarboksilato eterių polimerų pagrindu kiekio iki 1,2 % cemento masės didinimas, kai pastovus V/C santykis, gerokai sumažina ribinius įprastinio betono mišinio šlyties įtempimus bei plastinę klampą. Santykinis paviršiaus defektų plotas sumažėja nuo 0,37 iki 0,28 %. Klampą keičiančios įmaišos didelės molekulinės masės sintetinių kopolimerų pagrindu kiekio didinimas iki 1,1 % cemento masės žymesnės įtakos reologinėms mišinio savybėms neturi, tačiau 10–15 mm dydžio oro porų kiekį sumažina nuo 157 iki 14 vnt., o didesnių kaip 15 mm oro porų kiekis sumažėja nuo 44 iki 1 vnt.
6. Orą įtraukiančios įmaišos paviršių aktyvinančių medžiagų pagrindu kiekio didinimas % cemento masės ne tik mažina įprastinio betono mišinio ribinius šlyties įtempius bei plastinę klampą, bet ir turi teigiamos įtakos betono paviršiaus kokybei. Klojant bei tankinant mišinį įmaiša neleidžia susiformuoti stambesnėms paviršinėms oro poroms, o smulkesnės mažiau pastebimos žmogaus akimi. Oro poras naikinančios įmaišos propoksilintų ir etoksilintų riebiųjų rūgščių pagrindu naudojimas žymesnės įtakos reologinėms įprastinio mišinio savybėms neturi, tačiau 10–15 mm dydžio oro porų kiekį sumažina nuo 157 iki 24 vnt., o didesnių kaip 15 mm oro porų kiekis sumažėja nuo 44 iki 3 vnt.
7. Sukietėjusio betono paviršiuje susiformavusių oro porų kiekio ir įprastinio betono mišinio sudėties modifikavimui pasirinktų atskirų sudedamųjų dalių ryšio forma matematiškai gali būti aprašyta pagal parabolinę priklausomybę, išskyrus oro porų kiekio ir 0/1 bei 0/4 frakcijos smėlių kiekių santykio smulkiajame užpildų mišinyje ryšio formą, kuri matematiškai gali būti aprašyta pagal eksponentinę priklausomybę. Gautos koreliacijos koeficientų reikšmės rodo, kad kintamųjų ryšys kinta nuo silpno iki stipraus.
8. Nepastebėta bendra tendencija, kad pagal įprastinio betono mišinio technologinę savybę – slankumą – būtų galima prognozuoti sukietėjusio betono paviršiaus kokybę. Į ją reikia žiūrėti kaip į kompleksinį procesą, kuriam įtakos turi naudojamų klojinių tipas, tepalo rūšis ir kiekis, mišinio klojimo ir tankinimo procesai, žmogiškasis veiksnys ir kita, tačiau didžiausios įtakos turi atskiros

įprastinio betono mišinio sudėties modifikavimui pasirinktos mišinio sudedamosios dalys.

LITERATŪRA

1. AIAD, I., S. ABD EL-ALEEM AND H. EL-DIDAMONY Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(11), 1839–1843.
2. AITCIN, P. C., S. JIANG, G. K. BYUNG AND P. C. NIKINAMUBANZI Cement/superplasticizer interaction the case of polysulfonates. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees*-233, 2001, 89–99.
3. AKINCI, B., F. BOUKAMP, C. GORDON, D. HUBER, et al. A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. *Automation in Construction*, 2006, 15(2), 124–138.
4. ALEXANDROU, N., M. MCGILVREAY AND G. BURGOS Steady Herschel–Bulkley fluid flow in three-dimensional expansions. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 2001, 100(1), 77–96.
5. ARSLAN, M. The effects of permeable formworks with sucker liners on the physical properties of concrete surfaces. *Construction and Building Materials*, 2001, 15(4), 149–156.
6. BANFILL, P. *Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of an International Conference, Liverpool, 1990*. Edition ed.: Taylor & Francis, 2003. ISBN 9780203473290.
7. BANFILL, P. Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology reviews*, 2006, 2006, 61.
8. BANFILL, P. F. G. Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(6), 2955–2960.
9. BARNES, H. A. *A handbook of elementary rheology*. Edition ed.: University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000. ISBN 9780953803200.
10. BARTOS, P. J. M., M. SONEBI AND A. K. TAMIMI *Report 24: Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests–Report of RILEM Technical Committee TC 145-WSM*. Edition ed.: RILEM publications, 2002. ISBN 2912143322.
11. BOERSMA, W. H., J. LAVEN AND H. N. STEIN Shear thickening (dilatancy) in concentrated dispersions. *AIChE journal*, 1990, 36(3), 321–332.
12. CAIRNS, J. Enhancements in surface quality of concrete through use of controlled permeability formwork liners. *Magazine of Concrete Research*, 1999, 51(2), 73–86.
13. CHEN, C., J. LIU, G. CUI AND J. LIU Effect of controlled permeable formwork on the improvement of concrete performances. *Procedia Engineering*, // 2012, 27(0), 405–411.
14. CHIDIAC, S. E., O. MAADANI, A. G. RAZAQPUR AND N. P. MAILVAGANAM Controlling the quality of fresh concrete - a new approach. *Magazine of Concrete Research*, Oct 2000, 52(5), 353–363.
15. CHIDIAC, S. E. AND F. MAHMOODZADEH Plastic viscosity of fresh concrete – A critical review of predictions methods. *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31, 535–544.
16. CHOW, T. Wetting of rough surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, 10(27), L445.

17. CIB REPORT NO. 24, C. W. Tolerances on blemishes of concrete, 1973.
18. COLLINS, F. AND J. G. SANJAYAN Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3), 459–462.
19. COMMISSION W 29 AND C. S. F. CIB. *Concrete Finishes - Tolerances for Blemishes: Tolerances on Blemishes of Concrete*. Edition ed., 1974.
20. CONTRACTORS, A. S. O. C. AND A. C. INSTITUTE *The Contractor's Guide to Quality Concrete Construction*. Edition ed.: American Society of Concrete Contractors, 2005. ISBN 9780870311673.
21. CONTRACTORS, A. S. O. C. AND A. C. INSTITUTE *The Contractor's Guide to Quality Concrete Construction, Third Edition*. Edition ed.: American Society of Concrete Contractors, 2008.
22. COUTINHO, J. S. Effect of controlled permeability formwork (CPF) on white concrete. *Aci Materials Journal*, 2001, 98(2).
23. DA SILVA, W. R. L., D. S. LUCENA, P. ŠTEMBERK AND L. R. PRUDÊNCIO JR Evaluation of the effect of concrete compositional changes and the use of ethyl-alcohol and biodegradable-oil-based release agents on the final surface appearance of self-compacting concrete precast elements. *Construction and Building Materials*, 2/15/ 2014, 52(0), 202–208.
24. DELARRARD, F., C. HU, T. SEDRAN, J. C. SZITKAR, et al. A new rheometer for soft-to-fluid fresh concrete. *Aci Materials Journal*, 1997, 94(3), 234–243.
25. EIDE, M. B., K. KASPERSEN, H. VIKAN AND H. SCHULERUD. Classification system for formed concrete surfaces. Nordic Concrete Research. Research Projects 2011. Proceedings of XXI Nordic Concrete Research Symposium. Hämeenlinna, Finland 2011. In.: Nordic Concrete Federation, 2011, p. 521–524.
26. FERRARIS, C. F., F. DE LARRARD AND N. MARTYS Fresh concrete rheology: recent developments. *Materials Science of Concrete VI*, Amer. Cer. Soc. Ed. S. Mindess, J. Skalny, 2001a, 215–241.
27. FERRARIS, C. F., F. DE LARRARD AND N. I. O. S. A. TECHNOLOGY *Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology*. Edition ed.: U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1998.
28. FERRARIS, C. F. AND J. M. GAIDIS Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. *Aci Materials Journal*, 1992, 89(4).
29. FERRARIS, C. F., K. OBLA AND R. HILL The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 2001b, 31(2), 245–255.
30. GEDEON, G. *Roller Compacted Concrete*. Edition ed.: Continuing Education and Development, Inc., 2006.
31. GUMULIAUSKAS, A. AND G. ABROMAVIČIUS Betono mišinio ir jo struktūros dalių ribinių šlyties įtempimų tyrimas. *Betonas ir gelžbetonis*, 2000, Konferencijų pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 47–52.
32. GUMULIAUSKAS, A. AND G. ABROMAVIČIUS Betono mišinio sudėties projektavimas. *Modern building materials, structures and techniques*, 2001, (Proceedings of the 7th international conference), 168–173.

33. GUMULIAUSKAS, A. AND G. SKRIPKIŪNAS. Betono mišinio klojimo ir reologinių savybių nustatymas. In *Modern Building Materials, Structures and Techniques. Proceedings of 4th International Conference.*: Vilnius: Technika, 1995, p. 92–98.
34. GURSKIS, V. *Statybinės medžiagos*. Edition ed. Kaunas: Ardiva, 2008.
35. HAN, L.-H. AND G.-H. YAO Influence of concrete compaction on the strength of concrete-filled steel RHS columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 6// 2003, 59(6), 751–767.
36. HAN, S., H. CHO, S. KIM, J. JUNG, et al. Automated and efficient method for extraction of tunnel cross sections using terrestrial laser scanned data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2012, 27(3), 274–281.
37. HARDING, M. A. Vibrating Concrete in Wall Forms. *Concrete Construction*, 1995, 40(2), 180–184.
38. HEWLETT, P. C. *Lea's chemistry of cement and concrete*. Edition ed. London: Arnold publishers, 1998.
39. HILAL, A. A., N. H. THOM AND A. R. DAWSON On entrained pore size distribution of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 1/30/ 2015, 75(0), 227–233.
40. HODNE, H. AND A. SAASEN The effect of the cement zeta potential and slurry conductivity on the consistency of oil-well cement slurries. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(11), 1767–1772.
41. HU, C. AND F. DE LARRARD The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(2), 283–294.
42. HU, C., F. DE LARRARD, T. SEDRAN, C. BOULAY, et al. Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. *Materials and Structures*, 1996, 29(10), 620–631.
43. HU, J. AND K. WANG Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(3), 1196–1204.
44. HURD, M. Pressure on Wall and Column Forms. *Concrete Construction*, 2002, 43–47.
45. KIM, M.-K., J. C. P. CHENG, H. SOHN AND C.-C. CHANG A framework for dimensional and surface quality assessment of precast concrete elements using BIM and 3D laser scanning. *Automation in Construction*, 1// 2015, 49, Part B(0), 225–238.
46. KREIJGER, P. C. The skin of concrete composition and properties. *Matériaux et Construction*, 1984/07/01 1984, 17(4), 275–283.
47. KWASNY, J., M. SONEBI, S. AMZIANE AND J. PLASSE EFFECT OF MIX COMPOSITION ON RHEOLOGY AND SURFACE FINISH OF CEMENT-BASED MORTARS 2014.
48. LACHEMI, M., K. M. A. HOSSAIN, V. LAMBROS, P. C. NKINAMUBANZI, et al. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(2), 185–193.

49. LALLEMANT, I., P. ROUGEAU, J. GALLIAS AND R. CABRILLAC Study of local Tint Defects on Concrete Surfaces-Influence of Superplasticizers and Other Parameters. ACI Special Publication, 2000, 195.
50. LANGE, F., H. MÖRTEL AND V. RUDERT Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. Cement and Concrete Research, 1997, 27(10), 1481–1488.
51. LEMAIRE, G., G. ESCADEILLAS AND E. RINGOT Evaluating concrete surfaces using an image analysis process. Construction and Building Materials, 10// 2005, 19(8), 604–611.
52. LIBESSART, L., P. DE CARO, C. DJELAL AND I. DUBOIS Correlation between adhesion energy of release agents on the formwork and demoulding performances. Construction and Building Materials, 2/1/ 2015, 76(0), 130–139.
53. MAHMOODZADEH, F. AND S. CHIDIAC Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete. Cement and Concrete Research, 2013, 49, 1–9.
54. MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. Journal of Colloid Science, 1951, 6(2), 162–170.
55. MURATA, J. AND H. KUKAWA Viscosity equation for fresh concrete. Aci Materials Journal, 1992, 89(3).
56. NEHDI, M., S. MINDESS AND P. AİTCIN Statistical modelling of the microfiller effect on the rheology of composite cement pastes. Advances in Cement Research, 1997, 9(33), 37–46.
57. NEHDI, M. AND M. A. RAHMAN Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. Cement and Concrete Research, 11// 2004, 34(11), 1993–2007.
58. NEMATİ, K. *Formwork for Concrete*. Edition ed., 2007. 35 p.
59. NEUBAUER, C. M., M. YANG AND H. M. JENNINGS Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions: effects of admixtures. Advanced Cement Based Materials, 1998, 8(1), 17–27.
60. PARK, C. K., M. H. NOH AND T. H. PARK Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5), 842–849.
61. PARK, H., H. LEE, H. ADELI AND I. LEE A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2007, 22(1), 19–30.
62. PARKER, S. P. *McGraw-Hill dictionary of scientific and technical terms*. Edition ed.: McGraw-Hill, 2003. ISBN 9780070423138.
63. PETERSON, B. Basic Photo Tips: Aperture, Shutter Speed, and ISO. In., 2008, vol. photo.net.
64. PÓLYA, G. AND G. SZEGÖ *Isoperimetric inequalities in mathematical physics*. Edition ed.: Princeton University Press, 1951. ISBN 0691079889.
65. PUERTAS, F., C. VARGA AND M. M. ALONSO Rheology of alkali-activated slag pastes. Effect of the nature and concentration of the activating solution. Cement and Concrete Composites, 10// 2014, 53(0), 279–288.

66. RAMACHANDRAN, V. S. *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. Edition ed.: Access Online via Elsevier, 1996. ISBN 0080946135.
67. ROSHAVELOV, T. Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(5), 831–835.
68. SAKAI, E., S. HOSHIMO, Y. OHBA AND M. DAIMON. The fluidity of cement paste with various types of inorganic powders. In *Proceesings of the 10th international congress of the chemistry of cement*. Sweeden: Amarkai AB, 1997, p. 8.
69. SAMUELSSON, P. Voids in Concrete Surfaces'. *ACI JOURNAL*, 1970, 869.
70. SHIH, N.-J. AND P.-H. WANG Using Point Cloud to Inspect the Construction Quality of Wall Finish. *Architecture in the Network Society*, 2004, 573–578.
71. SKRIPKIŪNAS, G. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Edition ed. Kaunas: Vitae Litera, 2007. 336 p. ISBN 978-9955-68-650-7.
72. SKRIPKIŪNAS, G. AND M. DAUKŠYS Dilatancy of cement slurries with chemical admixtures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, 10(3), 227–233.
73. STRUBLE, L., R. SZECSY, W.-G. LEI AND G.-K. SUN Rheology of cement paste and concrete. *Cement, concrete and aggregates*, 1998, 20(2), 269–277.
74. TANG, P., D. HUBER AND B. AKINCI Characterization of laser scanners and algorithms for detecting flatness defects on concrete surfaces. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010, 25(1), 31–42.
75. TASTANI, S. P., I. BALAFAS, A. DERSIS AND S. J. PANTAZOPOULOU Effect of core compaction on deformation capacity of FRP-jacketed concrete columns. *Construction and Building Materials*, 10// 2013, 47(0), 1078–092.
76. TATTERSALL, G. H. *Workability and Quality Control of Concrete*. Edition ed. London: E & F N Spon, 1991. ISBN 9780419148609.
77. TATTERSALL, G. H. AND P. F. G. BANFILL *The rheology of fresh concrete*. Edition ed.: Pitman Advanced Publishing Program, 1983. ISBN 9780273085584.
78. THE EUROPEAN GUIDELINES FOR SELF-COMPACTING CONCRETE. SPECIFICATION, P. A. U. 2005.
79. TUNIGAWA, Y., H. MORI, Y. KUROKAWA AND R. KOMURA Rheological study on slumping behaviour of fresh concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1992, 14, 1–8.
80. WALLEVIK, O. H. AND J. E. WALLEVIK Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*, Dec 2011, 41(12), 1279–1288.
81. WHITING, D., A. TODRES, M. NAGI, T. YU, et al. *Synthesis of current and projected concrete highway technology*. Edition ed.: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993. ISBN 030905267X.
82. WISAM, A. K. AND C. REX. Preliminary Study of the Effect of Revibration on Concrete-Steel Bond Strength. Lawrence: 1984.
83. ZHANG, M. H. AND K. S. CHIA Influence of chemical admixtures on workability of lightweight aggregate concrete. *National University of Singapore*, 2004, 1–12.

84. ZHANG, X. AND J. HAN The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. Cement and Concrete Research, 2000, 30(5), 827–830.
85. ZHU, Z. AND I. BRILAKIS Machine vision-based concrete surface quality assessment. Journal of Construction Engineering and Management, 2009, 136(2), 210–218.
86. БАЖЕНОВ, Ю. М. *Технология бетона*. Edition ed. Москва: Высшая школа, 1987.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

1. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas. The evaluation methods of decorative concrete horizontal surfaces quality // Materials science = Medžiagotyra / Kaunas University of Technology, Academy of Sciences of Lithuania. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1320. 2013, Vol. 19, no. 3, p. 343-348. DOI: org/10.5755/j01.ms.19.3.2006. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC]. [IF: 0,455, AIF: 3,535 (E, 2013)]. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.5; Persk. indėlis: 1]
2. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas. The Influence of Admixtures on the Technological Properties of Fresh Concrete Mixture // Materials science = Medžiagotyra / Kaunas University of Technology, Academy of Sciences of Lithuania. Kaunas : KTU. ISSN 1392–1320. 2015, Vol. 21, no. 4, p. 595–600. DOI: http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.21.4.5170. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC]. [IF: 0,455, AIF: 3,535 (E, 2013)]. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.5; Persk. indėlis: 1]
3. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas. Influence of mineral aggregates on the rheological properties of concrete mixture // Journal of physics: conference series. Bristol : IOP Publishing. ISSN 1742–6588. 2015, Vol. 602, art. no. 012009, p. [1–6]. DOI: 10.1088/1742–6596/602/1/012009. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 1]
4. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas. The influence of form release agent application to the quality of concrete surfaces // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [elektroninis išteklis] : 2nd International Conference on Competitive Materials and Technological Processes (IC-CMTP2), 8–12 October 2012, Miskolc-Lillafűred, Hungary. London : IOP Publishing. ISSN 1757–8981. 2013, Vol. 47, 012061, p. [1–6]. DOI: 10.1088/1757-899X/47/1/012061. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 1]
5. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas; Levulis, Linas. The distribution analysis of concrete horizontal surface air pores // Journal of sustainable architecture and civil engineering = Darnioji architektūra ir statyba / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija. ISSN 2029-9990. 2013, Nr. 2(3), p. 40–45. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.667; Persk. indėlis: 0.667]
6. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas; Brazas, Gintas. Influence of mineral aggregate concentration on the technological properties of fresh concrete mixture // Engineering structures and technologies. Vilnius : Technika ; London : Taylor & Francis. ISSN 2029-882X. 2013, vol. 5, no. 2, p. 54–60. DOI: 10.3846/2029882X.2013.811782. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 1]
7. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas; Villalon Fornes, Ignacio; Bertašius, Šarūnas. The insights of formed concrete surface quality evaluation using open source software

"ImageJ" // Advanced construction 2014 : proceedings of the 4th international conference, 9–10 October, 2014, Kaunas, Lithuania / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija. ISSN 2029–1213. 2014, p. 81–85. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.5; Persk. indėlis: 0.5]

8. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas. Monolitinių konstrukcijų vertinimas pagal jų paviršiaus kokybę : apžvalga // Statyba ir architektūra : jaunųjų mokslininkų konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas : Technologija, 2012, ISBN 9786090297567. p. 66–73. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 1; Persk. indėlis: 1]
9. Klovas, Albertas; Daukšys, Mindaugas. Apdailinio betono paviršiaus kokybė ir defektai // Statyba ir architektūra : jaunųjų mokslininkų konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas : Technologija, 2011, ISBN 9786090202555. p. 99–108. [M.kr. 02T]. [Indėlis: 0.5; Persk. indėlis: 0.167]

SL344. 2016-02-23, 13,5 leidyb. apsk. 1. Tiražas 10 egz. Užsakymas 86 .
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas