



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Nerijus Krankauskas

**PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ TEMPIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ
ELEMENTŲ PLEIŠĖTUMO IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ**

**CRACKING AND DEFORMATION ANALYSIS OF TENSILE STEEL FIBRE
REINFORCED CONCRETE MEMBERS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Specialiųjų statinių specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Gintaris Kaklauskas

(Vardas, pavardė)

30 05 2014

(Data)

Nerijus Krankauskas

**PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ TEMPIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ
ELEMENTŲ PLEIŠĖTUMO IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ**

**CRACKING AND DEFORMATION ANALYSIS OF TENSILE STEEL FIBRE
REINFORCED CONCRETE MEMBERS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Specialiųjų statinių specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

prof. habil dr. Gintaris Kaklauskas

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Lina Rutkienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Specialiųjų statinių specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Gintaris Kaklauskas

(Vardas, pavardė)

07-11-2013

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.

Vilnius

Studentui Nerijui Krankauskui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

**PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ TEMPIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖTUMO IR
DEFORMACIJŲ ANALIZĖ**

patvirtinta 2013 m. lapkričio 7 d. dekanų potvarkiu Nr. 576st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2014 m. birželio 3 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių (SFRC) elementų fizikinių modelių ir literatūroje skelbiamų eksperimentinių tyrimų apžvalgą. Išnagrinėti trumpalaikę apkrova veikiamų tempiamųjų SFRC elementų pleišėjimą (plyšių plotį, atstumą tarp plyšių) ir deformacijas. Naudojant literatūroje paskelbtus eksperimentinius duomenis, atlikti tempiamųjų SFRC elementų plyšių pločio, atstumo tarp plyšių skaičiavimus, patikrinti šių pleišėjimo charakteristikų nustatymo metodų adekvatumą. Sudaryti trumpalaikę apkrova veikiamų tempiamųjų RC ir SFRC elementų apkrovos ir deformacijų, atstumo tarp plyšių ir deformacijų, betono įtempių ir deformacijų priklausomybes. Teorinius skaičiavimus palyginti su eksperimentinių tyrimų rezultatais, įvertinti egzistuojančių modelių adekvatumą. Suformuluoti galutines darbo išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantė:

lekt. Lina Rutkienė

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

Vadovas

(Paraša)

prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas

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

Užduotį gavau

(Parašas)

Nerijus Krankauskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Nerijus Krankauskas, 20085244

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, SPSTfm-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

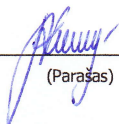
**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2014 m. gegužės 28 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Plieno plaušu armuotų tempiamųjų betoninių elementų pleišetumo ir deformacijų analizė“ patvirtintas 2013 m. lapkričio 7 d. dekanų potvarkiu Nr. 576st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Lina Rutkienė. Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas.

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


(Parašas)

Nerijus Krankauskas

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Tiltų ir specialiųjų statinių katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. *2*
Data *2014.05.29*

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Plieno plaušu armuotų tempiamųjų betoninių elementų pleišėjimo ir deformacijų analizė**

Autorius **Nerijus Krankauskas**

Vadovas **prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Rengiant šį magistro darbą siekta išnagrinėti trumpalaikę apkrova veikiamų tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių (SFRC) elementų pleišėjimą (plyšių plotį, atstumą tarp plyšių) ir deformacijas. Naudojant literatūroje paskelbtus eksperimentinius duomenis, buvo atlikti įprastojo betono (RC) ir SFRC tempiamųjų elementų plyšių pločio, atstumo tarp plyšių skaičiavimai, patikrintas šių pleišėjimo charakteristikų nustatymo metodų adekvatumas. Darbą sudaro įvadas, trys skyriai, galutinės darbo išvados, literatūros sąrašas ir penki priedai.

Pirmajame skyriuje atlikta SFRC elementų fizikinių modelių apžvalga, antrajame – aptarta Deluce'o eksperimentinė programa. Trečiasis skyrius skirtas tiriamajai darbo daliai. Čia pateikiamos gautos trumpalaikę apkrova veikiamų tempiamųjų RC ir SFRC elementų apkrovos ir deformacijų, atstumo tarp plyšių ir deformacijų, betono įtempių ir deformacijų priklausomybės. Taip pat atlikta minėtų elementų plyšių pločio, atstumo tarp plyšių skaičiavimo metodų analizė. Galiausiai teoriniai skaičiavimai palyginti su eksperimentinių tyrimų rezultatais, įvertintas egzistuojančių metodų adekvatumas.

Bendra darbo apimtis: 79 puslapiai su 58 iliustracijomis, 6 lentelėmis, 27 bibliografijos šaltinių sąrašu.

Prasminiai žodžiai: plieno plaušas, dispersinis armavimas, tempiamasis betonas, liekamieji įtempiai, atstumas tarp plyšių, plyšio plotis, deformacijos.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Bridges and Special Structures

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2014-05-29

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Cracking and deformation analysis of tensile steel fibre reinforced concrete members**

Author **Nerijus Krankauskas**

Academic supervisor **Prof Dr Habil Gintaris Kaklauskas**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

This Master thesis investigates the cracking behaviour (crack width, crack spacing) and deformations of tensile steel fiber reinforced concrete members subjected to short-term load. Using test data reported in the literature, adequacy of models for crack width and crack spacing for RC and SFRC members has been carried out. This paper consists of introduction, three sections, final conclusions and recommendations, list of references and five appendices.

The first chapter presents the literature review of SFRC material models. The second chapter covers experimental programme of Deluce dedicated to SFRC ties. Results of analysis of strain, crack spacing and crack width and concrete stress-strain relationships of tensile RC and SFRC members subjected to short-term load are discussed in the third chapter. Comparison of theoretical and experimental results for various methods has been carried out.

The total volume of this Master thesis: 79 pages, 58 pictures, 6 tables, 27 references.

Keywords: steel fiber, fiber reinforcement, tensile concrete, residual stress, crack spacing, crack width, deformations.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. LITERATŪROS APIE TEMPIAMOJO PLIENO PLAUSŲ ARMUOTO BETONO DEFORMACIJAS IR PLEIŠĖJIMĄ APŽVALGA	17
1.1. Mechaninės betono savybės	17
1.2. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės modeliavimas.....	19
1.3. Betono susitraukimo įvertinimas	23
1.4. Gelžbetoninių elementų pleišėjimo modeliavimas.....	25
1.4.1. Įprastų gelžbetoninių elementų pleišėjimo modeliai	25
1.4.2. Fibromis armuotų gelžbetoninių elementų pleišėjimo modeliai	28
1.5. Skyriaus išvados	32
2. J. R. DELUCE'O EKSPERIMENTINĖ PROGRAMA IR JOS MEDŽIAGŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ	33
2.1. Eksperimentinės programos apžvalga	33
2.2. Tyrimams naudotos medžiagos ir jų savybės	33
2.3. Betono mechaninių savybių bandymai ir jų rezultatų analizė.....	36
2.4. Skyriaus išvados	44
3. TEMPIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ PRIZMIŲ PLEIŠĖTUMO IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ	46
3.1. J. R. Deluce'o atlikti tempiamųjų gelžbetoninių prizmių bandymai.....	46
3.2. Tempiamųjų gelžbetoninių prizmių bandymų rezultatų analizė	48
3.3. Vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimų analizė.....	60
3.3. Plyšio pločio skaičiavimų analizė	67
3.5. Skyriaus išvados	74
BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	76
LITERATŪROS SĄRAŠAS	77
A priedas. J. R. Deluce'o atliktų eksperimentų duomenys.....	80
B.1 priedas. Tempiamųjų gelžbetoninių prizmių apkrovos ir deformacijos priklausomybės	84
B.2 priedas. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės.....	95
C priedas. Tempiamųjų gelžbetoninių prizmių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės	106
D priedas. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų normalizuotos priklausomybės	117

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Įprasto ir plieno plaušu armuoto gniuždomo betono suirimas (Kaklauskas <i>et al.</i> 2012)	17
1.2 pav. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal Mansourą (Mansour <i>et al.</i> 1987).....	19
1.3 pav. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal Limą (Lim <i>et al.</i> 1981).....	19
1.4 pav. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė (Lok, Xiao 1999)	21
1.5 pav. Plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal Naamaną (Naaman 2003)	22
2.1 pav. Bandymams naudotų <i>Dramix</i> fibrų forma.....	35
2.2 pav. Prizmės lenkimo bandymas pagal ASTM C 1609 (Deluce 2011)	37
2.3 pav. Prizmės lenkimo bandymas pagal Rilem TC 162 (Deluce 2011)	37
2.4 pav. Kaulo formos bandinių vienašis tempimo bandymas (Deluce 2011).....	40
2.5 pav. Fibrų kiekis, pasiskirstymas ir orientacija pagrindiniame atsivėrusiame plyšyje (Deluce 2011)	42
2.6 pav. FRC1 ($V_f = 0,5\%$, $l_f/d_f = 79$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė	42
2.7 pav. FRC2 ($V_f = 1,0\%$, $l_f/d_f = 79$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė	43
2.8 pav. FRC3 ($V_f = 1,5\%$, $l_f/d_f = 79$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė	43
2.9 pav. FRC4 ($V_f = 1,5\%$, $l_f/d_f = 55$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė	43
2.10 pav. FRC5 ($V_f = 1,5\%$, $l_f/d_f = 48$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė.....	44
3.1 pav. Bandinių su išilginiu armatūros strypu geometriniai parametrai (pagal Deluce 2011).....	47
3.2 pav. Prizmių su išilginiu armatūros strypu tempimo bandymas (Deluce 2011)	47
3.3 pav. H-150/20-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011).....	51
3.4 pav. H-150/20-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės.....	52

3.5 pav. H-100/20-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011).....	52
3.6 pav. H-100/20-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės.	52
3.7 pav. H-80/10-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011).....	53
3.8 pav. H-80/10-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės	53
3.9 pav. H-150/20-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011).....	53
3.10 pav. H-150/20-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės	54
3.11 pav. H-200/30-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)	55
3.12 pav. H-100/20-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)	55
3.13 pav. H-80/10-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)	55
3.14 pav. H-150/30-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)	56
3.15 pav. PC betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės	57
3.16 pav. FRC1 betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės	57
3.17 pav. H-80/10 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %	58
3.18 pav. H-100/20 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %	58
3.19 pav. H-150/20 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai l_f/d_f kinta nuo 48 iki 79	59
3.20 pav. PC betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės	60
3.21 pav. FRC2 betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės	60
3.22 pav. Išmatuotų ir pagal CEB-FIP 1978 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$	62

3.23 pav. Išmatuotų ir pagal CEB-FIP 1990 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$	62
3.24 pav. Išmatuotų ir pagal ENV 1992-1-1:1991 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$	63
3.25 pav. Išmatuotų ir pagal ENV 1992-1-1:2003 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$	63
3.26 pav. Išmatuotų ir pagal Rilem TC 162-TDF (Dupont, Vandewalle 2003) modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$ (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	64
3.27 pav. Išmatuotų ir pagal Moffatto pasiūlytą modelį (CEB-FIP 1990) apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$	65
3.28 pav. Išmatuotų ir pagal Moffatto pasiūlytą modelį (ENV 1992-1-1:2003) apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$ (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	65
3.29 pav. Išmatuotų ir pagal Deluce'o pasiūlytą modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$ (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014)	66
3.30 pav. Išmatuotų ir pagal Deluce'o pasiūlytą modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas visoms apkrovimo stadijoms	67
3.31 pav. PC bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	68
3.32 pav. FRC1 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	69
3.33 pav. FRC2 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	69
3.34 pav. FRC3 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	69
3.35 pav. FRC4 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	70

3.36 pav. FRC5 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	70
3.37 pav. PC ir FRC1 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$	71
3.38 pav. FRC2 ir FRC3 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$	71
3.39 pav. FRC4 ir FRC5 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$	71
3.40 pav. Maksimalaus ir vidutinio plyšių pločių santykio ($w_{cr,max}/w_{cr,avg}$) ir plieno plaušo indekso ($V_f(l_f/d_f)$) priklausomybė.....	72
3.41 pav. Maksimalių išmatuotų ir Deluce'o apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas (pagal Deluce <i>et al.</i> , 2014).....	73
3.42 pav. Maksimalių išmatuotų ir, rengiant baigiamąjį darbą, pagal Deluce'o pasiūlytą modelį (2014) apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas	73
3.43 pav. Maksimalių išmatuotų ir, rengiant baigiamąjį darbą, pagal Deluce'o pasiūlytą modelį (2014) apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$	74

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Vieno kubinio metro sauso betono mišinio sudėtis (Deluce 2011).....	34
2.2 lentelė. Fibrų mechaninės savybės (pagal Deluce, 2011)	35
2.3 lentelė. Armatūros strypų mechaninės savybės (pagal Deluce, 2011).....	36
2.4 lentelė. Prizmių lenkimo ir kaulo formos elementų tempimo bandymų rezultatai (pagal Deluce, 2011).....	38
2.5 lentelė. Fibrų orientacijos faktorius apskaičiuotas iš fibrų, kertančių pagrindinį plyšį, kiekio (pagal Deluce, 2011).....	41
2.6 lentelė. Betono tempiamojo stiprio ir tempiamojo stiprio lenkiant rezultatų palyginimas ..	44

IVADAS

Darbo aktualumas

Gelžbetonis – viena plačiausiai statyboje naudojamų medžiagų, išpopuliarėjusi XX amžiuje. Šiuo metu didžioji dalis statinių, ypač specialiosios paskirties (pvz., tiltų, tunelių, elektrinių, užtvankų, rezervuarų, bokštų ir t.t), yra būtent gelžbetoniniai. Tokių konstrukcijų standumas ir stiprumas priklauso nuo daugelio faktorių: aplinkos poveikio, išorinių apkrovų ar eksploataavimo sąlygų. Šie ir daugelis kitų veiksnių lemia gelžbetoninių konstrukcijų ilgaamžiškumą ir patikimumą. Todėl, projektuojant konstrukcijas, svarbu įvertinti ne tik anksčiau minėtus faktorius, bet ir konstrukcijos pleišėjimą, deformacijas.

Didėjant betono gamybos apimtims, imta ieškoti būdų, kaip pagerinti šios medžiagos mechanines savybes. Vienas tokių būdų yra betono armavimas dispersine armatūra (angl. *Fiber reinforced concrete, FRC*). Tai šiandien pasaulyje laikoma viena iš pagrindinių statybinių konstrukcijų vystymosi sričių. Plaušu armuotas betonas yra žymiai pranašesnis už įprastąjį dėl plastiškesnio suirimo pobūdžio bei dispersinės armatūros gebėjimo varžyti plyšių vystymąsi. Toks armavimas gali visiškai pakeisti strypinę armatūrą konstrukciniuose elementuose, kuriuose armatūra naudojama galimam pleišėjimui suvaržyti, pvz: sienų, pamatų, grindų armavimui ir pan. Dispersinė armatūra gali būti naudojama ir įprastinėse bei įtemptosiose gelžbetoninėse konstrukcijose.

Plieno plaušas neturi didesnės įtakos gniuždomajam betono stipriui ir tamprumo moduliui, tačiau lemia tempiamojo betono suirimo pobūdį. Nearmuoto tempiamojo betono suirimas yra trapus, o dispersiškai armuoto – pastebimai plastiškesnis. Tai lemia dispersiškai pasiskirsčiusių fibrų sukeltas tempimo deformacijų suvaržymas. Dispersinio armavimo poveikis betoniniam elementui yra daug efektyvesnis nei strypinės armatūros, kadangi tempimo deformacijos varžomos visame tempiamosios zonos tūryje. Įprastiniame gelžbetoniniame elemente tempimo deformacijos varžomos tik tam tikrame armatūros ir betono sąveikos plote. Kadangi plaušas varžo elemento pleišėjimą, priešeksplotacines betono susitraukimo deformacijas bei perima dalį tempimo įtempių plyšiuose, konstrukcinis elementas tampa standesnis, sumažėja atsiveriančių plyšių plotis ir atstumas tarp jų. Dėl betono trapumo ir mažo tempiamojo stiprio eksploatuojamose konstrukcijose neretai atsiveria neleistino pločio plyšiai: plieninė armatūra intensyviai rūdija, o susidarę korozijos produktai toliau ardo betono struktūrą. Nesiimant apsaugos ar stiprinimo veiksmų, konstrukcija greitai tampa netinkama eksploatuoti.

Nors dispersiškai armuotas betonas pasižymi geresnėmis eksploatacinėmis savybėmis nei paprastas, šiuo metu jis nėra plačiai taikomas. Pagrindinė to priežastis – dispersiškai armuotų betono ir gelžbetonio konstrukcijų projektavimą reglamentuojančių normų trūkumas. Dėl didelės plaušo tipų ir formų įvairovės, taip pat dėl sunkumų nustatant plaušo ir betono sąveiką, iki šiol nėra pasiūlyta patikimų dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių ir deformacijų dėsnų. Kiekvienu atveju atliekami specifiniai, pakankamai sudėtingi ir brangūs bandymai (DBV 2001, RILEM TC162-TDF 2002), kurių metu gaunamos liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybės, tačiau jos neatspindi realių matmenų konstrukcinių elementų elgsenos. Egzistuojančios gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normų nuostatos, skirtos paprastiems konstrukciniams elementams skaičiuoti, negali būti taikomas sudėtingų formų konstrukcijoms ir apkrovimo atvejams. Pavyzdžiui, JAV projektavimo normos ACI-544.4R-88 yra skirtos plieno plaušu armuoto betono ir gelžbetonio projektavimui, tačiau jose pateikti metodai dar nėra pakankamai tikslūs (skaičiavimų rezultatai pastebimai skiriasi nuo eksperimentinių) ir gali būti taikomi tik esant tam tikroms apibrėžtoms sąlygoms. Tuomet konstrukcijų skaičiavimui gali būti taikomos baigtinių elementų programos, įvertinančios netiesinę gelžbetonio elgseną.

Taikant skaitinius metodus, didelę įtaką skaičiavimo rezultatams turi taikomi fizikiniai medžiagų modeliai. Vienas tokių yra tempiamojo supleišėjusio dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių ir plyšio pločio ($\sigma_{fr}-w$) priklausomybė, kuri iki šiol yra mažai ištirta. Tiek Lietuvos (STR 2.05.05:2005), tiek Europos (EC2) projektavimo normose tokia priklausomybė nėra reglamentuota nei trumpalaikio, nei ilgalaikio apkrovimo atveju (yra pateikiami tik gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės grafikai). Todėl projektuotojai, taikydami šių normų nuostatas, negali tinkamai įvertinti sudėtingesnių konstrukcijų įtempių ir deformacijų būvio.

Šiame darbe, atliekant tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų eksperimentinių bandymų analizę, siekiama patikrinti fizikinius modelius, skirtus plyšio pločiui ir atstumui tarp plyšių apskaičiuoti, ir nustatyti tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų apkrovos ir deformacijų priklausomybę po supleišėjimo

Tyrimų objektas ir metodai

Darbe nagrinėjami trumpalaikę apkrovą veikiami tempiamieji įprastiniai ir plieno plaušu armuoti gelžbetoniniai elementai, atliekama jų pleišėjimo bei deformacijų analizė. Objektas tiriamas makrolygiu, t.y. plaušu armuotas betonas nagrinėjamas kaip homogeninė medžiaga.

Įvertinus betono susitraukimo poveikį bandiniams, sudaromos tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų apkrovos ir deformacijų priklausomybės, kuriose stebimas tempiamojo sustadėjimo efektas ir plieno plaušo poveikis supleišėjusių elementų elgsenai. Iš šių priklausomybių, atlikus papildomus skaičiavimus sudaromos betono tempimo įtempių ir deformacijų ($\sigma - \varepsilon$) diagramos. Taip pat atlikta šių elementų pleišėjimo analizė, t.y. patikrintas egzistuojančių plyšio pločio ir atstumo tarp plyšių nustatymo modelių adekvatumas skaičiavimo rezultatus lyginant su eksperimentiniais duomenimis.

Darbo tikslui pasiekti buvo taikomi analitiniai ir skaitiniai metodai.

Darbo tikslas

Šio tyrimo tikslas – išnagrinėti trumpalaikę apkrova veikiamų tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišėjimą (plyšių plotį, atstumą tarp plyšių) ir defomacijas, teorinius skaičiavimo rezultatus lyginant su eksperimentiniais duomenimis.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų fizikinių modelių apžvalgą.
2. Apžvelgti atliktus eksperimentinius tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų tyrimus.
3. Gauti trumpalaikę apkrova veikiamų tempiamųjų įprastinių ir plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų apkrovos ir deformacijų, atstumo tarp plyšių ir deformacijų, betono tempimo įtempių ir deformacijų priklausomybes.
4. Atlikti įprastų ir plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų plyšių pločio, atstumo tarp plyšių skaičiavimo metodų analizę.
5. Atlikti teorinių skaičiavimų ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimą, įvertinti egzistuojančių metodų adekvatumą.

Naujumas ir originalumas

Naudojantis literatūroje paskelbtais eksperimentiniais duomenimis, darbe atlikti įprastų ir plieno plaušu armuotų tempiamųjų gelžbetoninių elementų plyšių pločio, atstumo tarp plyšių skaičiavimai, patikrintas šių pleišėjimo charakteristikų nustatymo metodų adekvatumas. Kadangi anksčiau tokie išsamūs tyrimai nebuvo atlikti ir publikuoti, tai nebuvo galimybės patikrinti minėtų skaičiavimų modelių tinkamumą.

Darbo struktūra

Darbe yra 79 kompiuteriu sumaketuoti puslapiai su 58 iliustracijomis, 6 lentelėmis, 27 bibliografijos šaltinių sąrašu.

Darbas sudarytas iš trijų skyrių. Įvade aptariamas darbo aktualumas, naujumas, tikslai ir uždaviniai.

Pirmajame skyriuje atlikta tempiamojo plieno plaušu armuoto betono fizikinių modelių apžvalga, aprašyti pleišėjimo modeliai tempiamiems įprastiems ir plieno plaušu armuotiems gelžbetoniniams elementams. Aptartas susitraukimo eliminavimas iš eksperimentinių tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų bandymų rezultatų ir jo įtaka tempiamojo sustandėjimo efektui.

Antrajame skyriuje aprašyti J. R. Deluce'o eksperimentinės programos betoninių cilindų gniuždymo, prizmių laisvojo susitraukimo, prizmių lenkimo, kaulų formos elementų tempimo bandymai, jiems naudota įranga, aprašytos naudotos fibros, armatūrinis plienas, aptarti ir vertinti eksperimentų rezultatai.

Trečiajame skyriuje aprašyti J. R. Deluce'o atlikti gelžbetoninių prizmių tempimo bandymai. Iš eksperimentinių rezultatų eliminuojamas betono susitraukimas, sudaromos apkrovos ir deformacijų priklausomybės, kuriomis įvertinamas tempiamojo sustandėjimo efektas ir plieno plaušo poveikis supleišėjusio tempiamojo elemento elgsenai. Taip pat nustatomos betono tempimo įtempių ir deformacijų priklausomybės. Pagrindinis dėmesys skiriamas įprastų ir plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų plyšių pločių, atstumo tarp plyšių skaičiavimo metodų analizei, teorinius skaičiavimų rezultatus lyginant su eksperimentiniais duomenimis.

Darbo pabaigoje pateikiamos galutinės išvados ir rekomendacijos.

Padėka

Autorius išreiškia nuoširdžią padėką savo vadovui, Tiltų ir specialiųjų statinių katedros vedėjui, *prof. habil. dr. Gintariui Kaklauskui*, už rekomendacijas ir patarimus rengiant šį baigiamąjį magistro darbą. Už visokeriopą pagalbą taip pat dėkoja *Adui Meškėnui* ir *Vaidotui Gelažiui*, Vilniaus Gedimino technikos universiteto Tiltų ir specialiųjų statinių katedros doktorantams.

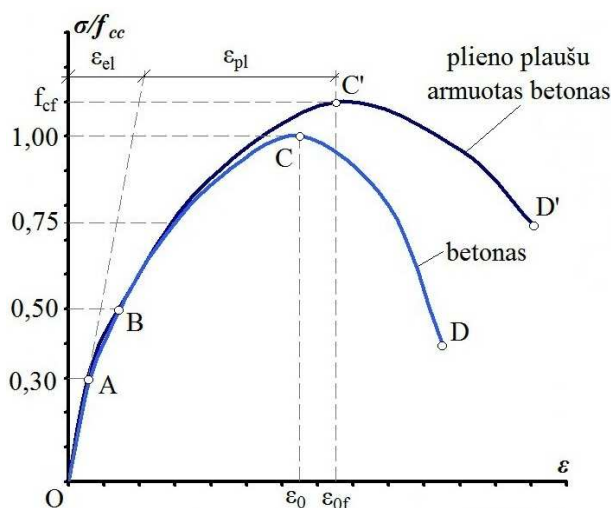
1. LITERATŪROS APIE TEMPIAMOJO PLIENO PLAUSŲ ARMUOTO BETONO DEFORMACIJAS IR PLEIŠĖJIMĄ APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgiamas plieno plaušu armuotas betonas (angl. *steel fiber reinforced concrete*; toliau tekste SFRC), jo tempimo įtempių ir deformacijų priklausomybės, aptariami pleišėjimo modeliai. Palyginamos paprastojo ir dispersiškai armuotojo betono mechaninės savybės. Nusakomi šio armavimo būdo privalumai bei trūkumai eksploataciniu ir gamybiniu požiūriu.

1.1. Mechaninės betono savybės

Betonas – tai statybinė medžiaga, sudaryta iš cemento, užpildų (smėlio, žvyro arba skaldos), cheminių priedų ir vandens. Dėl nesudėtingos gamybos technologijos ir nebrangių sudedamųjų medžiagų betonas yra labai plačiai naudojamas statyboje. Šios medžiagos tempiamasis stipris tesudaro 5-15 % gniuždomojo stiprio (LST EN 1992-1-1 3.1 lentelė). Tai lemia tempiamųjų gelžbetoninių elementų pleišėjimą veikiant sąlyginai nedidelėms apkrovoms. Atsivėrus plyšiams, armatūra ima koroduoti, o apsauginiame betono sluoksnyje toliau vyksta mikropleišėjimas dėl patenkančios drėgmės bei temperatūros poveikių.

Taip pat vienas pagrindinių betono trūkumų – trapus suirimas, kuris įvyksta tiek gniuždymo, tiek tempimo metu. Veikiant ribinėms apkrovoms, trapūs elementai gali suirti be pastebimų deformacijų, pleišėjimo ir pan. Dispersinis armavimas pakeičia suirimo pobūdį, jis tampa plastiškesnis (žr. 1.1 pav). Tyrimai rodo, jog, priklausomai nuo plaušo kiekio bei formos, ribinės gniuždomojo betono deformacijos gali būti iki keturių kartų didesnės (Shah 1987).



1.1 pav. Įprasto ir plieno plaušu armuoto gniuždomo betono suirimas (Kaklauskas et al. 2012)

Nedidelio ilgio ir skersmens plieninių fibrų įmaišymas betono matricoje pastebimai pagerina tempiamo sukietėjusio betono elgseną. Kai plieninės fibros tinkamai išmaišomos betone, jos tolygiai dispersiškai pasiskirsto per visą medžiagos tūrį ir atsitiktinai orientuojasi visomis trimis kryptimis (Naaman 1972; Voo, Foster 2003). Tiriant tempiamo betono pleišėjimą, pastebima, kad plyšio plokštumą kerta bet kaip orientuotos fibros. SFRC elementuose po plyšių atsivėrimo galima stebėti medžiagos tempiamojo standėjimo efektą, kai, veriantis plyšiui, plieninės fibros kerta plyšį ir įsitraukia į darbą perimdamos dalį tempimo jėgos. Plyšiui didėjant, didėja ir jėga fibroje iki kol pasiekiamas tempiamasis fibros stipris ir ji nutrūksta staiga prarasdama laikomąją galią arba iki kol trumpesniajame fibros gale nugalimos inkaravimo jėgos ir ji pradedama ištraukinėti taip laipsniškai mažėjant laikomajai galiai (Voo, Foster 2003; Lee *et al.* 2011). Kai betono mišinyje yra pakankamas fibrų kiekis su dideliu ilgio ir skersmens santykiu, medžiagoje gali pasireikšti tempiamasis sustiprėjimas. Šiuo atveju didesnis fibrų, kertančių plyšį, kiekis leidžia perduoti jėgą, didesnę už pleišėjimo apkrovą. Tokiu būdu betone gali susiformuoti daugiau negu vienas plyšys, net tada, kai nenaudojamas išilginis armatūros strypas.

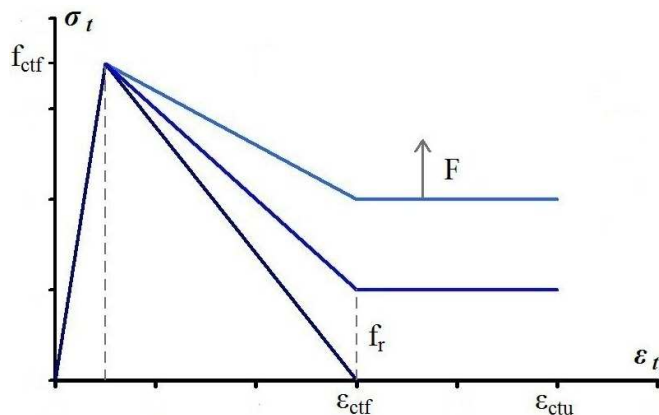
Plyšiai, kurie formuojasi fibromis ir išilginiu strypu armuotame elemente, yra siauresni ir išsidėstę mažesniais atstumais nei plyšiai, atsirandantys tik išilgine armatūra armuotuose elementuose (angl. *reinforced concrete*, toliau tekste RC). Kai fibros ir išilginė armatūra kerta plyšį, tempimo jėga plyšyje pasiskirsto tarp armatūros strypo ir fibrų, todėl armatūros strypui tenka mažesnė apkrovos dalis lyginant su RC elementu esant tam pačiam apkrovimo lygiui. Tai lemia ir mažesnius įtempius bei deformacijas armatūros strype, o kartu mažesnius vietinius pailgėjimus plyšio zonoje ir plyšių pločius. Be to, dėl fibrų perduodamos tempimo jėgos betonui tempiamieji įtempiai jo matricoje tarp plyšių auga sparčiau SFRC negu RC elementuose. Tokiu būdu formuojasi mažesni atstumai tarp plyšių (Lee *et al.* 2013). Tai rodo, kad fibros pagerina pleišėjimo charakteristikas, taip pat lemia tempiamojo sustandėjimo efekto atsiradimą ir didesnę laikomosios galios atsargą patekėjus armatūrai SFRC elementus lyginant su tokiais pat RC elementais.

Analizuojant ir projektuojant SFRC elementus labai svarbu tiksliai sumodeliuoti pleišėjimo charakteristikas, atsižvelgiant į pleišėjimo bei tempimo įtempių ir deformacijų tarpusavio priklausomybę. Keletas mokslininkų teoriškai ištyrė tempiamų SFRC elementų elgseną, labiau skirdami dėmesį tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybei, o ne paprasto vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo modelio sukūrimui (Stang, Aarre 1992; Stang *et al.* 1995; Chiaia *et al.* 2009). Toliau aptariami betono įtempių ir deformacijų priklausomybės bei pleišėjimo modeliai.

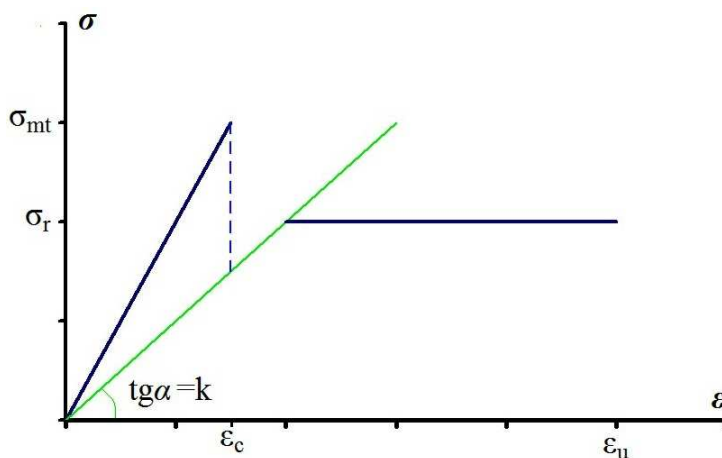
1.2. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės modeliavimas

Tempiamas nearmuotas betonas, pasiekęs tempiamąjį stiprį, suyra trapiiai. Nors plieno plaušas neturi didesnės įtakos betono tamprumo moduliui ir tempiamajam stipriui, tempiamojo plieno plaušu armuoto betono suirimas tampa daug plastiškesnis (Abrishami, Mitchell 1997). Literatūros šaltiniuose pateikiama keletas plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybių, kuriomis apibūdinama tempiamojo plieno plaušu armuoto betono elgsena.

Vieną paprasčiausių tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybių (1.2 pav.) pasiūlė Mansouras (Mansour *et al.* 1981). Ji buvo gauta iš tempiamųjų elementų bandymų. Panašios priklausomybės buvo pasiūlytos Limo ir kt. (Lim *et al.* 1987) (žr. 1.3 pav.), Grimaldi, Luciano (2000) bei kitų tyrėjų.



1.2 pav. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal Mansourą (Mansour *et al.* 1987)



1.3 pav. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal Limą (Lim *et al.* 1981)

Tempiamo plieno plaušu armuoto betono elgseną galima suskirti į tokias stadijas (Grimaldi, Luciano 2000):

1. Tampriųjų deformacijų stadija. Šioje stadijoje plieno plaušas neįtakoja betono elgsenos. Įtempius perima tik betonas tol, kol pasiekiamas jo tempiamasis stipris.
2. Plyšių vėrimosi stadija. Ši stadija nusakoma deformacijomis didesnėmis nei ribinės tempiamojo betono deformacijos ε_{ctf} . Veriantis plyšiams ir didėjant deformacijoms plieno plaušu armuotas betonas perima tempimo įtempius. Norint nustatyti medžiagos elgsenos pokytį, būtina įvertinti pakitusį medžiagos standumą dėl atsivėrusių plyšių.
3. Irimo stadija. Ši stadija nusakoma kompozitinės medžiagos suirimu. Įtempių reikšmė f_r nusako medžiagos ribinius įtempius, kai deformacijos didesnės už ε_{ctf} . Esant gerokai didesnėms deformacijoms nei ε_{ctf} , medžiagos suirimas gali įvykti dėl plieninių fibrų ištraukimo iš betono arba dėl jų nutraukimo.

Liekamųjų įtempių (f_r) reikšmė yra svarbus parametras norint nusakyti plieno plaušu armuoto betono elgseną. Mansouras (Mansour *et al.* 1986) teigia, kad liekamieji įtempiai (f_r) priklauso nuo plieno plaušo ilgio, tūrio dalies betone, formos, betono savybių.

Pagal Mansourą (Mansour *et al.* 1981) tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybę galima apskaičiuoti:

$$\sigma_t = \begin{cases} \varepsilon_t E_{ctf}, & \varepsilon_t < \varepsilon_{ctf} \\ \left(f_{ctf} - f_r\right) \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{ctf}}{\varepsilon_{ctu} - \varepsilon_{ctf}} + f_r, & \varepsilon_{ctf} < \varepsilon_t < \varepsilon_{ctu} \\ f_r, & \varepsilon_t > \varepsilon_{ctu} \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{ctu} = 2 f_y \left(\frac{1}{E_s} + \frac{\rho_t}{E_0} \right), \quad (1.2)$$

čia

E_s – armatūros tamprumo modulis, MPa;

f_y – armatūros takumo įtempiai, MPa;

ρ_t – armavimo procentas;

f_{ctf} – plieno plaušu armuoto betono tempiamasis stipris, MPa;

f_r – liekamieji plieno plaušu armuoto betono įtempiai, MPa;

E_{ctf} – plieno plaušu armuoto betono tamprumo modulis, MPa.

Taikant Henagerio ir Doherty (1976) pasiūlytą plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento skaičiavimą, liekamasis supleišėjusio betono stipris apskaičiuojamas atsižvelgiant į plieno plaušo kiekį bei formą pagal šią formulę:

$$f_{fr} = \frac{0,0072l_f}{d_f \rho_f F_{bc}}, \quad (1.3)$$

čia

f_{fr} – plieno plaušu armuoto betono liekamasis stipris (MPa),

l_f – plieno plaušo ilgis, mm;

d_f – plieno plaušo skersmuo, mm;

ρ_f – armavimo procentas;

F_{bc} – plaušo sukibimo su betonu koeficientas, kintantis nuo 1 iki 1,2, priklausomai nuo fibrų formos.

Henagerio ir Doherty modelyje liekamojo stiprio reikšmė laikoma pastovia, t.y. nepriklausoma nuo atsivėrusio plyšio pločio.

Pagal Loką ir Xiao (1999) tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybę (žr. 1.4 pav.), gautą pagal lenkiamų plieno plaušu armuotų elementų bandymų rezultatus, galima apskaičiuoti:

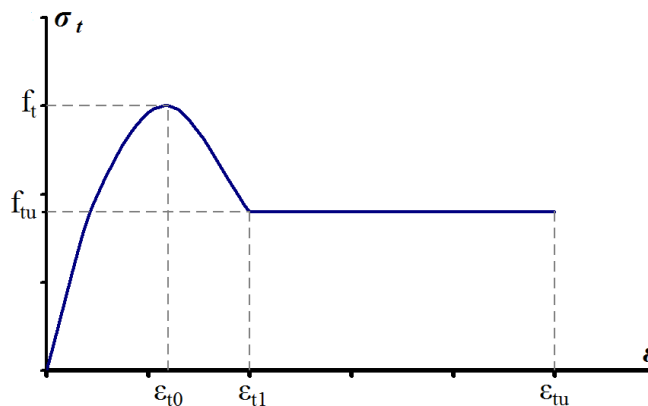
$$\sigma_t = \begin{cases} f_t \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t0}} \right)^2 \right], & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{t0} \\ f_t \left[1 - \left(1 - \frac{f_{tu}}{f_t} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{t0}}{\varepsilon_{t1} - \varepsilon_{t0}} \right)^2 \right], & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon < \varepsilon_{t1} \\ f_{tu}, & \varepsilon_{t1} \leq \varepsilon < \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (1.4)$$

čia

f_t – betono tempiamasis stipris, MPa;

ε_{t0} – betono pleišėjimo deformacija;

f_{tu} – liekamasis plieno plaušu armuoto betono stipris, MPa.



1.4 pav. Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė
(Lok, Xiao 1999)

Plieno plaušo orientacijos koeficientas naudojamas tam, kad būtų galima įvertinti fibrų, kertančių atvėrusio plyšio plokštumą, efektyvumą. Keletas tyrėjų šio parametro reikšmę siūlo priimti lygią $\eta = 0,5$.

Naamanas (2003) pasiūlė empirinį metodą, kaip apskaičiuoti liekamąjį plieno plaušu armuoto betono stiprį. Dėl atsargumo imama vidutinė liekamojo stiprio reikšmė (žr. 1.5 pav.) iškart po to, kai plieno plaušu armuotas betonas pasiekia savo tempiamąjį stiprį. Liekamojo stiprio reikšmė priklauso nuo plieno plaušo orientacijos plyšyje, fibrų inkaravimo ilgio, plaušo tarpusavio sąveikos, plieno plaušo ir betono vidutinių sukibimo įtempių, plieno plaušo faktoriaus:

$$f_r = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI, \quad (1.5)$$

čia

λ_1 – koeficientas, įvertinantis plieno plaušo inkaravimo ilgį;

λ_2 – koeficientas, įvertinantis plieno plaušo orientaciją plyšyje;

λ_3 – koeficientas, įvertinantis plieno plaušo tarpusavio sąveiką;

RI – plieno plaušo faktorius

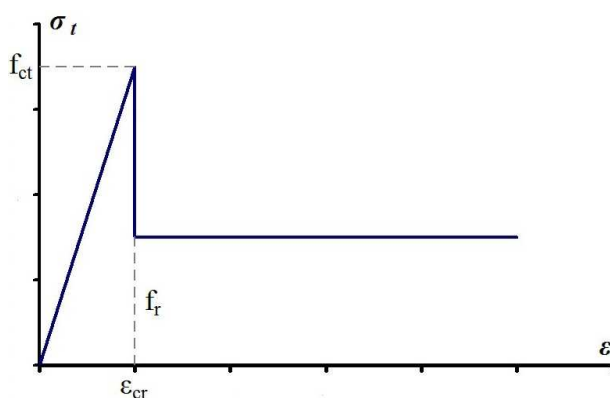
τ – plieno plaušo ir betono vidutiniai sukibimo įtempiai, MPa, kur:

$$\tau = 2 f_{ct}, \quad (1.6)$$

čia

f_{ct} – tempiamasis betono stipris, MPa.

Koeficientų λ reikšmės, kai plieno plaušas yra lenktais galais yra: $\lambda_1 = 0,25$, $\lambda_2 = 1,2$, $\lambda_3 = 1,0$.



1.5 pav. Plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal Naamaną
(Naaman 2003)

Plieno plaušo faktorių galima apskaičiuoti pagal šią formulę:

$$RI = V_f \frac{l_f}{d_f} \beta, \quad (1.7)$$

čia

V_f – plieno plaušo dalis betone;

l_f – plieno plaušo ilgis, mm;

d_f – plieno plaušo skersmuo, mm;

β – koeficientas, įvertinantis plieno plaušo sukibimą su betonu, kai plieno plaušas užlenktais galais $\beta = 1,0$.

1.3. Betono susitraukimo įvertinimas

Šiame poskyryje apžvelgiamas betono susitraukimo eliminavimas iš eksperimentinių rezultatų (apkrovos ir deformacijos priklausomybių) metodas pagal Bischoffą (2001). Taip gaunami elementų elgsenos rezultatai dar nepasireiškus betono susitraukimo deformacijoms $\varepsilon_{c,shr}$. Tokiu būdu eksperimentinių tyrimų rezultatus galima lyginti su teoriniais skaičiavimais.

Betono susitraukimo eliminavimas pagal Bischoffą

Kol nebuvo pridėta išorinė jėga, bandinių susitraukimas vyko tamprioje stadijoje, todėl elementams galima užrašyti tokią jėgų pusiausvyros lygtį:

$$N = A_c E_c \varepsilon_{cf} + A_s E_s \varepsilon_{sf} = 0, \quad (1.8)$$

čia

N – išorinė pridėta apkrova, N;

A_c – betono skerspjūvio plotas, mm²;

E_c – betono tamprumo modulis, MPa;

ε_{cf} – betono deformacijos;

A_s – armatūros strypo skerspjūvio plotas, mm²;

E_s – armatūros tamprumo modulis, MPa;

ε_{sf} – armatūros deformacijos.

Betono deformaciją galima išreikšti šia lygtimi:

$$\varepsilon_{cf} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{c,shr}, \quad (1.9)$$

čia

ε_{tot} – bendra tempiamojo elemento deformacija;

$\varepsilon_{c,shr}$ – betono laisvojo susitraukimo deformacija, išmatuota atliekant eksperimentinius tyrimus, bandant prizmes.

Armatūros strypo deformacija gali būti išreikšta:

$$\varepsilon_{sf} = \varepsilon_{tot} . \quad (1.10)$$

Deformacijų išraiškas įstačius į pradinę jėgų pusiausvyros lygtį, gauname:

$$0 = A_c E_c (\varepsilon_{tot} - \varepsilon_{c,shr}) + A_s E_s \varepsilon_{tot} , \quad (1.11)$$

kuri pertvarkius gali būti užrašyta taip:

$$A_c E_c \varepsilon_{c,shr} = (A_c E_c + A_s E_s) \varepsilon_{tot} . \quad (1.12)$$

Abi puses padalinus iš $A_c E_c$, gaunama:

$$\varepsilon_{c,shr} = (1 + n \rho_s) \varepsilon_{tot} , \quad (1.13)$$

čia

ρ_s – armavimo koeficientas, $\rho_s = \frac{A_s}{A_c}$;

n – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis, $n = \frac{E_s}{E_c}$.

Pertvarkius (1.13) išraišką pradinės elemento deformacijas dėl betono susitraukimo galima užrašyti šia lygtimi:

$$\varepsilon_{tot,offset} = \frac{\varepsilon_{c,shr}}{1 + n \rho_s} . \quad (1.14)$$

Pažymėtina, kad tiek $\varepsilon_{tot,offset}$, tiek $\varepsilon_{c,shr}$ reikšmės yra neigiamos.

Norint eksperimentų metu linijinių deformacijų matuokliais (toliau tekste LVDT) gautų matavimų rezultatus perskaičiuoti į tikrąsias elementų deformacijas, reikia pasinaudoti šia išraiška:

$$\varepsilon_{tot,actual} = \varepsilon_{tot,measured} + \varepsilon_{tot,offset} , \quad (1.15)$$

čia

$\varepsilon_{tot,actual}$ – tikroji elemento deformacija, įvertinus susitraukimą;

$\varepsilon_{tot,measured}$ – elemento deformacija, iš LVDT matavimų rezultatų apskaičiuojama pagal šią lygtį:

$$\varepsilon_{tot,measured} = \frac{\Delta L}{L_{tot}} , \quad (1.16)$$

ΔL – vidutinis elementų pailgėjimas, matuotas keturiais LVDT ant skirtingų bandinio pusių, mm;

L_{tot} – LVDT matavimo bazės ilgis, mm.

Bandinio pleišėjimo apkrovą galima apskaičiuoti pagal šią išraišką:

$$P_{cr} = f_t A_c (1 + n \rho_s), \quad (1.17)$$

čia

P_{cr} – bandinio pleišėjimo apkrova, kN;

f_t – betono tempiamasis stipris, MPa.

Betono pleišėjimo deformacija ε_{cr} gali būti apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_t}{E_c}. \quad (1.18)$$

Pleišėjimo apkrovos sumažėjimas dėl pradinio elemento susitraukimo gali būti nustatomas pagal šią lygtį:

$$\Delta P_{cr} = \left(\frac{n \rho_s \varepsilon_{sh}}{(1 + n \rho_s) \varepsilon_{cr}} \right) P_{cr}. \quad (1.19)$$

Supleišėjusio gelžbetoninio elemento betono tempimo įtempiai gali būti apskaičiuoti pasinaudojant šia formule:

$$\sigma_{c,t} = \frac{P - \varepsilon_m E_s A_s}{A_c}, \quad (1.20)$$

čia

P – bandomą elementą veikianti jėga tam tikru laiku momentu;

ε_m – elemento deformacija.

1.4. Gelžbetoninių elementų pleišėjimo modeliavimas

1.4.1. Įprastų gelžbetoninių elementų pleišėjimo modeliai

CEB-FIP 1978 atstumo tarp plyšių modelis

Kai kurie supaprastinti modeliai išskirtinai pagrįsti betono apsauginio sluoksnio storiu. Norint apskaičiuoti vidutinį atstumą tarp plyšių, reikia pasinaudoti net keliomis pusiau empirinėmis formulėmis. Viena tokių skaičiavimo procedūrų pasiūlyta CEB-FIP 1978 modelyje:

$$s_m = 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{d_b}{\rho_{eff}}, \quad (1.21)$$

čia

s_m – vidutinis atstumas tarp plyšių, mm;

c – betono apsauginis sluoksnis, mm;

s – atstumas tarp išilginės armatūros strypų ($s \leq 15d_b$), mm;

d_b – išilginės armatūros strypo skersmuo, mm;

ρ_{eff} – efektyvusis skerspjūvio ploto armavimo koeficientas; pažymėtina, kad ρ_{eff}

apskaičiuojamas kaip armatūros strypo skerspjūvio ploto A_s santykis su efektyviosios tempiamojo betono zonos skerspjūvio plotu $A_{c,eff}$. Ši zona tęsiasi $7,5d_b$ atstumu visomis kryptimis nuo armatūros strypo;

k_1 – koeficientas, įvertinantis armatūros strypo ir betono sukibimą;

k_2 – koeficientas, įvertinantis elemento deformacijų būvį.

Koeficientas k_1 gali būti imamas:

$$k_1 = \begin{cases} 0,4 & \text{rumbuotiems strypams} \\ 0,8 & \text{lygiems strypams ir iš anksto įtemptiems lynams} \end{cases}$$

Koeficientas k_2 gali būti apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$k_2 = 0,25 \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1}, \quad (1.22)$$

čia

ε_1 – didžiausia betono tempimo deformacija;

ε_2 – mažiausia betono tempimo deformacija.

Pažymėtina, kad, esant vienašiam įtempių būviui, $k_2=0,25$.

CEB-FIP 1990 atstumo tarp plyšių modelis

CEB-FIP 1990 modelyje (1993) siūlomos dvi vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo lygtys: viena skirta pleišėjimo analizei pirminėje nestabilioje pleišėjimo stadijoje, o kita – stadijai, kai pleišėjimas stabilizavęsis. Vidutinis atstumas tarp plyšių nestabilioje pleišėjimo stadijoje gali būti nustatomas pagal toliau pateikiamą formulę:

$$s_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{f_{s2} - f_{sE}}{2\tau_{bk}} \cdot \frac{d_b}{1 + E_s / E_c \cdot \rho_{eff}}, \quad (1.23)$$

čia

f_{s2} – armatūros įtempiai plyšyje, MPa;

f_{sE} – armatūros įtempiai pjūvyje, esančiame didžiausiu atstumu nuo plyšio, MPa;

τ_{bk} – vidutinių sukibimo įtempių mažiausioji reikšmė, MPa;

E_s – armatūrinio plieno tamprumo modulis, MPa;

E_c – betono tamprumo modulis, MPa.

Visi kiti parametrai aptarti CEB-FIP 1978 atstumo tarp plyšių skaičiavimo modelyje.

Kai pleišėjimas stabilizuojasi, vidutinis atstumas tarp plyšių gali būti nustatomas pagal šią lygtį:

$$s_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_b}{3,6 \cdot \rho_{eff}}. \quad (1.24)$$

Eurokodo 2 1991 atstumo tarp plyšių modelis

Eurokodo 2 (ENV 1992-1-1 1991) atstumo tarp plyšių modelis yra panašus į CEB-FIP 1978 modelio kode pateikiamą formuluotę, skiriasi tik kai kurių parametru reikšmės. Vidutinis atstumas tarp plyšių gali būti apskaičiuotas pagal šią išraišką:

$$s_m = 50 + 0,25k_1k_2 \frac{d_b}{\rho_{s,eff}}, \quad (1.25)$$

kur koeficientas k_1 gali būti imamas:

$$k_1 = \begin{cases} 0,8 & \text{rumbuotiems strypams} \\ 1,6 & \text{lygiems strypams ir iš anksto įtemptiems lynams} \end{cases},$$

o koeficientas k_2 gali būti apskaičiuotas pagal šią lygtį:

$$k_2 = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1}. \quad (1.26)$$

Visi kiti parametrai aptarti CEB-FIP 1978 atstumo tarp plyšių skaičiavimo modelyje.

Eurokodo 2 2003 atstumo tarp plyšių modelis

Eurokodo 2 (ENV 1992-1-1 2003) pleišėjimo medelis yra atnaujintas įvertinant apsauginį betono sluoksnį. Vidutinis atstumas tarp plyšių gali būti apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$s_m = 3,4c + 0,425k_1k_2 \frac{d_b}{\rho_{s,eff}}, \quad (1.27)$$

čia

c – apsauginis betono sluoksnis, mm.

Visi kiti parametrai yra aptarti Eurokodo 2 1991 pleišėjimo medelio aprašyme (ENV 1992-1-1 1991). Pažymėtina, kad Eurokodo 2 ir CEB-FIP formulėse k_1 ir k_2 įvertina tuos pačius parametrus, skiriasi tik jų skaitinės reikšmės.

1.4.2. Fibromis armuotų gelžbetoninių elementų pleišėjimo modeliai

Minėtuose literatūros šaltiniuose pateikiami tyrimai rodo, kad fibrų pridėjimas į betoną padeda kontroliuoti atstumą tarp plyšių ir sumažinti plyšių plotį. Keletas tyrėjų pasiūlė koeficientus, modifikuojančius anksčiau aprašytus fibromis nearmuotų konstrukcijų pleišėjimo parametrus ir sumažinančius atstumus tarp plyšių SFRC elementuose.

Rilem TC 162-TDF atstumo tarp plyšių modelis

Vieną iš dažniausiai naudojamų SFRC elementų atstumo tarp plyšių skaičiavimo modelių pasiūlė Dupontas ir Vandewalle'as (Dupont, Vandewalle 2003). Tai Rilem technikos komiteto 162 modifikuota Eurokodo 2 1991 (ENV 1992-1-1 1991) formulė fibromis nearmuotam betonui, kurioje įvertinamas papildomas koeficientas, mažinantis atstumą tarp plyšių ir priklausantis nuo fibrų ilgio bei skersmens santykio:

$$s_m = 50 + 0,25k_1k_2 \frac{d_b}{\rho_{s,eff}} \left(\frac{50}{l_f / d_f} \right), \quad (1.28)$$

čia

l_f – fibrų ilgis, mm;

d_f – fibrų skersmuo, mm;

santykis $50/(l_f/d_f) \leq 1$.

Visi kiti parametrai yra aptarti Eurokodo 2 1991 pleišėjimo modelio aprašyme (ENV 1992-1-1 1991).

Moffatto atstumo tarp plyšių modelis

Moffatas pateikė alternatyvias pleišėjimo formules, modifikuodamas tiek Eurokodo 2 1991 (ENV 1992-1-1 1991), tiek CEB-FIP 1990 (1993) atstumo tarp plyšių skaičiavimo modelius, kai pleišėjimas yra stabilizavęsis (Moffatt 2001). Tyrėjas įvertino papildomą faktorių, kuris mažina atstumą tarp plyšių priklausimai nuo SFRC liekamųjų įtempių ir tempiamojo betono stiprio santykio (darydamas prielaidą, kad pleišėjimo stadijoje jis nekintamas). Toliau pateikiama modifikuota Eurokodo 2 1991 (ENV 1992-1-1 1991) išraiška:

$$s_m = 50 + 0,25k_1k_2 \frac{d_b}{\rho_{s,eff}} \left(1 - \frac{f_{res}}{f_{cr}} \right), \quad (1.29)$$

ir modifikuota CEB-FIP 1990 (1993) išraiška:

$$s_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_b}{3,6 \cdot \rho_{s,eff}} \left(1 - \frac{f_{res}}{f_{cr}} \right), \quad (1.30)$$

čia

f_{res} – liekamieji SFRC elemento įtempiai po supleišėjimo, MPa;

f_{cr} – tempiamasis betono stipris, MPa.

Visi kiti parametrai aptarti CEB-FIP 1978 atstumo tarp plyšių modelyje.

Deluce'o ir Vecchio pleišėjimo modelis

- *Atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulė*

Kadangi anksčiau aptartuose modeliuose yra keletas pastebimų trūkumų, Deluce'as ir Vecchio pasiūlė naują formulę atstumui tarp plyšių skaičiuoti (Deluce *et al.* 2014). Pavyzdžiui, Duponto ir Vandewalle'o (Dupont, Vandewalle 2003) pasiūlytame modelyje neatsižvelgiama į fibrų tūrio dalį betono mišinyje, t.y. ar fibrų tūrio dalis mišinyje yra 0,1 %, ar 5,0 %, vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo rezultatai nuo to nesikeičia. Moffato pasiūlytame modelyje (Moffat 2001) tiesiogiai vertinamų liekamųjų įtempių f_{res} nustatymas, neatliekant eksperimentinių tyrimų, yra labai sudėtingas uždavinys, todėl daugeliu atvejų gaunami f_{res} rezultatai nėra tikslūs. Kadangi liekamieji įtempiai paprastai nėra nustatomi eksperimentiškai, tai apsunkina šios formulės naudojimą SFRC elementų analizei ir projektavimui.

Naujas Deluce'o ir Vecchio pasiūlytas modelis (Deluce *et al.* 2014) skirtas skaičiuoti vidutiniams atstumams tarp plyšių (kai pleišėjimas yra stabilizavęsis) plieno fibromis armuotame betone, veikiant vienašiam įtempių būviui. Jis pagrįstas RILEM Technikos komiteto 162 pasiūlyta CEB-FIP 1978 vidutinio atstumo tarp plyšių formule, kuri modifikuota įtraukiant koeficientą, įvertinantį fibrų tūrio dalį, ilgį ir skersmenį. Naujame modelyje papildomai įvertinamas koeficientas k_3 , kuriuo atsižvelgiama į fibrų tūrio dalį, ilgį bei skersmenį. Be to, armavimo efektyvumo parametras s_{mi} yra modifikuotas siekiant įvertinti plyšių kertančių plieno fibrų perimamus tempimo įtempius. Toliau pateikiama patobulinta formulė atstumams tarp plyšių SFRC elementuose skaičiuoti:

$$s_m = 2 \left(c_a + \frac{s_b}{10} \right) k_3 + \frac{k_1 k_2}{s_{mi}}, \quad (1.31)$$

čia

k_1 – koeficientas, įvertinantis armatūros strypo ir betono sukibimą;

k_2 – koeficientas, įvertinantis elemento deformacijų būvį;

c_a – minimalus apsauginis betono sluoksnis, mm. Jis gali būti nustatomas pagal šią išraišką:

$$c_a = 1,5a_{gg},$$

čia

a_{gg} – maksimalus užpildo dydis, mm.

Koeficientas k_1 gali būti imamas:

$$k_1 = \begin{cases} 0,4 & \text{rumbuotiems strypams} \\ 0,8 & \text{lygiems strypams ir iš anksto įtemptiems lynams} \end{cases}$$

Koeficientas k_2 gali būti apskaičiuojamas pagal (1.22) išraišką:

$$k_2 = 0,25 \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1},$$

čia

ε_1 – didžiausia betono tempimo deformacija;

ε_2 – mažiausia betono tempimo deformacija.

Parametras s_b atspindi efektyvųjį atstumą tarp armatūros strypų ir yra apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$s_b = 0,5 \sqrt{\frac{\pi d_b^2}{\rho_{s,eff}}}, \quad (1.32)$$

čia

s_b – atstumas tarp armatūros strypų, mm;

d_b – išilginės armatūros strypo skersmuo, mm;

$\rho_{s,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas; pažymėtina, kad $\rho_{s,eff}$ apskaičiuojamas kaip armatūros strypo skerspjūvio ploto A_s santykis su efektyviosios tempiamojo betono zonos skerspjūvio plotu $A_{c,eff}$. Ši zona tęsiasi $7,5d_b$ atstumu visomis kryptimis nuo armatūros strypo.

Efektyvusis armavimo parametras s_{mi} , įvertinantis išilginės armatūros strypo skersmenį ir efektyvųjį armavimo koeficientą, taip pat fibrų, kertančių plyšį, parametrus, apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$s_{mi} = \frac{\rho_{s,eff}}{d_b} + k_f \frac{\alpha_f V_f}{d_f}, \quad (1.33)$$

čia

s_{mi} – efektyvusis armavimo parametras, mm^{-1} ;

α_f – fibrų orientavimosi koeficientas, kuris gali būti imamas 0,5 atsitiktinei fibrų orientacijai erdvėje visomis trimis kryptimis;

V_f – fibrų tūrio dalis, kuri apribota maksimalia reikšme 0,015, nusakančia tempiamų SFRC elementų prisotinimą fibromis.

Kintamasis k_f yra fibrų efektyvumo koeficientas, priklausantis nuo jų ilgio ir skersmens santykio yra apskaičiuojamas pagal Duponto ir Vandewalle'o (Dupont, Vandewalle 2003) pasiūlytą išraišką:

$$k_f = l_f / 50d_f \geq 1, \quad (1.34)$$

čia

l_f – fibrų ilgis, mm;

d_f – fibrų skersmuo, mm;

Vystant šį modelį buvo nustatyta, kad geriausias atitikimas eksperimentiniams rezultatams pasiekiamas, kai $k_f=0,5$.

Pagrindinis naujo modelio fibrų tūrį ir geometrinius parametrus įvertinantis koeficientas k_3 , apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$k_3 = 1 - \frac{\min(V_f; 0,015)}{0,015} \left(1 - \frac{1}{k_f} \right). \quad (1.35)$$

Šis koeficientas mažina apsauginį betono sluoksnį ir atstumą tarp išilginių armatūros strypų (žr. (1.31) lygtį). Jis rodo, kad, didėjant fibrų tūrio daliai arba jų ilgio ir skersmens santykiui, atstumai tarp plyšių mažėja. Kai fibrų tūrio dalis lygi 0,0 %, tai (1.31) lygtis sumažėja iki išraiškos, panašios į CEB-FIB 1978 pateikiamą vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimo formulę (1.21).

- *Plyšio pločio skaičiavimo formulė*

Norint tiksliai numatyti SFRC elementų tinkamumo ribinį būvį ir laikomąją galią, būtina kruopščiai sumodeliuoti medžiagos pleišėjimą. Turint vidutinį atstumą tarp plyšių s_m , apskaičiuotą pagal pasiūlytą (1.31) išraišką, ir vidutines tempimo deformacijas $\varepsilon_{t,avg}$, vidutinis plyšio plotis $w_{cr,avg}$ gali būti nustatomas pagal šią išraišką:

$$w_{cr,avg} = s_m \varepsilon_{t,avg}. \quad (1.36)$$

Kadangi elemento irtis prasideda silpniausiam pjūvyje, ypač svarbus yra maksimalaus plyšio pločio nustatymas jame. Plieno strypais armuotiems betoniniams bandiniams be fibrų dažnai daroma prielaida, kad maksimalus plyšio plotis yra 1,7 karto didesnis už vidutinį plyšio plotį (Collins, Mitchell 1993), tačiau literatūroje nėra pateikiama ekvivalentinio santykio SFRC elementams. Siekdami nustatyti šį santykį, Deluce'as ir Vecchio atliko išsamioje eksperimentinėje programoje išbandytų elementų (Deluce, Vecchio 2013) maksimalių ir vidutinių plyšių palyginimą. Buvo nustatyta, kad fibromis

nearmuotiems bandiniams šis santykis buvo 1,57, o tai yra artima bendrai priimtai reikšmei 1,7. Tyrėjai taip pat pastebėjo, kad SFRC elementuose didėjant fibrų tūrio daliai arba ilgio ir skersmens santykiui, didėja ir maksimalaus bei vidutinio plyšių pločių santykis. Įvedus fibrų efektyvumo parametą, kurį nusako fibrų tūrio dalis ir ilgio bei skersmens santykis, maksimalus plyšio plotis $w_{cr,max}$ gali būti apskaičiuotas pagal šią išraišką:

$$w_{cr,max} = \left(1,7 + 3,4 \frac{V_f l_f}{d_f} \right) w_{cr,avg} . \quad (1.37)$$

Šią formulę galima taikyti tik tada, kai SFRC elemento deformacijos mažesnės už armatūrinio strypo plieno takumo deformaciją. Patekėjus armatūrai (1.37) lygtis netaikytina, kadangi elemento deformacijos lokalizuojasi viename plyšyje.

1.5. Skyriaus išvados

Atlikus literatūros apžvalgą galima teigti, kad plieno plaušu armuotas betonas mechaninėmis savybėmis yra pastebimai pranašesnis už įprastinį. Tai pasireiškia didesniu dinaminio poveikio atspariu, plastiškesniu suirimo pobūdžiu bei savybe perimti tempimo įtempius plyšyje.

Apžvelgus kelių autorių tempiamo plieno plaušu betono įtempių ir deformacijų modelius, matyti, kad viena svarbiausių plieno plaušu armuotų betoninių elementų mechaninių charakteristikų yra liekamasis stipris, t.y. įtempiai, kuriuos supleišėjęs betonas gali atlaikyti plyšyje. Adekvatus jų įvertinimas, leistų teisingai aprašyti tempiamo elemento elgseną po supleišėjimo.

Išanalizavus literatūros šaltinius, galima teigti, kad dispersiškai armuotų konstrukcijų pleišėjimo modeliai yra paremti įprastojo gelžbetonio modeliais, įvedant papildomą daugiklį, kuris įvertina plieno plaušo įtaką. Įvairiuose modeliuose šis daugiklis gali priklausyti nuo fibrų geometijos, fibrų tūrio dalies, perimamų liekamųjų įtempių ir kt.

Iš nagrinėtų šaltinių galima spręsti, jog, norint teisingai įvertinti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybę, būtina atsižvelgti į betono susitraukimą ir jį eliminuoti.

2. J. R. DELUCE'O EKSPERIMENTINĖ PROGRAMA IR JOS MEDŽIAGŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

2.1. Eksperimentinės programos apžvalga

Antrajame skyriuje aprašoma Kanados tyrėjo J. R. Deluce'o atlikta išsami eksperimentinė programa, kurios pagrindinis tikslas buvo – ištirti tempiamąjį sustandėjimą plieno plaušu ir plieniniais strypais armuotame betone. Išsamios Toronto universiteto Statybos fakulteto bandymų programos rezultatai naudoti rengiant šį baigiamąjį darbą. Norint analizuoti tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišėtumą ir deformacijas bei adekvačiai vertinti eksperimentų rezultatus, būtina atsižvelgti į bandiniams naudotas medžiagas, jų mechanines savybes.

Minėtos eksperimentinės programos metu atlikti plieninių fibrų ir armatūros strypų tempimo bandymai. Pagaminus šešis skirtingus betono mišinius, jų mechaninės savybės buvo tiriamos atliekant įvairius eksperimentus. Gniuždomasis betono stipris ir tamprumo modulis nustatytas bandant po 3-4 bandinius kiekvienai betono partijai, o susitraukimo deformacijoms nustatyti buvo pagaminta 18 prizmių. Tempiamasis stipris buvo tiriamas bandant po 3 kaulo formos (angl. *Dog Bone*) elementus, o tempiamasis stipris lenkiant nustatytas bandant po 4 prizmes kiekvienam betono mišiniui. Tyrimų gausa rodo J. R. Deluce'o atliktos programos išsamumą, o tą patį bandymą pakartojant po 3-4 kartus užtikrinama eksperimentų kokybė ir adekvatūs rezultatai.

Toliau šiame skyriuje pateikiami betoninių cilindų gniuždymo, prizmių laisvojo susitraukimo, prizmių lenkimo, kaulų formos elementų tempimo bandymai, jiems naudota įranga, aprašomos naudotos fibros, armatūrinis plienas, aptariami ir vertinami eksperimentų rezultatai.

2.2. Tyrimams naudotos medžiagos ir jų savybės

Betonas

Eksperimentiniams bandiniams naudotas dviejų tipų betonas, kuris gamintas remiantis skirtingomis maišymo metodikomis, t.y. įprastas ir plieno plaušu armuotas betonas. Įprastojo betono mišinio bandiniai po 28 d. kietėjimo pasiekė >91 MPa cilindrinį gniuždomąjį stiprį (tai atitinka C90/105 betono klasę), o fibromis armuoto betono stipris kito nuo 32 iki 91 MPa.

Plieno plaušas į mišinio sudėtį buvo įmaišomas gaminant betoną. Betonavimas vyko ant vibrostalo tam, kad būtų sumažinta porų susidarymo galimybė. Buvo stengiamasi nevibruoti per ilgai, kad dispersiškai armuotas betonas neišsisluoksniuotų, fibros nenusėtų į klojinių apačią. Sauso mišinio sudedamųjų dalių kiekis abiejų rūšių betono kubiniam metrui pateikiamas 2.1 lentelėje. Keičiant fibrų tipą ir jų masę mišinyje, buvo pagamintas betonas su trimis skirtingomis fibrų tūrio dalimis V_f (viena serija bandinių su $V_f=0,5\%$, viena su $V_f=1,0\%$ ir trys su $V_f=1,5\%$).

2.1 lentelė. Vieno kubinio metro sauso betono mišinio sudėtis (Deluce 2011)

Medžiaga	Mato (vnt.)	RC	SFRC
HE tipo cementas	kg	-	540
Gub-SF (HSF) cementas	kg	600	-
F klasės Fly Ash "Monroe"	kg	160	270
Vanduo	kg	689	203
Smėlis	kg	-	-
Silica smėlis	kg	1080	704
13 mm frakcijos klintys	kg	1796	595
WR: Polyheed 997	ml	9000	-
SP: Rheobuild 1000	ml	-	-
SP: Glenium 3400NV	ml	-	6373
VMA: Rheomac 362	ml	-	6188
Fibros ($V_f=0,5\%$)	kg	-	39,25
Fibros ($V_f=1,0\%$)	kg	-	78,5
Fibros ($V_f=1,5\%$)	kg	-	117,75

Visi eksperimentų bandiniai buvo liejami iš 6 skirtingų betono mišinių, kurių serijos žymimos:

1. PC – plieno plaušu nearmuotas betonas;
2. FRC1 – betonas armuotas RC-80/30-BP tipo fibromis, $V_f = 0,5\%$, $l_f = 30$ mm, $d_f = 0,38$ mm, $l_f/d_f = 79$;
3. FRC2 – betonas armuotas RC-80/30-BP tipo fibromis, $V_f = 1,0\%$, $l_f = 30$ mm, $d_f = 0,38$ mm, $l_f/d_f = 79$;
4. FRC3 – betonas armuotas RC-80/30-BP tipo fibromis, $V_f = 1,5\%$, $l_f = 30$ mm, $d_f = 0,38$ mm, $l_f/d_f = 79$;
5. FRC4 – betonas armuotas ZP305 tipo fibromis, $V_f = 1,5\%$, $l_f = 30$ mm, $d_f = 0,55$ mm, $l_f/d_f = 55$;
6. FRC5 – betonas armuotas RL-45/50-BN tipo fibromis, $V_f = 1,5\%$, $l_f = 50$ mm, $d_f = 1,05$ mm, $l_f/d_f = 48$.

Plieno plaušas

Betono dispersiniam armavimui buvo naudojami Belgijos kompanijos Bekeart trys skirtingi Dramix fibrų tipai: RC-80/30-BP, ZP305 ir RL-45/50-BN (žr. 2.1 paveikslą). Sukibimui padidinti visos šios fibros gaminamos su užlenktais galais. Bekeart yra vienas iš pagrindinių dispersinės armatūros gamintojų pasaulyje. Gamintojo nustatytos mechaninės plieno plaušo charakteristikos (tempiamasis stipris f_{uf}) pateikiamos 2.2 lentelėje. Suabejojus gamintojo deklaruojamais duomenimis, Toronto universitete pagal ASTM C 1557-03 standartą buvo atlikti papildomi bandymai fibrų tempiamajam stipriui nustatyti. Šių bandymų rezultatai taip pat pateikiami 2.2 lentelėje.



2.1 pav. Bandymams naudotų Dramix fibrų forma

2.2 lentelė. Fibrų mechaninės savybės (pagal Deluce, 2011)

Fibrų tipas	Gamintojo pateikta				Eksperimentiškai išbandyta			
	l_f (mm)	d_f (mm)	l_f/d_f	f_{uf} (Mpa)	l_f (mm)	d_f (mm)	l_f/d_f	f_{uf} (Mpa)
RC-80/30-BP	30	0,38	79	2300	30	0,37	81,1	3277
ZP305	30	0,55	55	1100	30	0,54	55,6	1292
RL-45/50-BN	50	1,05	48	1000	50	1,045	47,8	1131

Armatūra

Prizminiems bandiniams su išilgine armatūra buvo naudojami kanadietiški armatūriniai strypai 10M, 20M, 30M, kurie atitinkamai yra 11,3, 19,5 ir 29,9 mm skersmens. Siekiant nustatyti pagrindines armatūrinio plieno charakteristikas (takumo ribą f_y bei tamprumo modulį E_s) buvo atlikti strypų tempimo bandymai, kurių rezultatai pateikiami 2.3 lentelėje. Čia taip pat matyti plieno stiprumo riba (f_u) ir ją atitinkančios deformacijos (ϵ_u). Bandyta po tris kiekvieno tipo strypus. Kai kurie 20M strypai buvo iš skirtingų gamybos partijų, todėl jų savybės pastebimai skyrėsi.

2.3 lentelė. Armatūros strypų mechaninės savybės (pagal Deluce, 2011)

Strypas	d_b (mm)	A_s (mm ²)	E_s (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_u ($\times 10^{-3}$)
10M	11,3	100	199000	442	564	164,0
20M<1>	19,5	300	188000	525	653	111,6
20M<2,3>	19,5	300	194000	456	592	144,2
30M	29,9	700	187000	376	558	177,0

2.3. Betono mechaninių savybių bandymai ir jų rezultatų analizė

Tam, kad būtų galima adekvačiai vertinti elementų pleišėtumą ir deforacijas, šiame poskyryje pateikiami ir aptariami betono mechaninių savybių nustatymo bandymų rezultatai. Jie sugrupuoti pagal bandymų tipą: cilindų gniuždymo, laisvojo susitraukimo, prizmių lenkimo ir vienašiai kaulo fomos elementų tempimo bandymai.

Betoninių cilindų gniuždymo bandymai

Gniuždomasis betono stipris ir tamprumo modulis buvo nustatyti bandant 150 mm skersmens ir 300 mm aukščio cilindrų (po 3-4 bandinius kiekvienai betono partijai). Kiekvienos serijos cilindrai buvo bandomi praėjus ne mažiau kaip 28 dienoms po betonavimo.

Apibendrinti gniuždomojo betono stiprio bandymo rezultatai pateikiami A priedo A.1 lentelėje. Kirstinis tamprumo modulis apskaičiuotas pagal ASTM 469:2002. Kadangi įprastojo betono cilindų gniuždomasis stipris buvo ypač didelis, jų suirimas buvo trapus ir staigus. Pagrindinis plieno plaušu armuotų cilindų pranašumas – elastingesnė gniuždomų elementų irtis. Elastingesnis cilindų suirimas pastebėtas tik tada, kai plieno plaušo tūrio dalis buvo 1,0 % ir daugiau. SFRC elementai, kurių plieno plaušo tūrio dalis buvo 0,5 % suiro trapiai. Taip pat matyti, kad, esant didesniai fibrų ilgio ir skersmens santykiui, gniuždomų cilindų suirimas mažiau trapus.

A priedo A.1 lentelėje pastebima betono gniuždomojo stiprio rezultatų sklaida, todėl juos lyginti tarpusavyje gana sudėtinga. Manoma, kad skirtinga užpildų drėgmė tam turėjo daugiausiai įtakos.

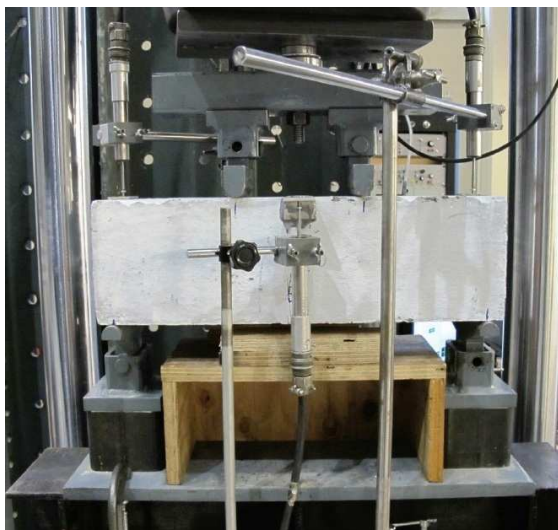
Betoninių prizmių laisvojo susitraukimo bandymai

Susitraukimas turi labai didelę įtaką išilginei armatūra armuotų elementų vienašio tempimo bandymų metu gaunamoms apkrovos ir deformacijų priklausomybėms (Bischoff 2003). Todėl eksperimentinės programos metu buvo matuotos betono susitraukimo deformacijos. Laisvojo betono susitraukimo bandymai buvo atliekami pagal ASTM C 157 standartą. Kiekvienam betono mišiniui buvo pagaminta po tris prizminius bandinius, kurių

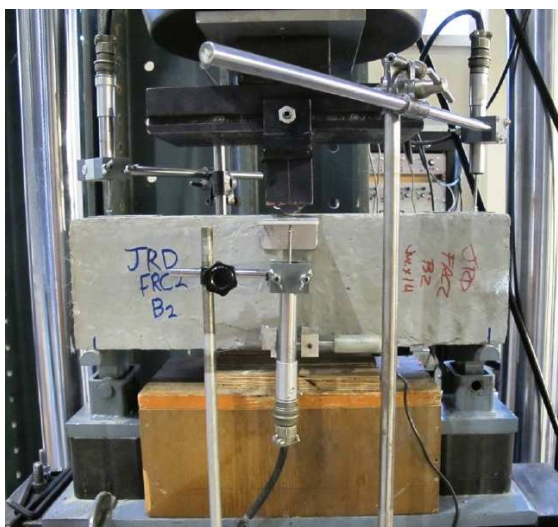
matmenys 75x75x300 mm. Eksperimentų metu matuotas atstumo tarp prizmių galuose įbetonuotų plieninių įdėtinių detalių pokytis. Betono susitraukimo deformacijos, kurių reikšmės neigiamos, buvo apskaičiuotos šį pokytį padalinus iš matavimo bazės ilgio. Apibendrinti susitraukimo deformacijų rezultatai pateikiami A priedo A.1 lentelėje. Pažymėtina, kad SFRC elementų deformacijos buvo daug didesnės nei įprastojo betono.

Betoninių prizmių lenkimo bandymai

Norint nustatyti betono tempiamąjį stiprį lenkiant, atlikti betoninių prizmių lenkimo bandymai pagal dvi skirtingas metodikas. Visi bendiniai buvo vienodo dydžio – 152x152x533 mm. Kiekvienas betono mišinys išbandytas atliekant po du keturių taškų lenkimo eksperimentus pagal ASTM C 1609 (žr. 2.2 paveikslą) ir po vieną trijų taškų lenkimo bandymą pagal Rilem TC 162 (žr. 2.3 paveikslą). Įprastojo betono (PC) elementai buvo išbandyti tik pagal ASTM C 1609.



2.2 pav. Prizmės lenkimo bandymas pagal ASTM C 1609 (Deluce 2011)



2.3 pav. Prizmės lenkimo bandymas pagal Rilem TC 162 (Deluce 2011)

Po betonavimo praėjus ne mažiau kaip 21 dienai, Rilem elementuose, ties viduriu, buvo padaryta 25 mm gylio ir 5 mm pločio įpjova. Abiejų bandymų tipų prizmių tarpatramis buvo 457 mm. Rilem elementams apkrova buvo pridėta ties prizmės viduriu, o ASTM – taškuose, dalinančiuose prizmę į tris lygias dalis (žr. 2.2 ir 2.3 paveikslus). Eksperimentai atlikti naudojant 1000 kN MTS įrenginį. Apkrova pridėta poslinkių kontrolės metodu, 0,006 mm/s greičiu. Bandymams buvo naudojami du LVDT prizmės įlinkiui matuoti, du LVDT atramų deformacijoms matuoti ir du papildomi LVDT (su 25 mm matavimų bazės ilgiu) ties Rilem bandinių įpjova atsivėrusio plyšio pločiui matuoti. Tikrasis prizmės įlinkis buvo nustatomas iš išmatuoto įlinkio atimamnt atramų poslinkius.

Buvo nustatyta, kad net nedidelis plieno plaušo kiekis lemia plastiškesnį betono suirimą. Visuose fibromis armuotuose bandiniuose ribiniai tempimo įtempiai buvo didesni nei pleišėjimo, o įpratojo betono bandiniai suiro staigiai ir trapiai vos tik buvo pasiekti pleišėjimo įtempiai f_{cr} (žr. 2.4 lentelę). ASTM C 1609 bandiniams betono tempiamasis stipris lenkiant buvo apskaičiuotas remiantis prielaida, kad neutralioji ašis eina per prizmės centrą, o Rilem TC 162 bandiniams – kad neutralioji ašis eina per vidurį skerspjūvio, esančio ties įpjova.

2.4 lentelė. Prizmių lenkimo ir kaulo formos elementų tempimo bandymų rezultatai
(pagal Deluce, 2011)

Metodika	Bandinys	P_{cr} (kN)	$f_{cr,i}$ (Mpa)	f_{cr} (Mpa)	P_{peak} (kN)	$f_{peak,i}$ (Mpa)	f_{peak} (Mpa)
ASTM C 1609	PC-B1	56,5	7,24	6,69	-	-	-
	PC-B2	52,9	6,77		-	-	-
	PC-B3	46,1	5,90		-	-	-
	PC-B4	53,3	6,83		-	-	-
	FRC1-B1	33,4	4,28	4,70	42,8	5,48	5,62
	FRC1-B2	40,0	5,12		45,0	5,76	
	FRC2-B1	42,8	5,48	5,56	56,1	7,18	7,20
	FRC2-B4	44,0	5,64		56,4	7,22	
	FRC3-B1	44,0	5,64	6,09	56,8	7,28	7,79
	FRC3-B3	51,0	6,54		64,8	8,30	
	FRC4-B1	33,2	4,25	4,59	37,0	4,74	5,10
	FRC4-B3	38,5	4,93		42,6	5,46	
	FRC5-B3	36,0	4,61	5,43	47,5	6,09	7,39
	FRC5-B3 ₍₁₎	48,8	6,25		67,8	8,69	
Rilem TC 162	FRC1-B4	21,8	6,00	6,00	34,9	9,60	9,60
	FRC2-B2	20,5	5,63	5,63	37,9	10,40	10,40
	FRC3-B2	21,6	5,94	5,94	28,1	7,72	7,72
	FRC4-B2	18,2	5,01	5,01	25,8	7,10	7,10
	FRC5-B3 ₍₂₎	16,0	4,39	4,39	28,8	7,94	7,94

Iš 2.4 lentelės galima daryti išvadą, pleišėjimo įtempiai nepriklauso nuo fibrų kiekio ar tipo. Tačiau, didėjant plieno plaušo tūrio daliai (V_f), didėja ir ribiniai tempimo

įtempiai (f_{peak}). Tai lemia didesnis plyšių kertančių fibrų kiekis. Lyginant FRC3, FRC4 ir FRC5 bandinių ribinę apkrovą (P_{peak}), galima pastebėti, kad, mažėjant fibrų ilgio ir skersmens santykiui bei didėjant ilgiui, mažėja ir ribiniai tempimo įtempiai. Pažymėtina, kad tiek betono pleišėjimo, tiek ribiniai tempimo įtempiai daugeliu atvejų gauti didesni atliekant Rilem TC 162 bandymus. Taip yra dėl to, kad pagal šią bandymo metodiką elementas suyra ties įpjova esančiame skerspjūvyje, kuris nebūtinai yra silpniausias, o atliekant ASTM C 1609 bandymus, elementai pradeda irti natūraliai silpniausiam skerspjūvyje.

Betoninių kaulo formos elementų vienašio tempimo bandymai

Kadangi bene populiariausio Rilem TC 162 pasiūlyto prizmių su įpjova lenkimo bandymo metu prizmėse irtis prasideda ties susilpnintu skerspjūviu (taip gaunama didesnė tempiamojo stiprio lenkiant reikšmė), todėl kaip geresnioji alternatyva šiems tyrimams buvo atliekami plieno plaušu armuotų kaulo formos betoninių elementų tempimo bandymai, kurių metu elementai suyra natūraliai silpniausiam skerspjūvyje. Be to Rilem TC 162 tyrimo metu nustatomas ne tikrasis tempiamasis betono stipris, o tempiamasis stipris lenkiant (angl. *modulus of rupture*).

Bendras šių bandinių ilgis buvo 500 mm. Centrinės elemento dalies (200 mm ilgio) skerspjūvis sumažintas iki 100x70 mm. Eksperimentui buvo pagaminta po tris elementus kiekvienai, anksčiau aprašytai betono mišinio partijai. Platėjantys bandinių galai armuoti plieniniais tinkeliais tam, kad juose neprasidėtų elementų irtis. Bandomų elementų betonavimo klojiniai buvo pagaminti iš medienos. Tempimo jėga perduota per specialius prie bandinių galų priklijuotus blokus.

Bandymo įranga

Kaulo formos elementų tempimo bandymai atlikti naudojantis universaliu 245 kN MTS bandymų stendu, kuris pateikiamas 2.4 paveiksle. Ant bandinių buvo įtaisyti keturi LVDT, kurie leido išmatuoti elemento išilginių poslinkių reikšmę esant tam tikram apkrovimui. LVDT buvo pritvirtinti iš visų keturių elemento pusių. Du iš matuoklių turėjo 150 mm matavimų bazę, o kiti du – 300 mm. LVDT buvo prisukti prie aliuminių plokštelių, kurios prie bandomų prizmių priklijuotos epoksidiniais klijais.



2.4 pav. Kaulo formos bandinių vienašis tempimo bandymas (Deluce 2011)

Visi elementai išbandyti vienodomis sąlygomis, poslinkių kontrolės metodu. Iš pradžių jie buvo apkrauti poslinkiu 0,001 mm/s iki pirmojo plyšio atsivėrimo. Tada apkrovos perdavimo greitis buvo padidintas nuo 0,001 iki 0,01 mm/s. Šis apkrovimas buvo išlaikomas iki staigaus laikomosios jėgos sumažėjimo.

Kaulo formos elementų eksperimentinių tyrimų rezultatai

Ekperimentai buvo tęsiami iki visiško elementų suardymo. Kiekvienam bandiniui buvo skaičiuojamas plyšį kertančių fibrų kiekis ir nustatomas fibrų orientacijos faktorius, kuris pateikiamas 2.5 lentelėje. Fibrų pasiskirstymas ir orientacija pagrindiniame plyšyje matyti 2.5 paveiksle. Visų betono partijų bandinių tempimo eksperimento rezultatai pateikiami A priedo A.1 lentelėje.

Fibrų orientavimosi faktoriaus vertinimas

Visi eksperimentai buvo tęsiami iki visiško elemento suardymo. Tam, kad būtų įvertintas fibrų orientavimosi faktorius α_f , buvo skaičiuojamos suirusio bandinio dominuojantį plyšį kertančios fibros (žr. 2.5 paveikslą). Minėtas dydis α_f eksperimentinėje programoje nustatytas pagal Soroushiano ir Lee (1990) pateiktą formulę:

$$\alpha_f = \frac{N}{A_c} \cdot \frac{A_f}{V_f}, \quad (2.1)$$

čia

N – plyši kertančių fibrų kiekis;

A_c – bandinio skerspjūvio plotas, mm^2 ;

A_f – vienos fibros skerspjūvio plotas, mm^2 ;

V_f – fibrų tūrio dalis.

Fibrų orientavimo faktoriaus reikšmės visiems kaulo formos bandiniams ir betono mišiniams pateikiamos 2.5 lentelėje. Plieno plaušo kiekio (V_f) įtaka šiam faktoriui buvo tirta lyginant FRC1-FRC3 serijų bandinius. Didėjant fibrų kiekiui V_f , jų orientavimo faktorius α_f mažėjo (žr. 2.5 lentelę). Lyginant FRC3-FRC5 serijų bandinius matyti, kad, didinant fibrų ilgį, didėja ir fibrų orientavimo faktorius (žr. 2.5 lentelę). Kadangi kaulo formos bandinių skerspjūvis pakankamai mažas (mažesnis matmuo tesiekė 70 mm), ilgesnės fibros buvo labiau linkusios orientuotis išilgai bandinio.

2.5 lentelė. Fibrų orientacijos faktorius apskaičiuotas iš fibrų, kertančių pagrindinį plyšį, kiekio
(pagal Deluce, 2011)

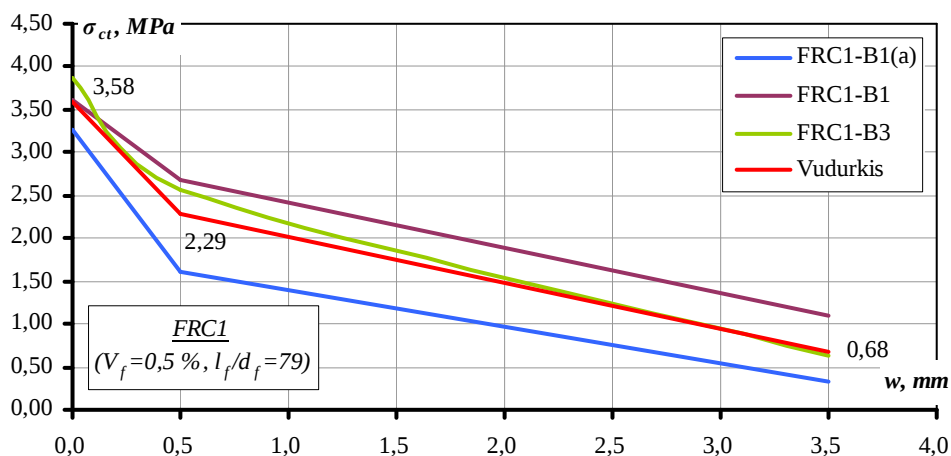
Bandinys	d_f (mm)	l_f (mm)	V_f (%)	Fibrų kiekis, vnt.	α_f	α_f vidurkis
FRC1-B1 _a	0,38	30	0,5	120	0,389	0,470
FRC1-B1	0,38	30	0,5	175	0,567	
FRC1-B3	0,38	30	0,5	140	0,454	
FRC2-B1	0,38	30	1,0	225	0,365	0,434
FRC2-B2	0,38	30	1,0	-	-	
FRC2-B5	0,38	30	1,0	310	0,502	
FRC3-B1	0,38	30	1,0	-	-	0,363
FRC3-B3 ₍₁₎	0,38	30	1,5	344	0,372	
FRC3-B3 ₍₂₎	0,38	30	1,5	327	0,353	
FRC4-B1	0,55	30	1,5	204	0,462	0,474
FRC4-B2	0,55	30	1,5	-	-	
FRC4-B3	0,55	30	1,5	215	0,486	
FRC5-B1	1,05	50	1,5	54	0,445	0,616
FRC5-B2	1,05	50	1,5	107	0,882	
FRC5-B3	1,05	50	1,5	63	0,520	



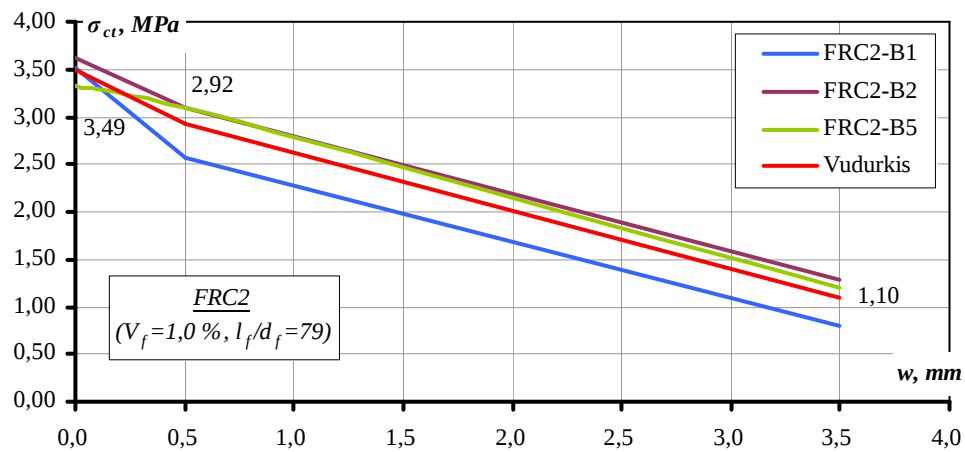
2.5 pav. Fibrų kiekis, pasiskirstymas ir orientacija pagrindiniame atsivėrusiame plyšyje
(Deluce 2011)

Rezultatų analizė

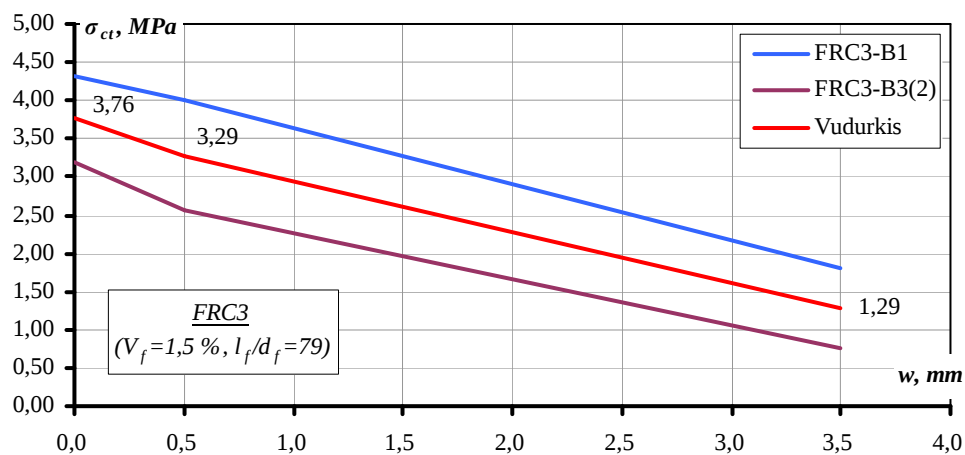
Rengiant šį baigiamąjį darbą, iš Deluce'o pateikiamų bandymų rezultatų (Deluce 2011) nustatyta supleišėjusių elementų tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė ($\sigma_{ct} - w$) bei liekamieji įtempiai σ_{fr} , naudoti tolesniuose skaičiavimuose. Kiekvienos partijos betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybės pateikiamos 2.6-2.10 paveiksluose. Iš jų galima matyti, kad, veriantis plyšiui, betonas geba atlaikyti tempimo įtempius. Pateikti grafikai rodo, kad to pačio betono mišinio trijų bandinių rezultatų sklaida nėra didelė. Galima daryti išvadą, kad bandymai atlikti kokybiškai ir gauti duomenys yra patikimi.



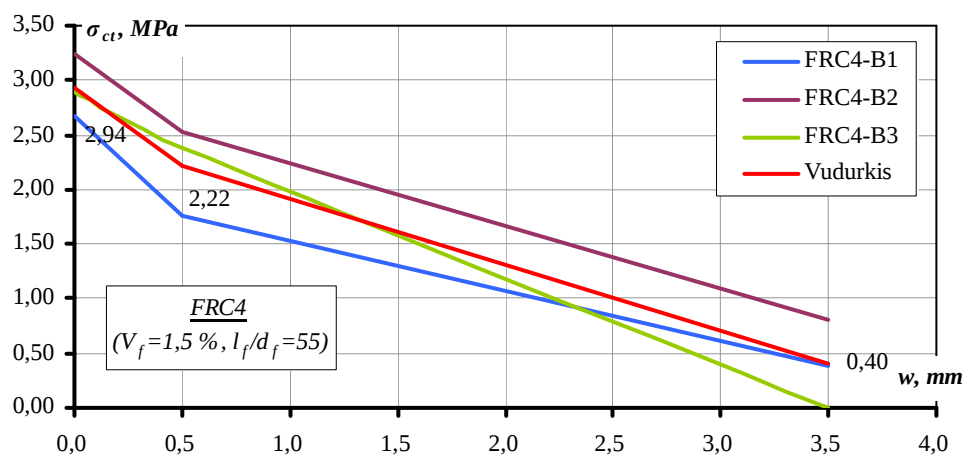
2.6 pav. FRC1 ($V_f = 0,5\%$, $l_f/d_f = 79$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė



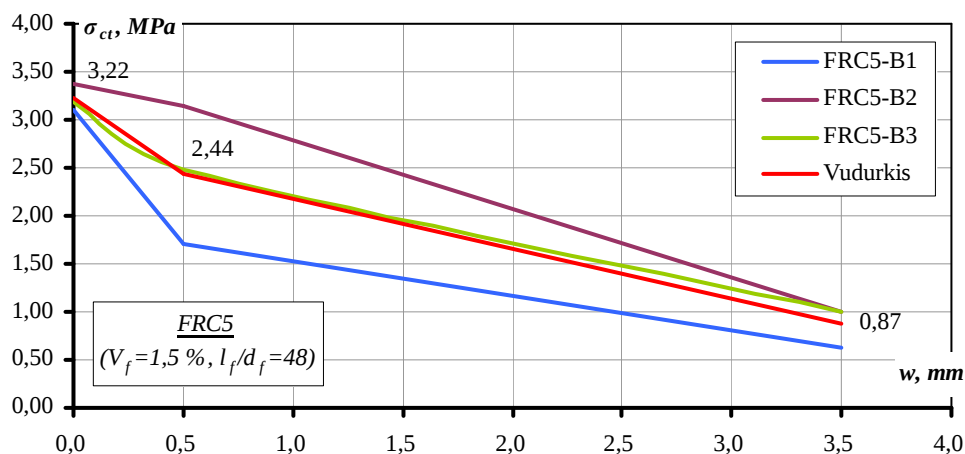
2.7 pav. FRC2 ($V_f = 1.0\%$, $l_f/d_f = 79$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė



2.8 pav. FRC3 ($V_f = 1.5\%$, $l_f/d_f = 79$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė



2.9 pav. FRC4 ($V_f = 1.5\%$, $l_f/d_f = 55$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė



2.10 pav. FRC5 ($V_f = 1,5\%$, $l_f/d_f = 48$) kaulo formos bandinių betono tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė

2.6 lentelėje pateikiamas betoninių prizmių lenkimo ir kaulo formos elementų vienašio tempimo bandymų rezultatų palyginimas. Iš čia matyti, kad betono tempiamasis stipris (f_{ct}), nustatytas atliekant tiesioginio tempimo bandymus, yra vidutiniškai 1,55 karto mažesnis nei tempiamasis stipris lenkiant, gautas pagal ASTM C 1609 metodiką ($f_{cr(ASTM)}$) ir 1,59 karto mažesnis nei tempiamasis stipris lenkiant, gautas pagal Rilem TC 162 metodiką ($f_{cr(Rilem)}$). Šių rezultatų panašumas rodo, kad abiem atvejais prizmių lenkimo bandymai buvo atlikti kokybiškai. Taip pat galima pastebėti, kad šis santykis dėl anksčiau minėtų priežasčių didesnis Rilem bandiniams.

2.6 lentelė. Betono tempiamojo stiprio ir tempiamojo stiprio lenkiant rezultatų palyginimas

Betonas	f_{ct} (kN)	$f_{cr(ASTM)}$ (kN)	$f_{cr(ASTM)}/f_{ct}$	$f_{cr(Rilem)}$ (kN)	$f_{cr(Rilem)}/f_{ct}$
FRC1	3,58	4,70	1,31	6,00	1,68
FRC2	3,49	5,56	1,59	5,63	1,61
FRC3	3,76	6,09	1,62	5,94	1,58
FRC4	2,94	4,59	1,56	5,01	1,70
FRC5	3,22	5,43	1,69	4,39	1,36
Vidurkis:			1,55	-	1,59

2.4. Skyriaus išvados

Atliktų tyrimų gausa rodo J. R. Deluce'o atliktos programos išsamumą, o tą patį bandymą pakartojant po 3-4 kartus užtikrinama eksperimentų kokybė ir adekvatūs rezultatai.

Tiek ankstesniame skyriuje aprašyta literatūros apžvalga, tiek eksperimentinių tyrimų analizė parodė, kad net minimalus armavimas plieno plaušu (0,5 % pagal tūrį) pastebimai pagerina tempiamųjų elementų stiprumo, atsparumo pleišėjimui ir ypač deformacines savybes.

Betono tempiamasis stipris f_{ct} , nustatytas tiesioginio tempimo bandymu, yra apie 1,6 karto mažesnis nei tempiamasis stipris lenkiant, gautas pagal Rilem TC 162 ir ASTM C 1609 metodikas.

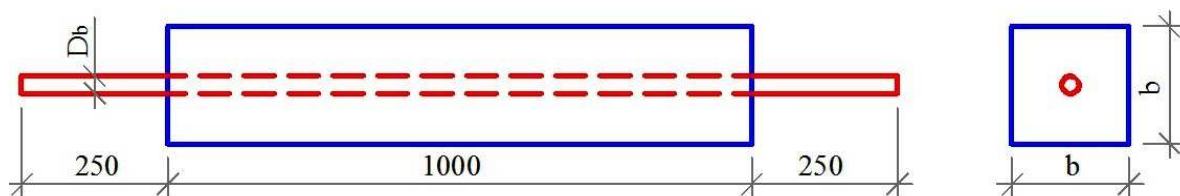
3. TEMPIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ PRIZMIŲ PLEIŠĖTUMO IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ

Trečiajame skyriuje aprašomi išsamūs J. R. Deluce'o atlikti tempiamųjų gelžbetoninių prizmių eksperimentiniai tyrimai (2011). Čia taip pat pateikiamos minėtų elementų apkrovos ir deforacijų, vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijų, tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės. Pleišėtumo analizė atlikta teoriškai apskaičiuotus vidutinius atstumus tarp plyšių ir maksimalius plyšių pločius lyginant su bandymų rezultatais.

3.1. J. R. Deluce'o atlikti tempiamųjų gelžbetoninių prizmių bandymai

Pagrindinis J. R. Deluce'o atliktos eksperimentinės programos tikslas buvo – ištirti tempiamąjį sustandėjimą plieno plaušu ir plieniniais strypais armuotame betone. Bandymų metu buvo keičiami šie parametrai: armavimo koeficientas ρ_f (nuo 1,3 iki 4,0 %), kuris priklausė nuo skirtingų betono ir armatūros plotų (A_c ir A_s), plieno plaušo kiekis V_f (nuo 0 iki 1,5 %) fibrų ilgio ir skersmens santykis l_f/d_f (nuo 48 iki 79). Eksperimentams buvo naudojamos kvadratinio skerspjūvio prizmės, kurių ilgis 1000 mm, o skerspjūviai buvo kintami: 50x50 mm, 80x80 mm, 100x100 mm, 150x150 mm ir 200x200 mm. Norint keisti bandinių armavimo koeficientą, buvo naudojami ir skirtingi armatūros strypai: 10M, 20M, 30M (pateikti kanadietiški dydžiai). Tam, kad tinkamai būtų įtvirtinti preso griebtuose, strypai pratęsti 250 mm abiejuose prizmės galuose, kaip parodyta 3.1 paveiksle. Siekiant išvengti galimų ekscentricitetų tempimo bandymu metu, armatūros strypai turėjo būti įdėti tiksliai gelžbetoninio elemento centre. Prizmių betonavimo klojiniai buvo pagaminti iš medienos.

Eksperimentų metu buvo išbandytos 5 serijos (3 serijos po 12 bandinių, 1 serija 6 bandinių ir 1 serija 5 bandinių) plieno plaušu ir išilginiu plieno strypu armuotų gelžbetoninių prizmių ir viena serija (12 bandinių) tokių pat prizmių be plieno plaušo. Siekiant ištirti armavimo fibromis efektyvumą tempiamiesiems betoniniams elementams, buvo keičiamas to paties tipo plieno plaušo kiekis V_f : 0,5 %, 1,0 % ir 1,5 %. Šios bandymų serijos atitinkamai pavadintos FRC1, FRC2 ir FRC3. Norint nustatyti fibrų ilgio ir skersmens santykio įtaką, buvo keičiamas fibrų tipas išlaikant tą patį plieno plaušo kiekį $V_f=1,5$ %. Šios bandymų serijos atitinkamai pavadintos FRC3, FRC4 ir FRC5. Kontroliniai bandiniai buvo gaminami iš įprastojo betono be plieno plaušo.



3.1 pav. Bandinių su išilginiu armatūros strypu geometriniai parametrai (pagal Deluce 2011)

Toliau paaiškinamas bandinių markiravimas: pvz. **H-50/10-FRC1** <1> turėtų būti suprantamas taip: **H**-prizmės skerspjūvio matmuo (mm)/kanadietiškas armatūros strypo dydis-betono mišinio žymuo <bandinio numeris>. Kadangi tempimo bandymai paprastai pasižymi rezultatų sklaida, tam, kad būtų galima nustatyti, ar eksperimentas atliktas kokybiškai, buvo bandoma po du kiekvienos kombinacijos – prizmės skerspjūvis, armatūros strypas, betono mišinys – elementus.

Bandymo įranga

Prizmių tempimo bandymai atlikti naudojantis universaliu 1000 kN MTS bandymų stendu, kuris pateikiamas 3.2 paveiksle. Prese įmontuota įranga leido išmatuoti tempimo jėgą, perduodamą bandomiems elementams.



3.2 pav. Prizmių su išilginiu armatūros strypu tempimo bandymas (Deluce 2011)

Ant bandinių taip pat buvo įtaisyti LVDT, kurie leido išmatuoti elemento išilginių poslinkių reikšmę esant tam tikram apkrovimui. LVDT su 950 mm matavimų baze buvo

pritvirtinti iš visų keturių elemento pusių. LVDT buvo prisukti prie aliuminių plokštelių, kurios prie bandomų prizmių priklijuotos epoksidiniais klijais. Prieš eksperimentą bandiniai buvo nudažyti baltai tam, kad būtų lengviau stebėti plyšių atsivėrimą. Visų bandinių skerspjūvio parametrai, armatūros strypų ir betono charakteristikos pateikiamos A priedo A.1 lentelėje.

Visos prizmės išbandytos vienodomis sąlygomis, poslinkių kontrolės metodu. Iš pradžių jos buvo apkrautos poslinkiu 0,0015 mm/s iki pirmojo plyšio atsivėrimo. Tada apkrovos perdavimo greitis buvo padidintas nuo 0,0015 iki 0,004 mm/s iki armatūra pasiekė takumo ribą. Armatūrai pradėjus tekėti apkrovos perdavimo greitis padidintas iki 0,04 mm/s ir buvo išlaikomas iki bandymo pabaigos. Eksperimentas periodiškai stabdytas tam, kad būtų sužymėti atsivėrę plyšiai, pamatuoti jų pločiai ir nufotografuoti bandiniai. Bandymas nutrauktas pasiekus 25 mm išilginį LVDT matuojamą poslinkį.

Tyrimų rezultatai

Armatūros strypui pradėjus tekėti, įtempiai buvo linkę koncentruotis viename ar dviejuose dominuojančiuose plyšiuose. Kadangi SFRC elementų plyšiuose fibros galėjo perimti dalį tempimo jėgos, maksimali apkrova nebuvo ribojama armatūros strypo takumo. Eksperimentų metu buvo gauti apkrovos-pailgėjimo, vidutinio atstumo tarp plyšių-pailgėjimo, maksimalaus plyšio pločio ir pailgėjimo skaitiniai duomenys, taip pat plyšių kiekis bei jų pločiai (Deluce 2011). Minėti duomenys buvo naudojami šiame magistriniame darbe analizuojant tempiamųjų elementų pleišėtumą ir deformacijas. Supleišėjusių bandinių nuotraukos pateikiamos A priedo A.1-A.6 paveiksluose.

3.2. Tempiamųjų gelžbetoninių prizmių bandymų rezultatų analizė

Šiame poskyryje sudaromos tempiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų apkrovos ir deformacijų priklausomybės, kuriomis įvertinamas plieno plaušo poveikis supleišėjusio tempiamojo elemento elgsenai. Deluce'o atliekamų tyrimų metu tempiant gelžbetonines prizmes, buvo matuojama veikianti jėga, bandinio pailgėjimas, skaičiuojamas atsivėrimo plyšių kiekis, matuojamas jų plotis. Kadangi, atliekant 2.3 poskyryje aprašytus laisvojo betono susitraukimo bandymus, nustatytos didelės $\epsilon_{c,sh}$ deformacijos (nuo -0,30 iki -0,83 mm/m), siekiant nustatyti tikrąją tempiamųjų prizmių apkrovos ir deformacijos priklausomybę, reikėjo įvertinti betono susitraukimą. Tai padaryta pagal 1.3 poskyryje aprašytą Bischoffo metodiką (Bischoff 2001). Turint apkrovos ir

pailgėjimo skaitinius rezultatus, LVDT duomenys pirmiausia perskaičiuoti į deformacijas, remiantis (1.16) išraiška.

Toliau pateikiamas vieno iš bandinių (H-100/20-FRC1<2>) tikrosios apkrovos ir deformacijos ($P - \varepsilon$) priklausomybės sudarymo algoritmas. Duomenys imami iš A priedo A.1 lentelės. Pirmiausia apskaičiuojamas armatūros ir betono tamprumo modulių santykis bei armavimo koeficientas:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{194000}{35000} = 5,54,$$
$$\rho_s = \frac{A_s}{A_c} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{b^2} = \frac{3,14 \cdot 0,0195^2}{0,10^2} = 0,0299.$$

Tada pagal (1.17) išraišką nustatoma teorinė prizmės pleišėjimo apkrova:

$$P_{cr} = f_{ct} A_c (1 + n \rho_s) = 3,28 \cdot 10^3 \cdot 0,10^2 (1 + 5,54 \cdot 0,0299) = 38,23 \text{ kN}.$$

Pagal (1.18) apskaičiavus betono pleišėjimo deformaciją:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_{ct}}{E_c} = \frac{3,28}{35000} = 0,094 \cdot 10^{-3},$$

pleišėjimo apkrovos sumažėjimas dėl pradinio elemento susitraukimo nustatomas remiantis (1.19) lygtimi:

$$\Delta P_{cr} = \left(\frac{n \rho_s \varepsilon_{sh}}{(1 + n \rho_s) \varepsilon_{cr}} \right) P_{cr} = \left(\frac{5,54 \cdot 0,0299 \cdot (-0,54)}{(1 + 5,54 \cdot 0,0299) \cdot 0,094} \right) 38,23 = -31,29 \text{ kN}.$$

Galiausiai pradinės elemento deformacijos dėl betono susitraukimo apskaičiuojamos pagal (1.14) lygtį:

$$\varepsilon_{tot,offset} = \frac{\varepsilon_{sh}}{1 + n \rho_s} = \frac{-0,54 \cdot 10^{-3}}{1 + 5,54 \cdot 0,0299} = -0,077 \cdot 10^{-3}.$$

Atlikus šiuos skaičiavimus galima sudaryti tikrąją apkrovos ir deformacijos ($P - \varepsilon$) diagramą (žr. 3.6 pav.). Prie kiekvienos bandymų standu išmatuotos tempimo jėgos reikšmės N_i , pridedamas pleišėjimo jėgos sumažėjimas ΔP_{cr} :

$$P_{tot,act,i} = N_i + \Delta P_{cr},$$

o prie kiekvienos deformacijos reikšmės ε_i pridedama pradinė elemento deformacija dėl betono susitraukimo $\varepsilon_{tot,offset}$:

$$\varepsilon_{tot,act,i} = \varepsilon_i + \varepsilon_{tot,offset}.$$

Apkrovos ir deformacijos ($P - \varepsilon$) priklausomybės sudaromos analogiškai visiems 59 Deluce'o bandiniams. Jos pateikiamos B.1 priedo B.1.1-B.1.30 paveiksluose. Tam, kad

apkrovos ir deformacijų reikšmės grafikuose būtų tik teigiamos, atlikus skaičiavimus koordinačių ašys persliktos per apskaičiuotus ΔP_{cr} ir $\varepsilon_{tot,offset}$ dydžius atitinkamomis kryptimis.

Teorinių skaičiavimų tikslumą galima patikrinti juos lyginant su eksperimentiniais rezultatais. Pavyzdžiui, galima nustatyti, kokia jėga reikia veikti analizuojamą prizmę, kad joje atsivertų pirmasis plyšys. Šiam tikslui iš apskaičiuotos pleišėjimo apkrovos P_{cr} reikia atimti dėl betono susitraukimo atsirandančią jėgą ΔP_{cr} :

$$P_{cr, teor} = P_{cr} + \Delta P_{cr} = 38,23 + (-31,29) = 6,94 \text{ kN}.$$

Atliekant bandymą nustatyta, kad prizmė supleišėjo, kai apkrova $P_{cr, eksp}$ pasiekė 8,10 kN. Šis nedidelis skirtumas tarp $P_{cr, teor}$ ir $P_{cr, eksp}$ rodo, kad skaičiavimai atlikti teisingai. Bandiniams, kurie supleišėjo dar iki eksperimento pradžios, gaunama, kad $P_{cr} < \Delta P_{cr}$. Tai dažniausiai mažų gabaritų prizmės, kurių armavimo procentas yra didelis ($b=50 \text{ mm}$, $\rho_s = 4,01 \%$).

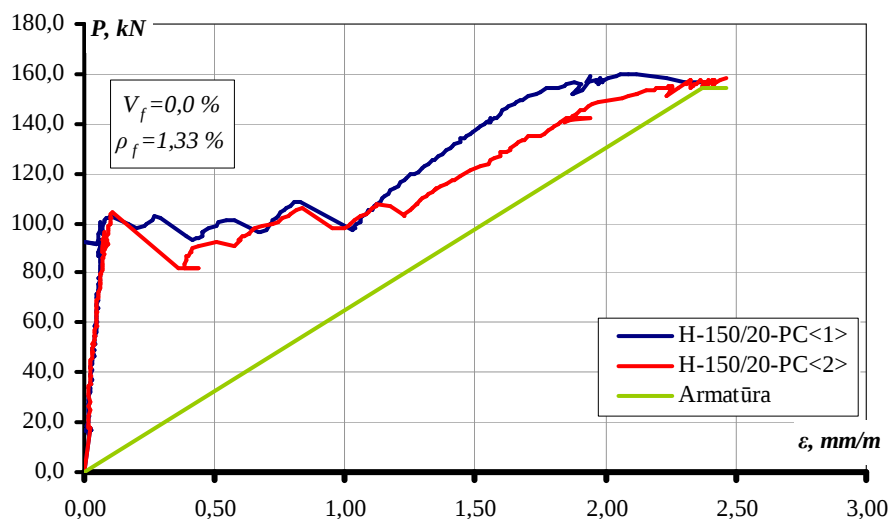
Po vieną grafiką betono mišiniams su skirtingu plieno plaušo kiekiu (PC $V_f=0,0 \%$, FRC1 $V_f=0,5 \%$, FRC2 $V_f=1,0 \%$, FRC3 $V_f=1,5 \%$) pateikiama ir šiame skyriuje (žr. 3.3 pav., 3.5 pav., 3.7 pav., 3.9 pav.). Kiekvienoje diagramoje matyti po dvi kreives (mėlyna ir raudona), kurios gautos apdorojant identiškų bandinių eksperimentinius duomenis. Šios kreivės vaizduojamos iki armatūros takumo pradžios arba bandymo pabaigos, jei tai įvyko anksčiau. Žalia kreivė rodo armatūrai tenkančią tempimo jėgą. Betono perimama tempimo jėga – tai vertikalus atstumas tarp mėlynos (arba raudonos) ir žalios grafiko kreivių. Lyginant 3.3 pav. su 3.5 pav., 3.7 pav., ir 3.9 pav., matyti, kad bandiniai su įprastuoju betonu suyra pasiekus armatūros takumo ribą, o betonas, armuotas plieno plaušu, atlaiko dalį tempimo jėgos netgi tekant armatūrai.

Atliktų eksperimentų kokybę įrodo tai, kad identiškų bandinių kreivės praktiškai sutampa (žr. 3.5 pav. ir 3.9 pav.), o jei šiek tiek ir skiriasi, tai bent jau jų pobūdis labai panašus (žr. 3.3 pav. ir 3.7 pav.). Bene pagrindinis bandymų trūkumas yra tas, kad prizmės buvo tempiamos už armatūros galų, o poslinkiai matuoti ant betono paviršiaus. Dėl šios priežasties teoriškai apskaičiuota deformacija armatūroje yra didesnė, nei tuo momentu išmatuota ant betono paviršiaus. Todėl pateikiamuose grafikuose gali būti stebimas didesnis nei yra iš tikrųjų tempiamojo sustandėjimo efektas, o kartais net tempiamojo sustiprėjimo efektas. Taip dažniausiai atsitinka didelių matmenų bandiniuose, kur betono apsauginis sluoksnis yra gerokai didesnis. Toks tempiamojo sustandėjimo efektas kartais pereinantis į tempiamąjį sustiprėjimą didesniuose bandiniuose gali rasti ir dėl didesnio fibrų, kertančių atsiveriančius plyšius, skaičiaus. Iki bandinio supleišėjimo tempimo jėgą perima betonas,

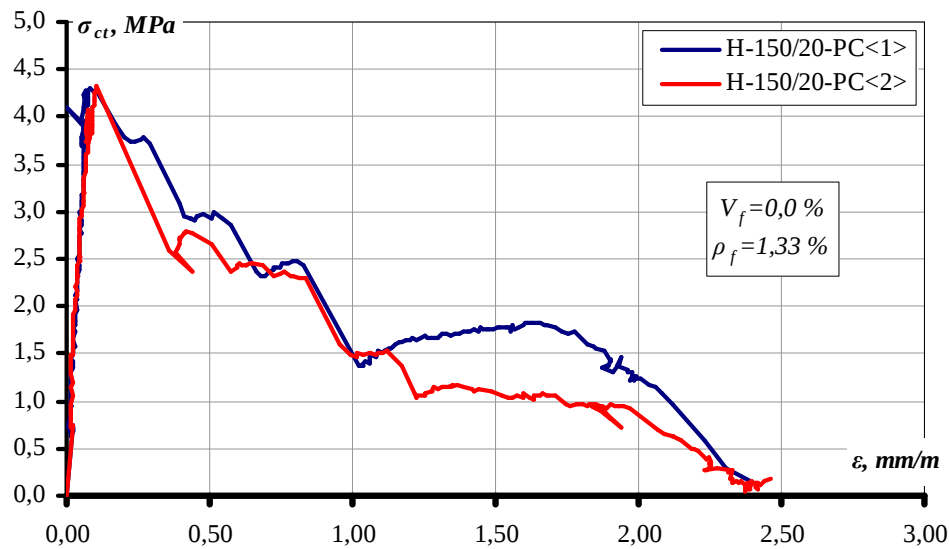
kurio tempiamasis stipris nėra didelis, ir armatūra, o atsivėrusiame plyšyje – ta pati armatūra ir didelis kiekis fibrų, kurioms ištraukti arba nutraukti reikalinga didesnė jėga.

Remiantis anksčiau aprašytais skaičiavimais ir sudarytomis apkrovos ir deformacijos ($P - \varepsilon$) diagramomis, nustatyta tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybė. Įtempiai betone apskaičiuoti pagal 1.3 poskyryje pateikiamą (1.20) formulę. B.2 priedo B.2.1-B.2.30 paveiksluose pateikiamos visų 59 bandinių tempiamojo įtempių ir deformacijų priklausomybės ($\sigma_{ct} - \varepsilon$). Kiekviename paveiksle pateikiama po dvi kreives, kurios gautos apdorojant identiškų bandinių eksperimentinius duomenis. Šios kreivės vaizduojamos iki armatūros takumo pradžios arba bandymo pabaigos, jei tai įvyko anksčiau. Po vieną grafiką betono mišiniams su skirtingu plieno plaušo kiekiu (PC $V_f=0,0$ %, FRC1 $V_f=0,5$ %, FRC2 $V_f=1,0$ %, FRC3 $V_f=1,5$ %) pateikiama ir šiame skyriuje (žr. 3.4 pav., 3.6 pav., 3.8 pav., 3.10 pav.).

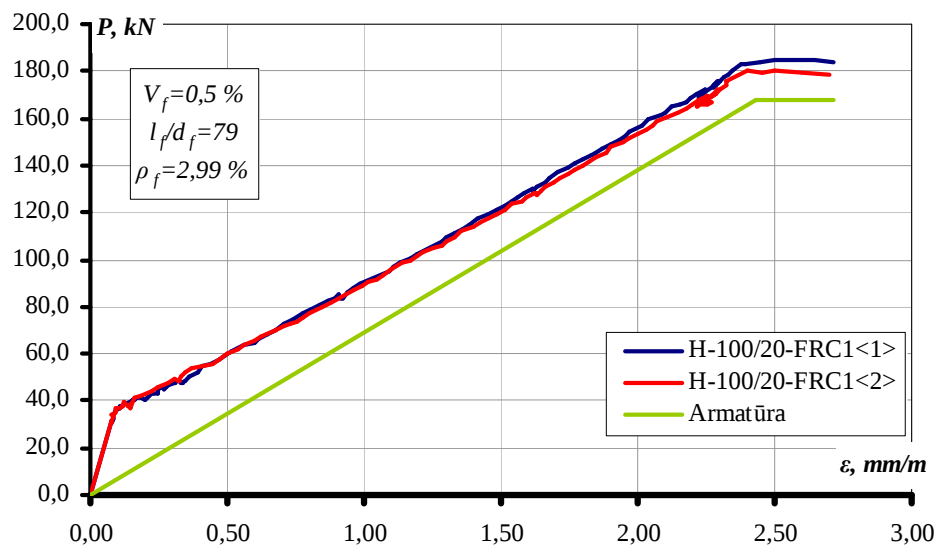
Iš 3.4 pav. matyti, kad, pasiekus betono tempiamąjį stiprį, įtempiai jame palaipsniui mažėja iki armatūros takumo ribos, kol pasiekia 0. Tai reiškia, kad supleišėjęs betonas nebeperima tempimo jėgos. Visai kitokią betono elgseną galima stebėti 3.6 pav., 3.8 pav. ir 3.10 pav. Čia supleišėjęs betonas geba perimti dalį tempimo jėgos. Apie tai leidžia spręsti ne taip staigiai krentančios betono kreivės, rodančios liekamuosius įtempius, kuriuos plieno plaušu armuotas betonas perima plyšiuose. Tarpusavyje lyginant 3.6 pav., 3.8 pav., 3.10 pav. pateikiamus grafikus, galima daryti išvadą, kad kuo didesnis plaušo kiekis V_f , tuo didesni liekamieji įtempiai betone (horizontalėsnė krentančioji dalis).



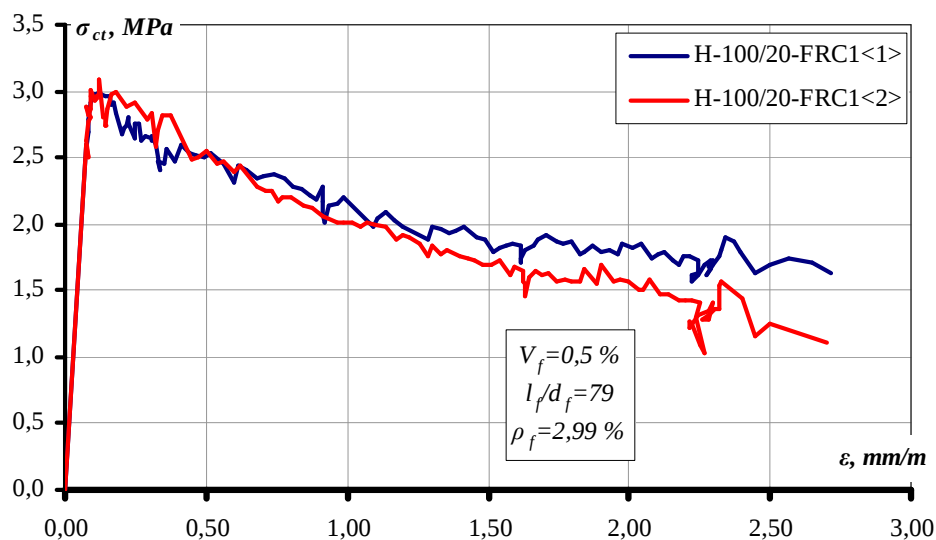
3.3 pav. H-150/20-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



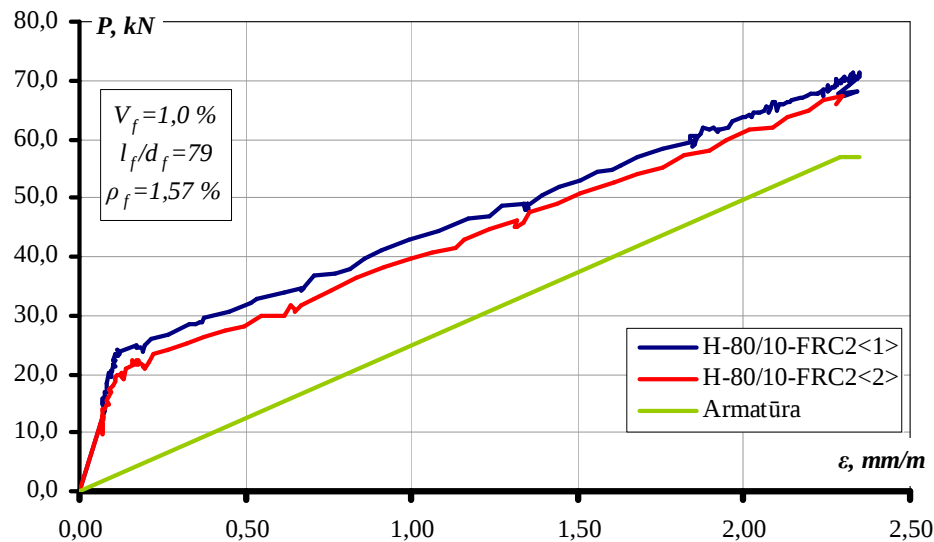
3.4 pav. H-150/20-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



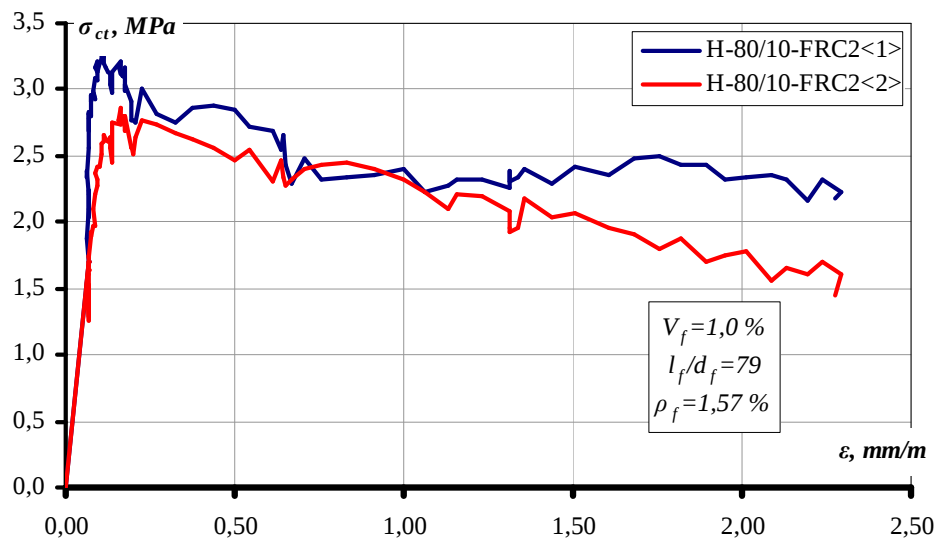
3.5 pav. H-100/20-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



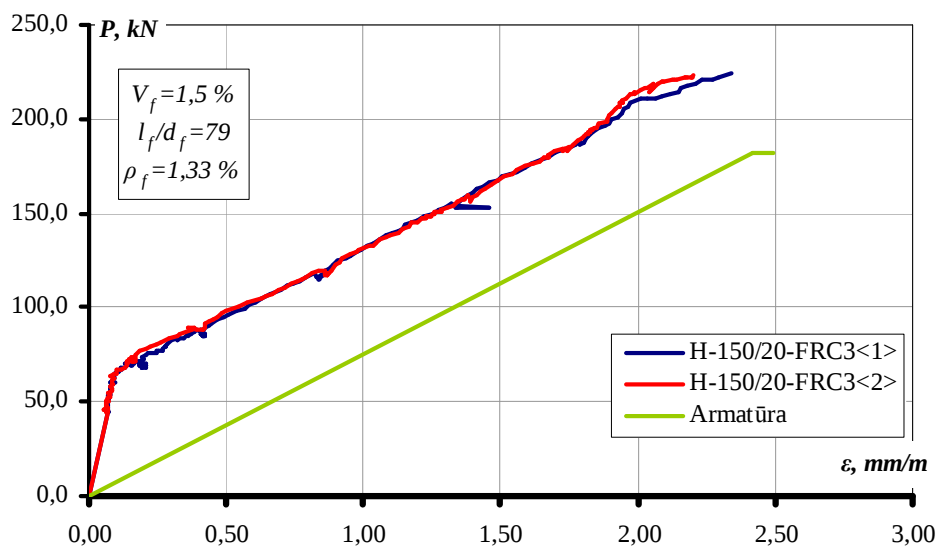
3.6 pav. H-100/20-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



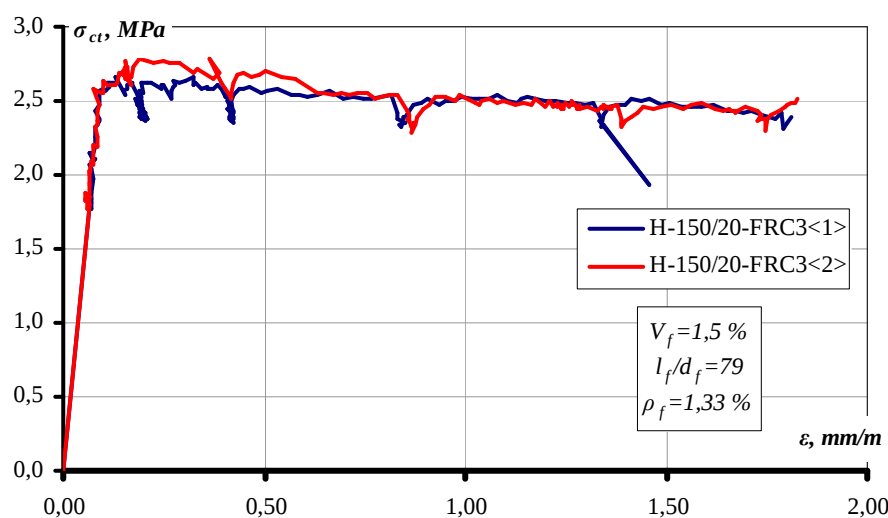
3.7 pav. H-80/10-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



3.8 pav. H-80/10-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempio ir deformacijos priklausomybės



3.9 pav. H-150/20-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)

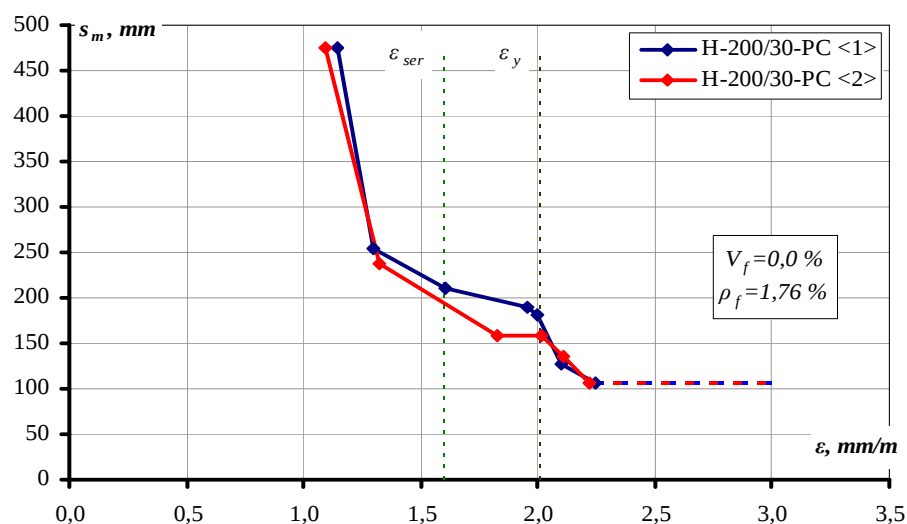


3.10 pav. H-150/20-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės

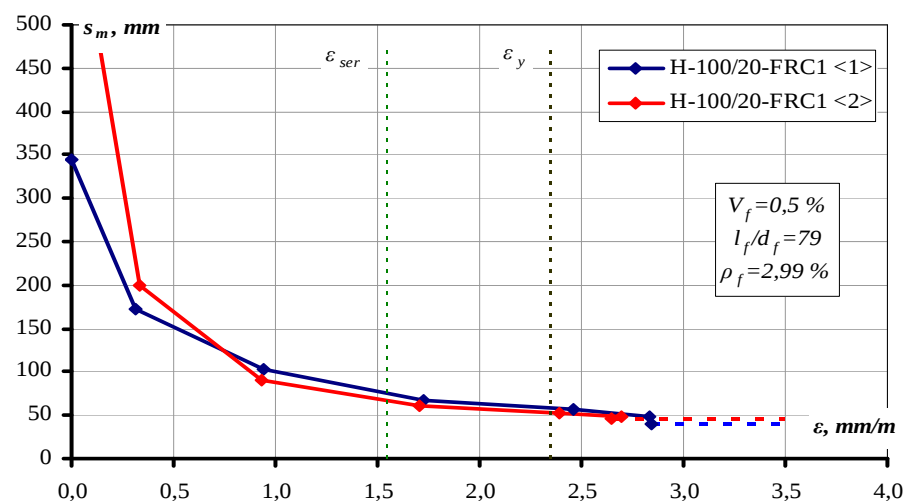
Tam, kad būtų galima adekvačiai analizuoti tempiamųjų gelžbetoninių prizmių pleišėjimą, rengiant baigiamąjį darbą buvo sudarytos vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės ($s_m - \epsilon$). Atstumas tarp plyšių buvo nustatytas žinant Deluce'o atliktų bandymų metu atsivėrusių plyšių skaičių, o deformacijos apskaičiuotos iš LVDT gautų duomenų. Minėtos priklausomybės visiems 59 bandiniams pateikiamos C priedo C.1-C.30 paveiksluose. Kiekviename paveiksle vaizduojama po dvi kreives, kurios gautos apdorojus identišką bandinių eksperimentinius duomenis. Po vieną grafiką betono mišiniams su skirtingu plieno plaušo kiekiu (PC $V_f=0,0 \%$, FRC1 $V_f=0,5 \%$, FRC2 $V_f=1,0 \%$, FRC3 $V_f=1,5 \%$) pateikiama ir šiame skyriuje (žr. 3.11-3.14 pav.).

Literatūroje dažnai teigiama, kad pleišėjimas analizuojamas, kai pasiekama stabili pleišėjimo stadija – atstumai tarp plyšių nekinta (Deluce *et al.* 2014). Tačiau iš minėtų grafikų matyti, kad, kol bandinys nepradedą irti, ši stadija nepasiekama. Nauji plyšiai veriasi net pradėjus tekėti armatūrai, tai ypač akivaizdu 3.11 pav. Kadangi konstrukcijos armatūrai pasiekus takumo deformaciją ϵ_y , projektuotojai ją laiko suirusia ir toliau neanalizuoja, pleišėjimui tirti reikia nustatyti kitą ribą. Šiame baigiamajame darbe tokia riba yra ϵ_{ser} . Tai deformacija, kai įtempiai armatūroje pasiekia 300 MPa. (Toliau darbe tai gali būti įvardinta ir kaip apkrova P_{ser} .) Iš 3.11-3.14 pav. matyti, kad vidutinis atstumas tarp plyšių s_m nuo ϵ_{ser} iki ϵ_y pastebimai pakinta.

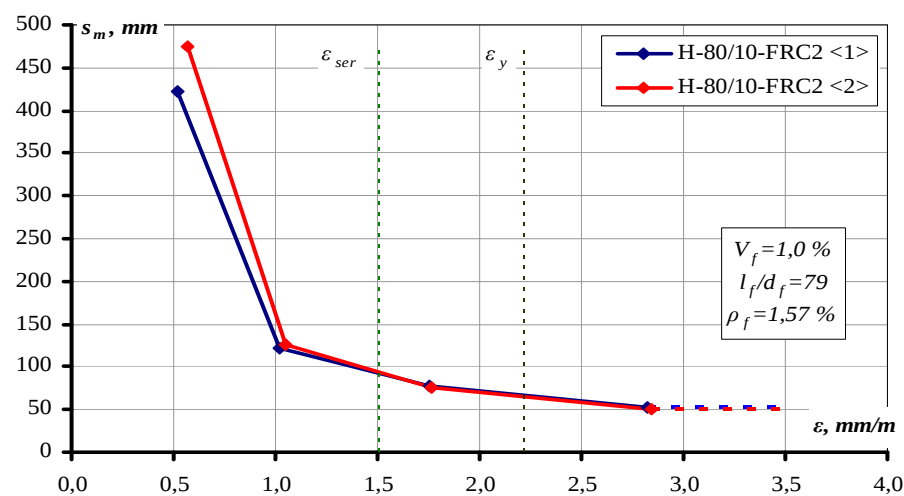
Analizuojant minėtus paveikslus galima teigti, kad bandymai atlikti kokybiškai, nes grafikų kreivės arba sutampa, arba jų pobūdis labai panašus. Net jei pleišėjimo pradžioje identišką bandinių atstumai tarp plyšių s_m skiriasi kelis kartus (žr. 3.12 pav. ir 3.14 pav.), tai, didėjant deformacijai, ryškėjantis kreivių panašumas rodo tokią pačią elementų elgseną.



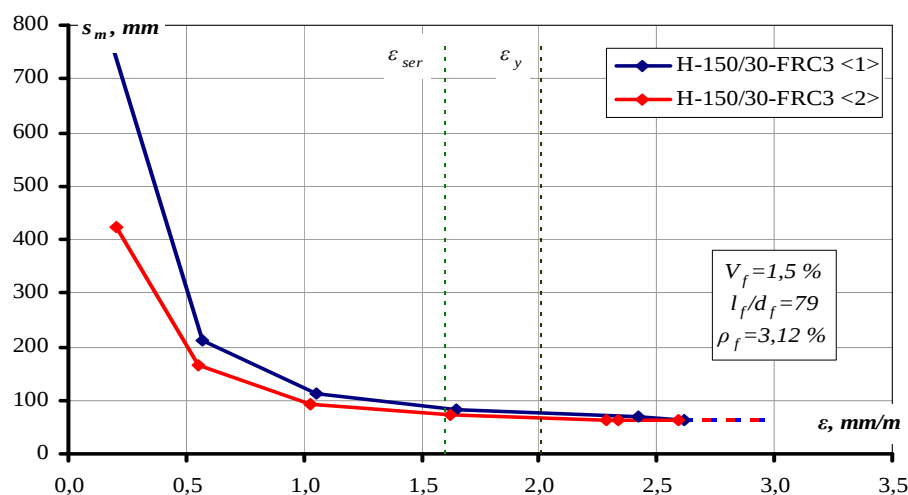
3.11 pav. H-200/30-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



3.12 pav. H-100/20-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)

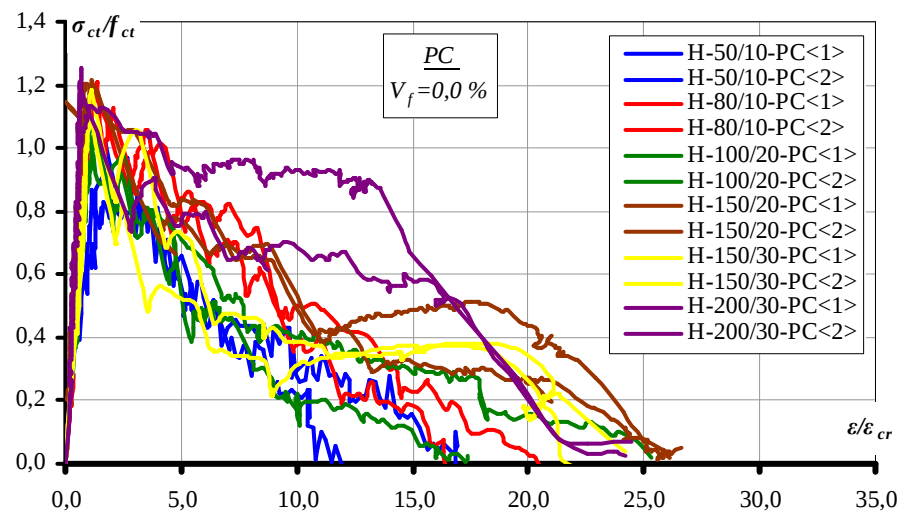


3.13 pav. H-80/10-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)

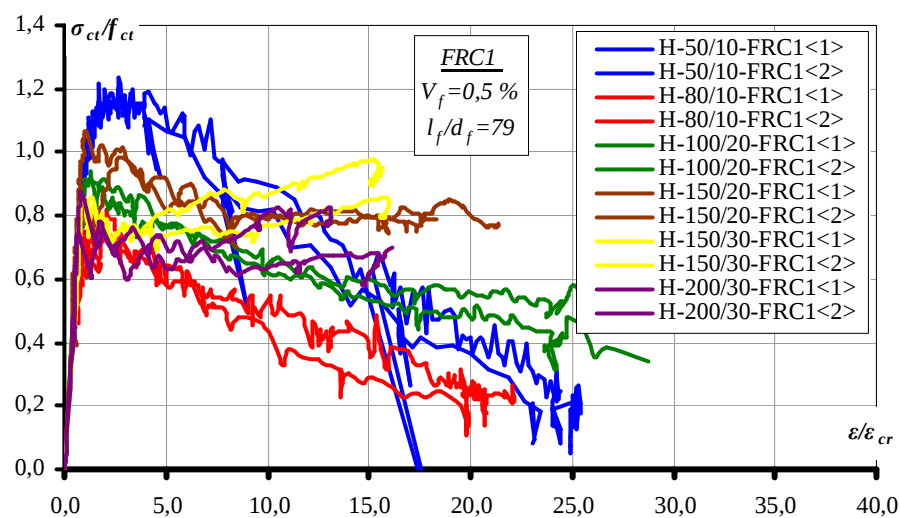


3.14 pav. H-150/30-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)

Kadangi prizmių tempimo bandymams buvo naudotas skirtingo stiprumo betonas, tai B.2 priedo B.2.1-B.2.30 paveiksluose pateiktos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybė gali būti vertinamos tik atskirai. Norint viename grafike atidėti ir tarpusavyje palyginti skirtingų bandinių kreives, įtempių reikšmės buvo padalintos iš betono tempiamojo stiprio f_{ct} , o deformacijų reikšmės – iš pleišėjimo deformacijos ϵ_{cr} . Visos gautos normalizuotos betono įtempių ir deformacijų diagramos ($\sigma_{ct} / f_{ct} - \epsilon / \epsilon_{cr}$) pateikiamos D priedo D.1-D.6 paveiksluose. Kiekviename grafike matyti vis kito betono mišinio visų bandinių kreivės. 3.15 ir 3.16 paveiksluose pateikiamos įprastojo (PC) ir fibromis armuoto (FRC1) betono priklausomybės, rodančios, kad net nedidelis plieno plaušo kiekis ($V_f=0,5\%$) pastebimai pagerina supleišėjusio betono darbą – atsiranda liekamieji įtempiai, krentančioji kreivės dalis tampa horizontalesnė. Iš pateiktų diagramų taip pat matyti, kad dažnu atveju, didėjant prizmių skerspjūvio matmenims, įtempiai supleišėjusiame betone degradoja lėčiau. Todėl iš šių paveikslų sunku įvertinti fibrų kiekio ar geometrijos įtaką liekamiesiems betono įtempiams.

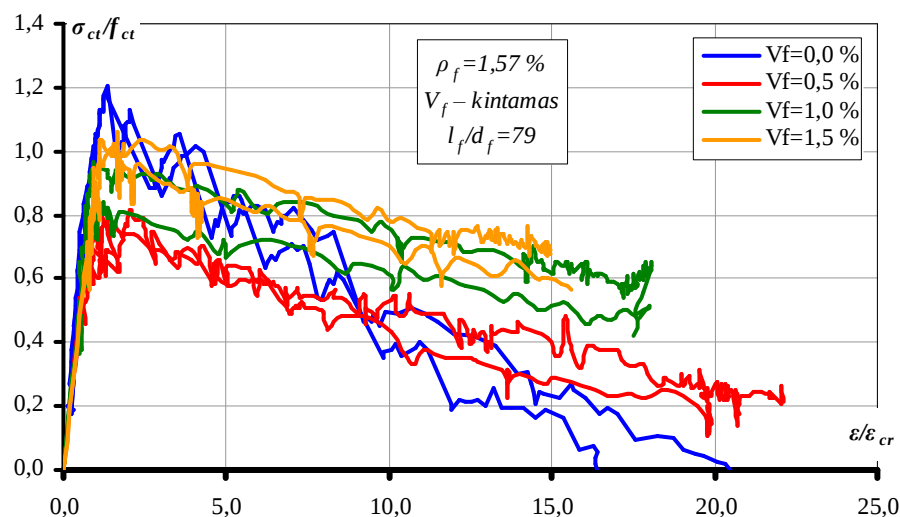


3.15 pav. PC betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės

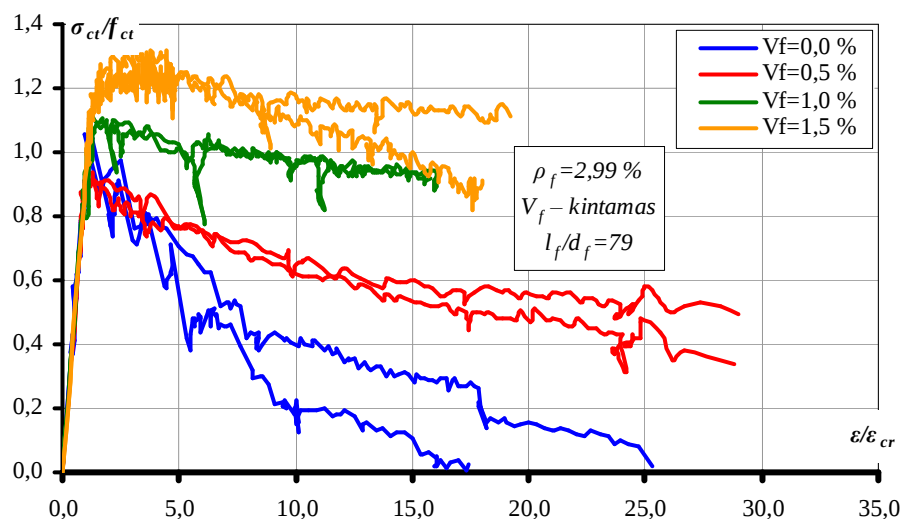


3.16 pav. FRC1 betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės

Siekiant nagrinėti plieno plaušo kiekio įtaką supleišėjusiam betonui, minėtos kreivės buvo sugrupuotos ne pagal betono mišinį, bet pagal armavimo procentą ρ_f ir l_f/d_f santykį. Iš 3.17 ir 3.18 paveikslų matyti akivaizdi plieno plaušo nauda – kuo jo kiekis V_f didesnis, tuo didesni liekamieji įtempiai supleišėjusiame betone (šiuo atveju didesnis santykis σ_{ct}/f_{ct} krentančioje diagramos dalyje). Minėtus grafikus lyginant tarpusavyje, galima pastebėti, kad, esant didesniai armavimo procentui ρ_f , šis skirtumas akivaizdžiai didesnis. Visiems bandiniams diagramos pateikiamos D priedo D.7-D.12 paveiksluose.

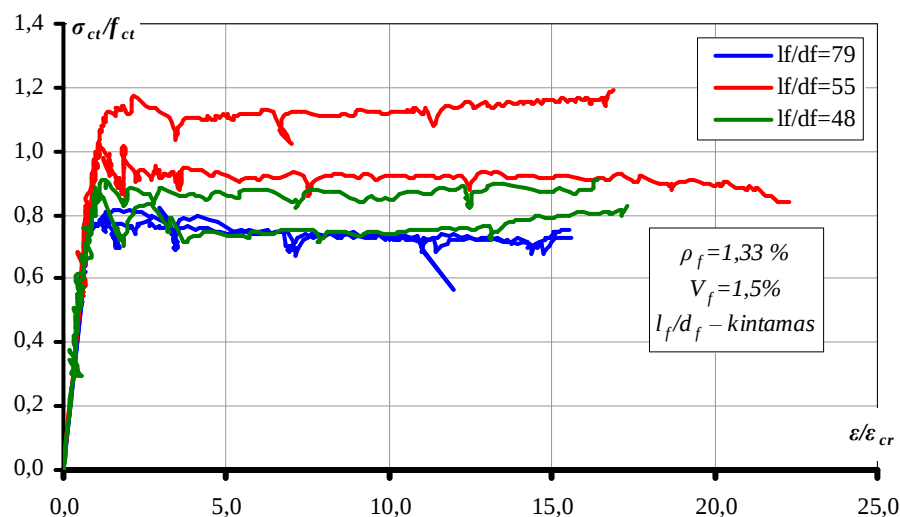


3.17 pav. H-80/10 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempimų ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %



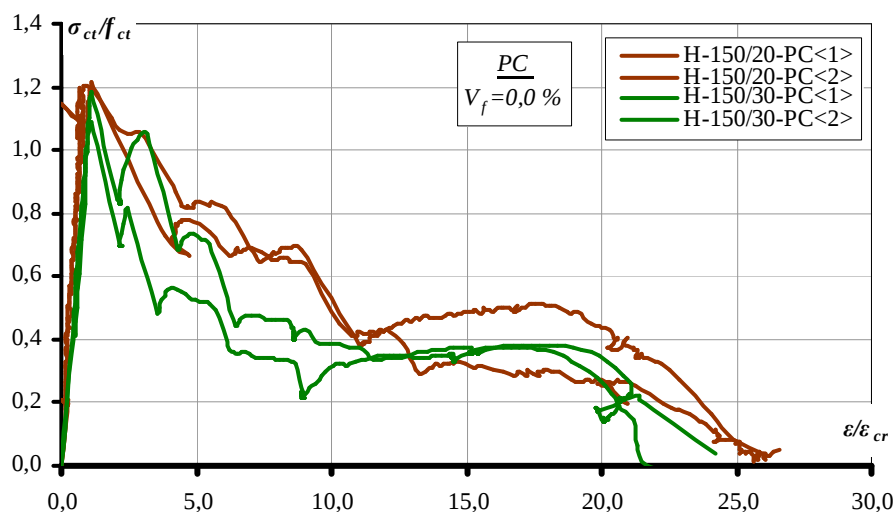
3.18 pav. H-100/20 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempimų ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %

Analizuojant plieninių fibrų geometrijos įtaką minėtos kreivės sugrupuotos pagal armavimo procentą ρ_f ir plieno plaušo kiekį V_f . Toliau pateikiamame 3.19 paveiksle nepastebimas aiškus dėsningumas, priklausantis nuo l_f/d_f santykio. Iš grafiko matyti, kad liekamieji įtempiai didžiausi, kai šis santykis lygus 55, mažiausi – kai $l_f/d_f=79$, o kreivės su santykiu $l_f/d_f=48$ išsidėsto per vidurį. Todėl fibrų geometrijos įtaka supleišėjusio betono darbui nenustatyta. Visos diagramos pateikiamos D priedo D.13-D.15 paveiksluose.

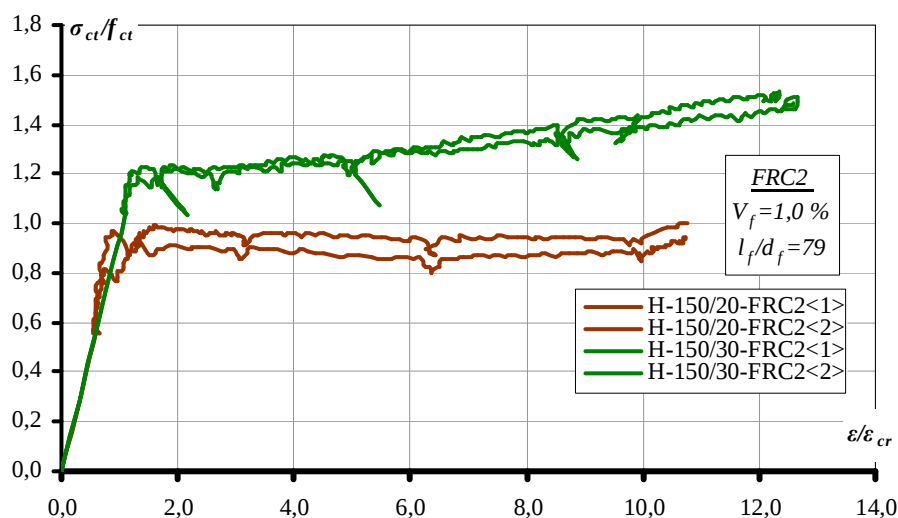


3.19 pav. H-150/20 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai l_f/d_f kinta nuo 48 iki 79

Norint įvertinti armavimo procento įtaką supleišėjusiam betonui, tarpusavyje buvo lyginti vienodi bandiniai su skirtingu armatūros skersmeniu. 3.20 ir 3.21 paveiksluose pateikiamos įprastojo (PC) ir plieno plaušu armuoto (FRC2) betono normalizuotos įtempių ir deformacijų priklausomybės. Visų betono mišinių diagramos pateikiamos D priedo D.16-D.21 paveiksluose. Iš 3.20 pav. matyti, kad įprastajam betonui armavimo procentas didesnės įtakos neturi. Tačiau, analizuojant plieno plaušu armuotus bandinius, pastebėta, kad, didėjant armavimo procentui ρ_f , liekamieji betono įtempiai ne tik nedegraduoja, bet elementas netgi standėja (žr. 3.21 pav.). Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad, esant didesniam armatūros skersmeniui, fibros bandinyje būna labiau orientuotos prizmės išilginės ašies kryptimi. Tokiu būdu elemente atsiveria daugiau plyšių, atstumas tarp jų mažesnis, todėl natūralu, kad mažesni ir plyšių pločiai. Iš liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės ($\sigma_{fr} - w_{cr}$) yra žinoma, kad kuo didesnis plyšio plotis, tuo liekamieji įtempiai jame yra mažesni ir atvirkščiai. Visa tai lemia neįprastą betono elgseną, matomą 3.21 paveiksle.



3.20 pav. PC betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



3.21 pav. FRC2 betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės

3.3. Vidutinio atstumo tarp plyšių skaičiavimų analizė

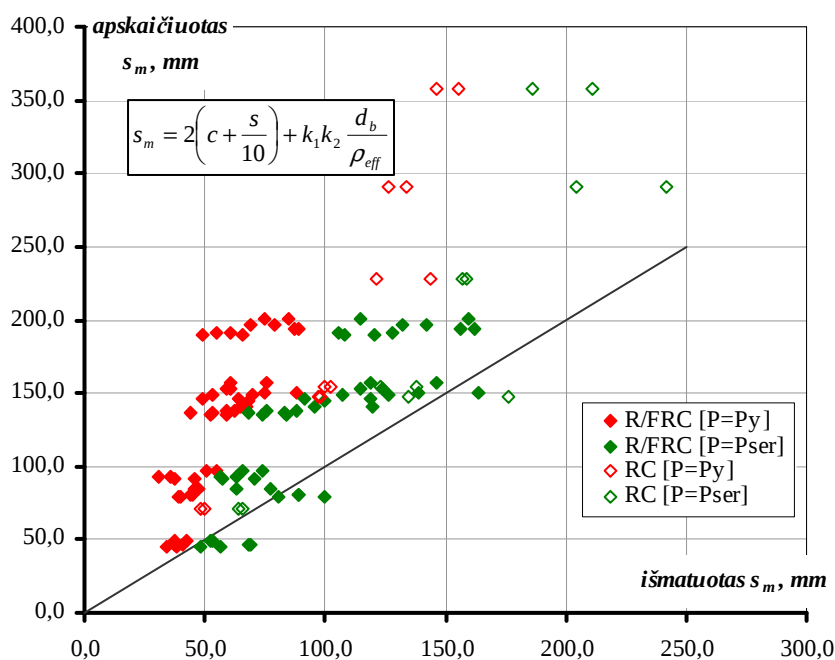
Šiame poskyryje analizuojama viena pagrindinių pleišėjimo charakteristikų – vidutinis atstumas tarp plyšių s_m . Rengiant baigiamąjį darbą, remiantis Deluce'o eksperimentinės programos duomenimis (2011), atlikti teoriniai skaičiavimai, kurie vėliau palyginti su bandymų rezultatais. Vidutinis atstumas tarp plyšių buvo skaičiuojamas visoms 59 išbandytoms gelžbetoninėms prizmėms (12 įprastojo betono ir 47 armuotos plieno plaušu). Analizė atlikta remiantis 1.4.1 skyrelyje aprašytomis formulėmis, skirtomis įprastiems gelžbetoniniams elementams, ir 1.4.2 skyrelyje pateikiamomis formulėmis plieno plaušu armuoto gelbetonio pleišėjimo skaičiavimui.

Pagrindinis dėmesys buvo skiriamas pačiam naujausiam, 2014 m. pradžioje *ACI Structural Journal* publikuotam Deluce'o ir Vecchio atstumo tarp plyšių skaičiavimo modeliui (Deluce *et al.* 2014). Tai modifikuotas CEB-FIP 1978 pleišėjimo modelis, kuris papildytas k_3 koeficientu, įvertinančiu plieno plaušo kiekį ir fibrų geometrinius parametrus. Nauja formuluotė publikuotame straipsnyje pristatyta kaip daug tikslesnė nei lig šiol egzistavę modeliai. Tačiau, rengiant baigiamąjį darbą, paaiškėjo, kad iš tikrųjų taip nėra.

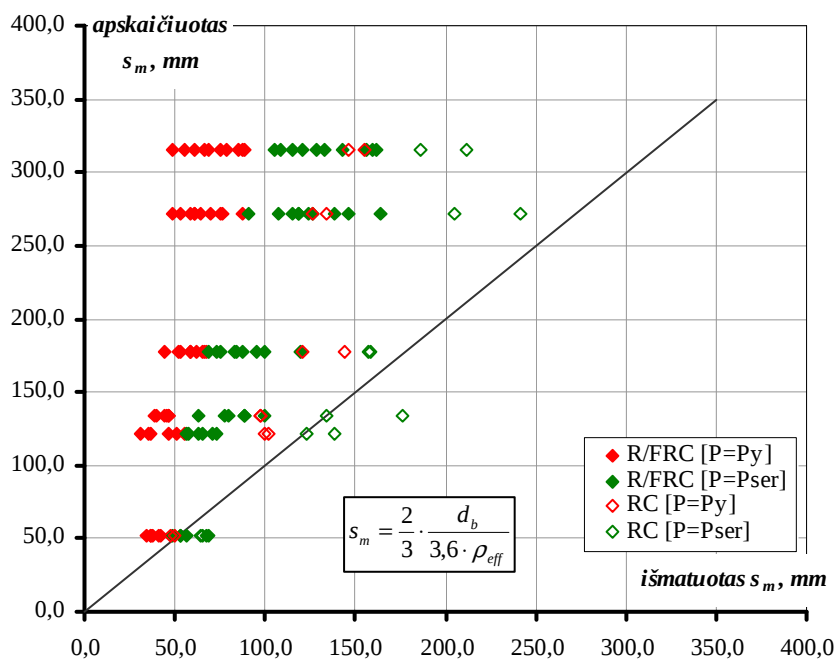
Pristatant naująjį modelį minėtoje publikacijoje, pateikiamas teorinių skaičiavimų pagal (1.28), (1.29) ir (1.31) formules palyginimas su Deluce'o atliktų eksperimentų rezultatais. Čia parodytas akivaizdus Deluce'o ir Vecchio modelio pranašumas prieš egzistuojančiuosius Rilem TC 162-TDF (Dupont, Vandewalle 2003) ir Moffatto (2001). Tačiau pastebėta, kad teoriniai skaičiavimai buvo lyginti su eksperimentine s_m reikšme, kai pleišėjimas tariamai stabilizavęsis, t.y. jau pradėjus tekėti armatūrai. Ankstesniame poskyryje, remiantis tais pačiais bandymais, parodyta, kad toks pleišėjimo vertinimas nėra adekvatus ir tikslingas.

Rengiant baigiamąjį darbą, teoriniai skaičiavimai atlikti pagal aštuonias skirtingas formules, o jų rezultatai palyginti su eksperimentinėmis reikšmėmis, kai apkrova $P=P_{ser}$, t.y. įtempiai armatūroje pasiekia 300 MPa (žr. 3.22-3.29 pav.). Tam, kad autoriaus teiginių pagrįstumas būtų akivaizdesnis, kartu pateikiamos ir Deluce'o vertintos s_m reikšmės, kai $P=P_y$, t.y. patekęjus armatūrai. Grafikuose skirtingai žymimi įprastojo (RC) ir plieno plaušu armuoto gelžbetonio (SFRC) elementai.

Iš 3.22 ir 3.23 paveikslų matyti, kad CEB-FIP 1978 modelis, įvertinantis betono apsauginį sluoksnį ir deformacijų būvį yra pastebimai pranašesnis už CEB-FIP 1990. Tiek (1.21), tiek (1.22) formulės skirtos įprastajam gelžbetoniui, bet panašu, kad šiek tiek modifikuotas pirmasis modelis galėtų būti taikomas ir plieno plaušu armuotiems elementams. Tai ir bandė padaryti Deluce'as, tačiau ne visai teisingai (žr. 3.29 pav.).



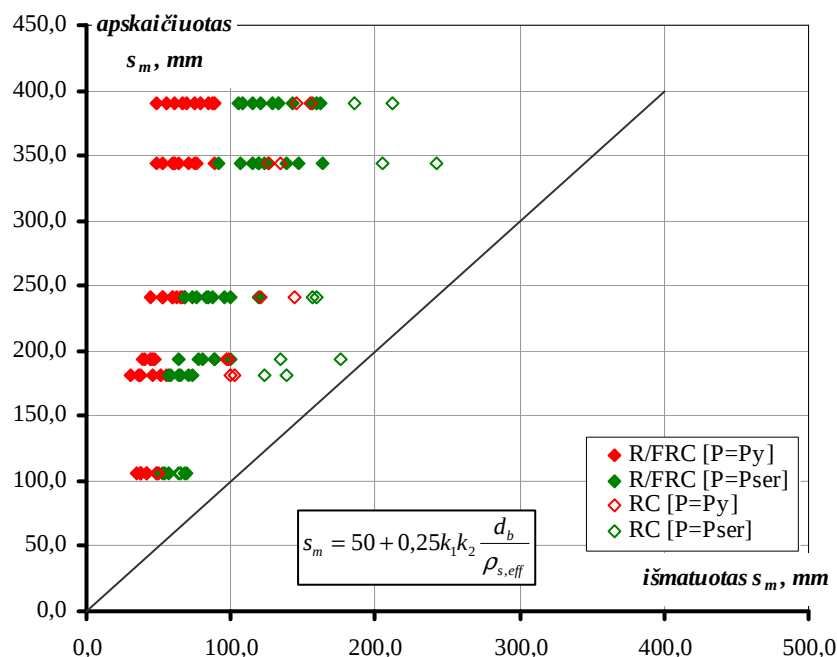
3.22 pav. Išmatuotų ir pagal CEB-FIP 1978 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$



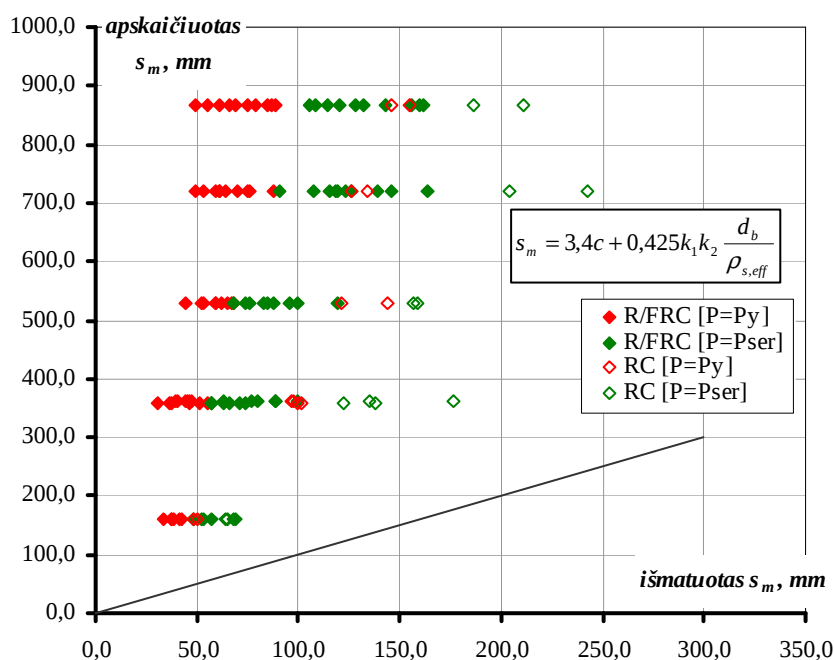
3.23 pav. Išmatuotų ir pagal CEB-FIP 1990 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$

Tarpusavyje lyginant du skirtingais laikotarpiais Eurokode 2 pasiūlytus pleišėjimo modelius (žr. 3.24 ir 3.25 pav.) akivaizdu, kad anksčiau paskelbta (1.25) formulė yra gerokai tikslesnė. Nors (1.27) išraiškoje vertinamas betono apsauginis sluoksnis, tačiau teorinių skaičiavimų ir eksperimentinių rezultatų nesutapimas yra didelis. Iš 3.22-3.25 paveikslų

matyti, kad visais atvejais minėtos formulės labiau taikytinos įprastajam gelžbetoniui – būtent tokiam jos ir buvo kurtos. Taip pat akivaizdu, jog, artėjant prie P_y , rezultatų tikslumas mažėja.

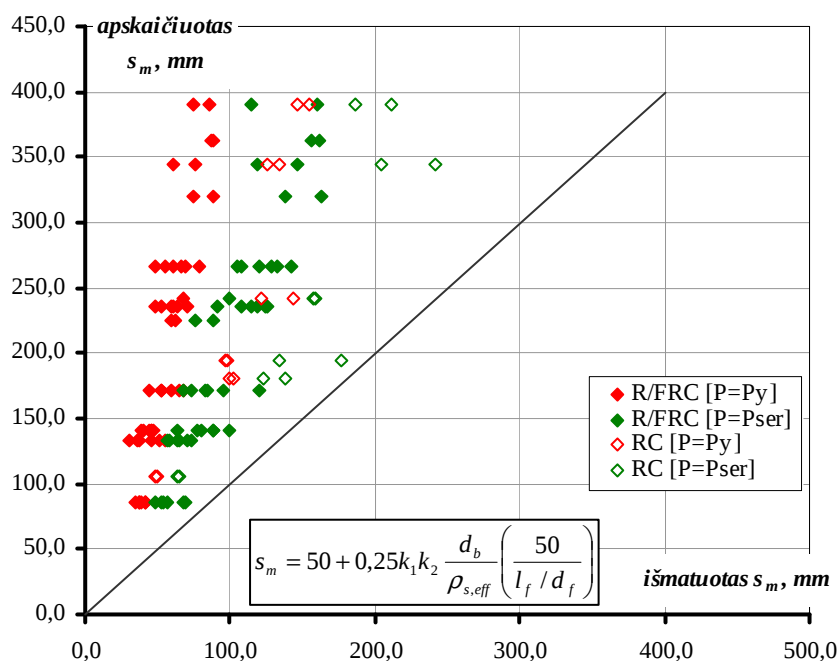


3.24 pav. Išmatuotų ir pagal ENV 1992-1-1:1991 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$



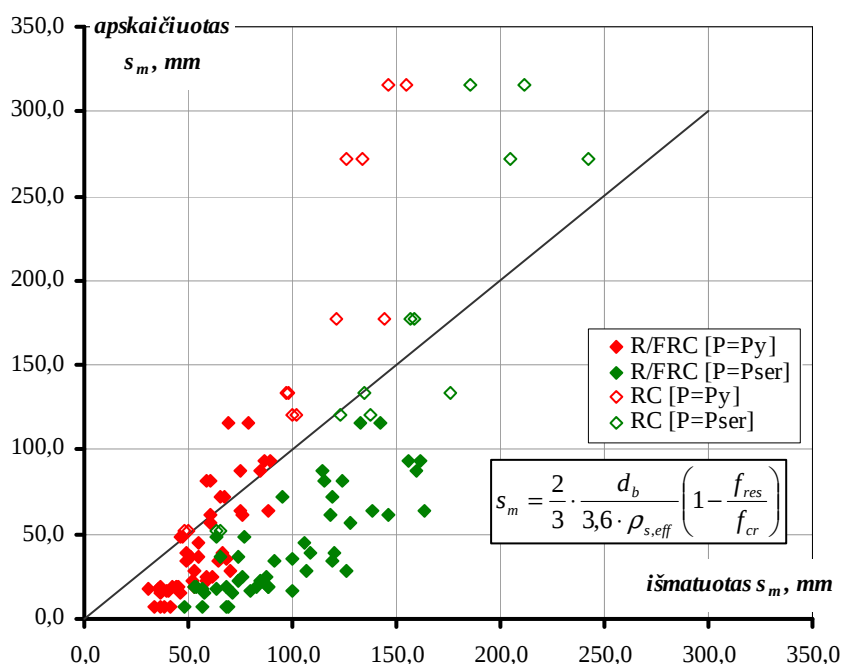
3.25 pav. Išmatuotų ir pagal ENV 1992-1-1:2003 modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$

Toliau analizuojami plieno plaušu armuotam gelžbetoniui skirti pleišėjimo modeliai. Pirmasis iš jų – pasiūlytas Duponto ir Vandwalle'o (2003). Tai modifikuota ENV 1992-1-1:1991 formulė, kurioje papildomai įvertinami fibrų geometriniai parametrai. Ją analizavo ir Deluce'as, siūlydamas naująjį modelį. Iš 3.26 pav. matyti, kad vidutinio atstumo tarp plyšių reikšmės s_m , kai apkrova $P=P_{ser}$ yra artimesnės skaičiavimams, atliktiems pagal (1.28) išraišką, nei tos, kai apkrova P pasiekia P_y . Taip pat galima teigti, kad, taikant minėtąjį modelį, tikslesni rezultatai vis dėlto gaunami įprastojo gelžbetonio bandiniams.

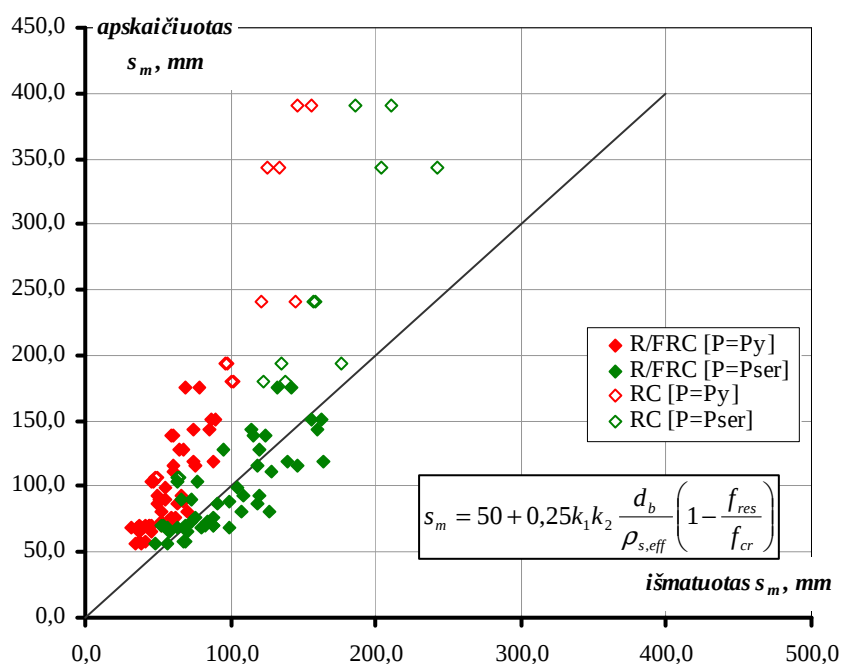


3.26 pav. Išmatuotų ir pagal Rilem TC 162-TDF (Dupont, Vandewalle 2003) modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$ (pagal Deluce *et al.*, 2014)

Tarpusavyje lyginant dvi Moffatto pasiūlytas (2001) alternatyvias formules – (1.29) ir (1.30) – matyti, kad ENV 1992-1-1:2003 modelio modifikacija, kurioje vertinami liekamieji betono įtempiai f_{res} , yra pakankamai tiksli ir taikytina tik plieno plaušu armuotam gelžbetoniui (žr. 3.27 ir 3.28 pav.). Kadangi betono tempiamasis stipris f_{cr} ir liekamieji įtempiai f_{res} buvo nustatyti Deluce'o atliktos eksperimentinės programos metu (2011), galima teigti, kad pastaroji Moffatto siūloma formulė adekvačiai įvertina vidutinį atstumą tarp plyšių. Tačiau Deluce'as skaičiavimus lygindamas su s_m reikšmėmis, kai apkrova $P=P_y$, teigė priešingai (Deluce *et al.* 2014). Vienintelis šio Moffatto modelio trūkumas – sudėtingas minėtų betono charakteristikų nustatymas. Iš 3.27 pav. matyti, kad CEB-FIP 1990 modifikacija tinkamai vertina tik yrančių konstrukcijų pleišėjimą (kai apkrova $P=P_y$). Dėl 3.2 poskyryje aptartų priežasčių šis modelis nėra taikytinas.



3.27 pav. Išmatuotų ir pagal Moffatto pasiūlytą modelį (CEB-FIP 1990) apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$

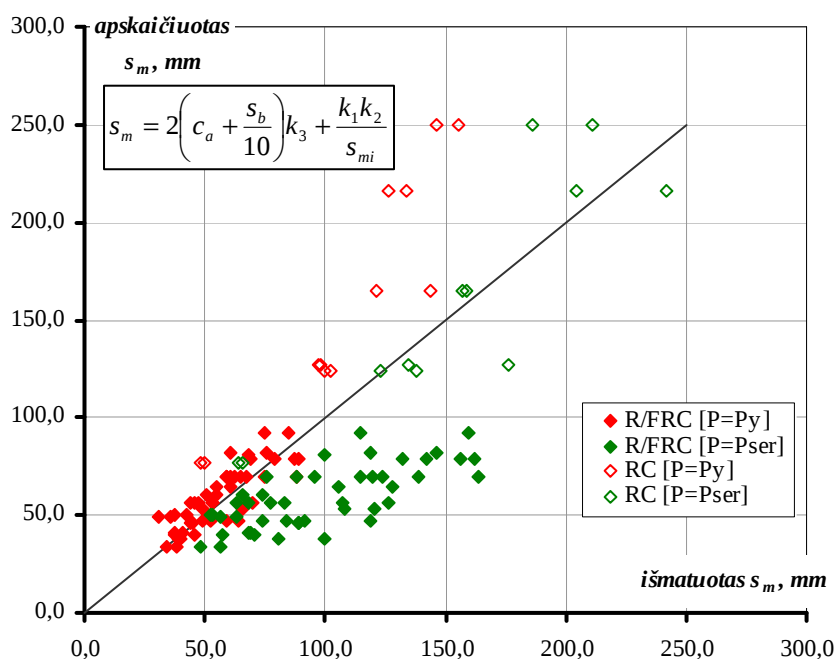


3.28 pav. Išmatuotų ir pagal Moffatto pasiūlytą modelį (ENV 1992-1-1:2003) apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$
(pagal Deluce *et al.*, 2014)

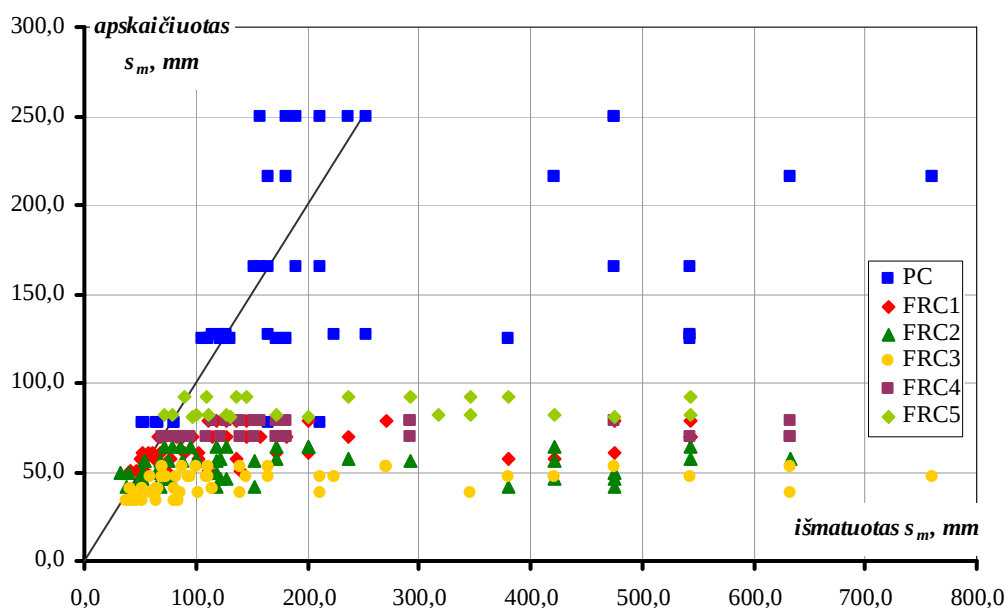
Toliau analizuojamas vienas iš naujausių, 2014 m. pradžioje *ACI Structural Journal* publikuotas Deluce'o ir Vecchio atstumo tarp plyšių skaičiavimo modelis (Deluce *et al.* 2014). Iš 3.29 paveikslo matyti, kad tyrėjai naujosios (1.31) formulės adekvatumą įrodinėjo teoriškai apskaičiuotas s_m reikšmes lygindami su išmatuotomis jau pasireiškus

armatūros takumui. Rengiant baigiamąjį darbą šie, kaip ir visų anksčiau aptartų modelių, skaičiavimai lyginti su eksperimentiniais rezultatais, kai apkrova $P=P_{ser}$. 3.29 pav. leidžia teigti, kad tempiamųjų dar nesuirusių plieno plaušu armuotų gelžbetoninių prizmių vidutiniam atstumui tarp plyšių skaičiuoti minėtas modelis nėra tinkamas. Jis gali būti taikomas tik įprastojo betono elementams (RC).

Tam, kad būtų galima išsamiau vertinti siūlomos formulės rezultatų tikslumą, teorinių ir eksperimentinių s_m palyginimas atliktas visų 59 bandinių visoms apkrovimo stadijoms, t.y. nuo pirmojo plyšio atsiradimo iki bandomo elemento suirimo. Rezultatai pateikiami 3.30 paveiksle, kuriame matyti didelė jų sklaida. Ir tik nedidelę dalį s_m reikšmių galima vertinti kaip apskaičiuotas teisingai, tačiau, tarpusavyje palyginus 3.29 pav. ir 3.30 pav. pateikiamus grafikus, matyti, kad jos gautos, kai armatūra pradeda tekėti (t.y. $P=P_y$). Todėl daroma išvada, kad naujsasis modelis nėra toks tikslus ir plačiai taikytinas, kaip tai teigė patys autoriai (Deluce *et al.* 2014).



3.29 pav. Išmatuotų ir pagal Deluce'o pasiūlytą modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas, kai apkrova $P=P_y$ ir $P=P_{ser}$ (pagal Deluce *et al.*, 2014)



3.30 pav. Išmatuotų ir pagal Deluce'o pasiūlytą modelį apskaičiuotų vidutinių atstumų tarp plyšių s_m palyginimas visoms apkrovimo stadijoms

Turint išsamios Deluce'o atliktos eksperimentinės programos rezultatus (Deluce 2011), šiame poskyryje išanalizuotos populiariausios literatūroje pateikiamos formulės, skirtos vidutiniam atstumui tarp plyšių skaičiuoti (keturios skirtos įprastajam gelžbetoniui (RC) ir keturios plieno plaušu armuotiems elementams (SFRC)). Atlikus teorinių skaičiavimų ir eksperimentinių s_m reikšmių palyginimą (žr. 3.22-3.29 pav.). matyti akivaizdus skirtumas tarp bandinių pleišėjimo, kai apkrova $P=P_{ser}$ ir $P=P_y$. Geriausiai atstumus tarp plyšių plieno plaušu armuotiems elementams įvertina Moffatto pasiūlyta ENV 1992-1-1:2003 formulės modifikacija (2001) (žr. 3.28 pav.). Tačiau, norint gauti tikslius rezultatus, būtina žinoti tempiamąjį stiprį f_{cr} ir liekamuosius įtempius f_{res} .

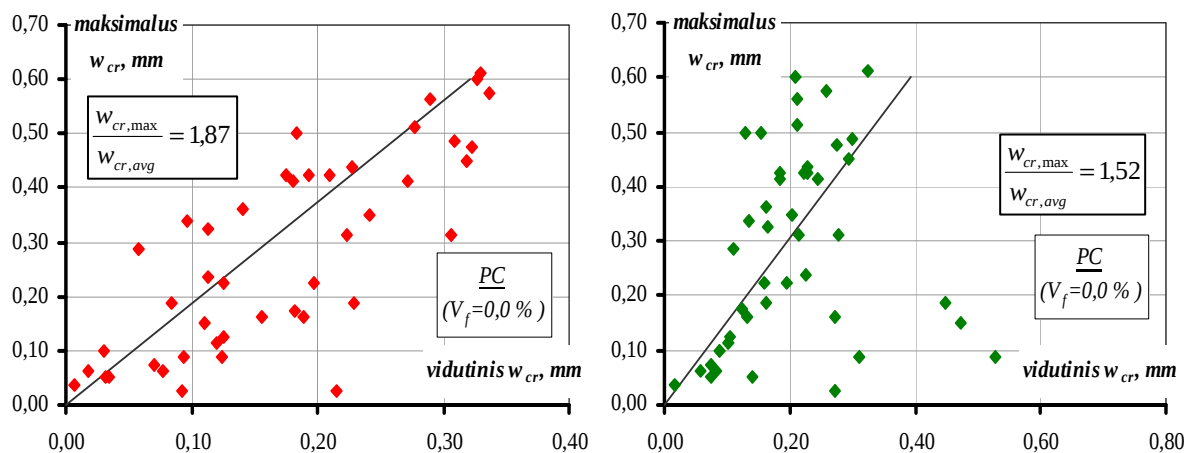
3.3. Plyšio pločio skaičiavimų analizė

Šiame poskyryje analizuojama kita svarbi pleišėjimo charakteristika – maksimalus plyšio plotis $w_{cr,max}$. Konstrukciniai elementai, veikiami išskirstytos apkrovos, suyra silpniausiam pjūvyje, kuris paprastai atitinka didžiausio plyšio vietą. Todėl tai svarbus parametras norint nustatyti ne tik tinkamumo ribinį būvį, bet ir laikomąją galią.

Rengiant baigiamąjį darbą, remiantis Deluce'o eksperimentinės programos duomenimis (2011), atlikti teoriniai skaičiavimai, kurie vėliau palyginti su bandymų rezultatais. Tiek vidutinis ($w_{cr,avg}$), tiek maksimalus plyšio plotis ($w_{cr,max}$) buvo skaičiuojamas visoms 59 išbandytoms gelžbetoninėms prizmėms (12 įprastojo betono ir 47 armuotos plieno plaušu). Dėmesys buvo skiriamas naujausiam, 2014 m. pradžioje *ACI Structural Journal*

publikuotam Deluce'o ir Vecchio pleišėjimo modeliui (Deluce *et al.* 2014). Analizė atlikta remiantis 1.4.2 skyrelyje pateikiamomis (1.36) ir (1.37) formulėmis.

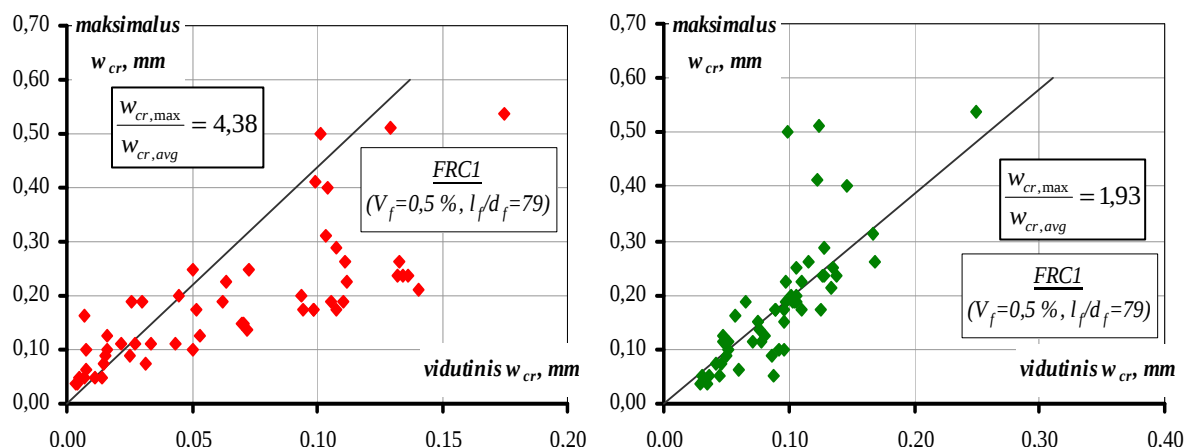
Vidutinis plyšio plotis minėtoje publikacijoje buvo skaičiuotas pagal klasikinę išraišką kaip vidutinio atstumo tarp plyšių s_m ir vidutinės tempimo deformacijos $\varepsilon_{t,avg}$ sandauga (žr. (1.36) išraišką). Tačiau, rengiant baigiamąjį darbą, pastebėtas dar vienas realios konstrukcijų elgsenos neatitinkantis faktas, kuriuo remdamasis Deluce'as su kolegomis pagrindė naująjį pleišėjimo modelį (Deluce *et al.* 2014). Skaičiuodami vidutinį plyšių plotį $w_{cr,avg}$, mokslininkai visoms apkrovimo stadijoms taikė nekintamą atstumo tarp plyšių reikšmę s_m . Žiūrint į C priede pateiktus C.1-C.30 paveikslus, akivaizdu, kad nuo pirmojo plyšio atsiradimo iki bandinio suirimo šis dydis sumažėja kelis kartus. Todėl galima teigti, kad, norint nustatyti vidutinį plyšio plotį tam tikru laiko momentu, reikia tuo pat momentu išmatuotą deformaciją dauginėti iš faktinio atstumo tarp plyšių. Kitaip tariant, didėjant deformacijai, s_m turi mažėti. Būtent tokių ir pagal Deluce'ą atliktų skaičiavimų rezultatų palyginimas su maksimaliais išmatuotais plyšio pločiais visoms apkrovimo stadijoms pateikiamas 3.31-3.36 paveiksluose. Kiekvienas iš jų skirtas vis kitam betono mišiniui. Akivaizdu, kad, patikslinus skaičiavimus, plieno plaušu armuotam betonui santykis $w_{cr,max}/w_{cr,avg}$ visais atvejais sumažėja daugiau nei du kartus. Įprastajam gelžbetoniui šis pokytis ne toks didelis.



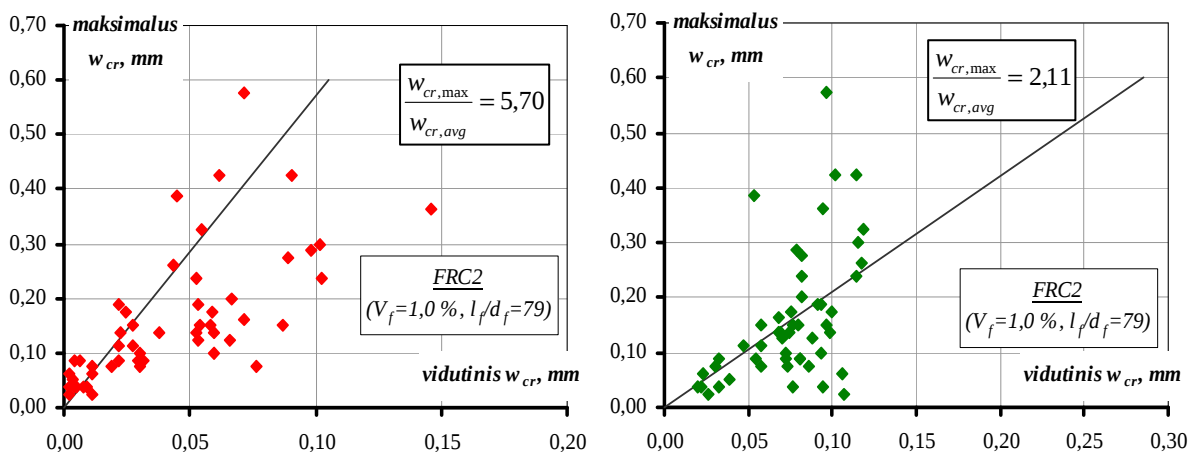
3.31 pav. PC bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas:

kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą

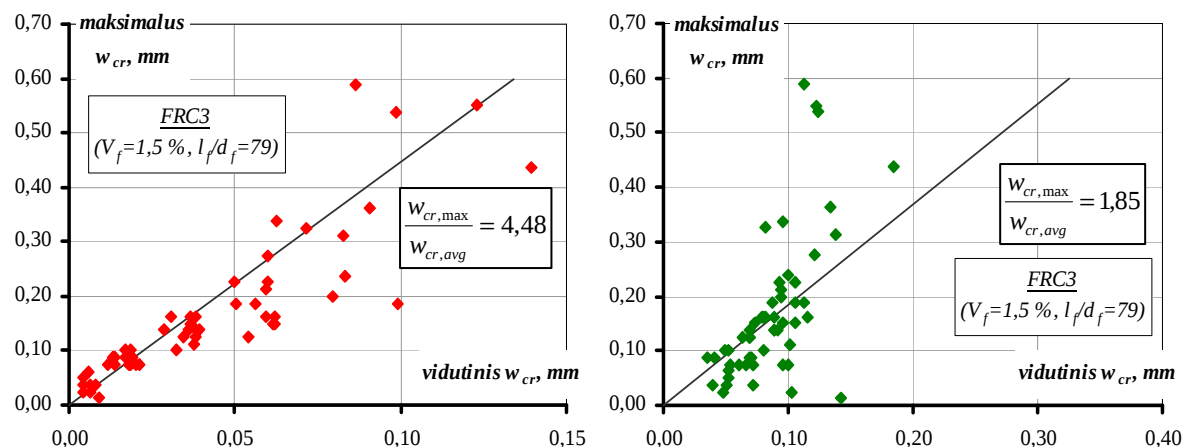
(pagal Deluce *et al.*, 2014)



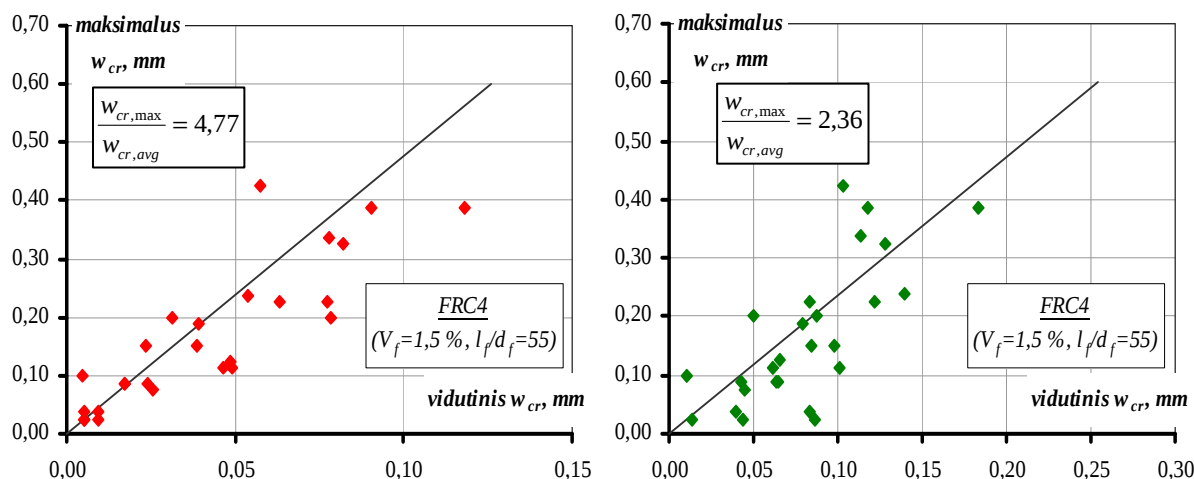
3.32 pav. FRC1 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce *et al.*, 2014)



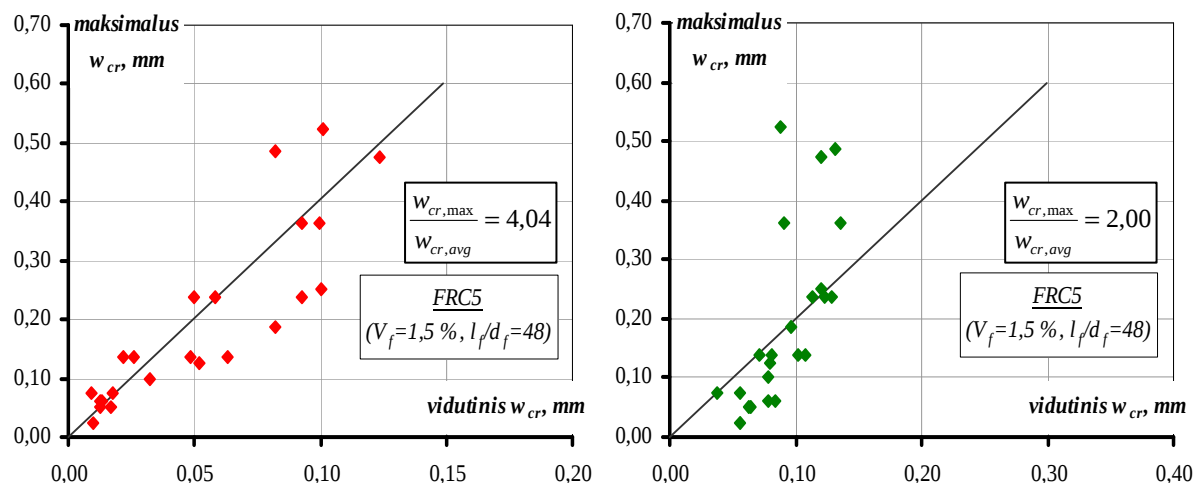
3.33 pav. FRC2 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce *et al.*, 2014)



3.34 pav. FRC3 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce *et al.*, 2014)

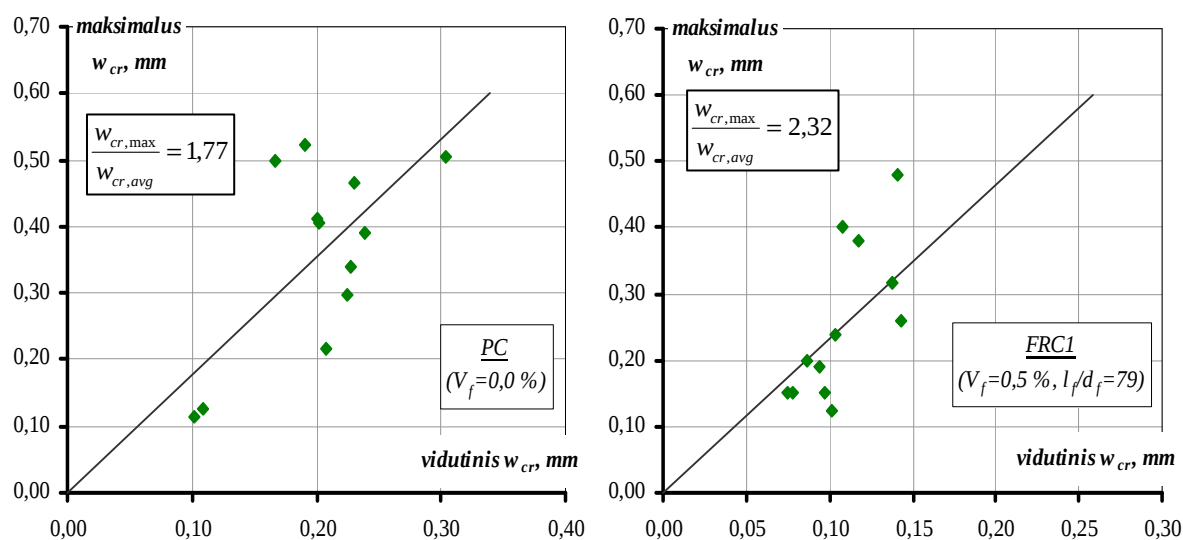


3.35 pav. FRC4 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce *et al.*, 2014)

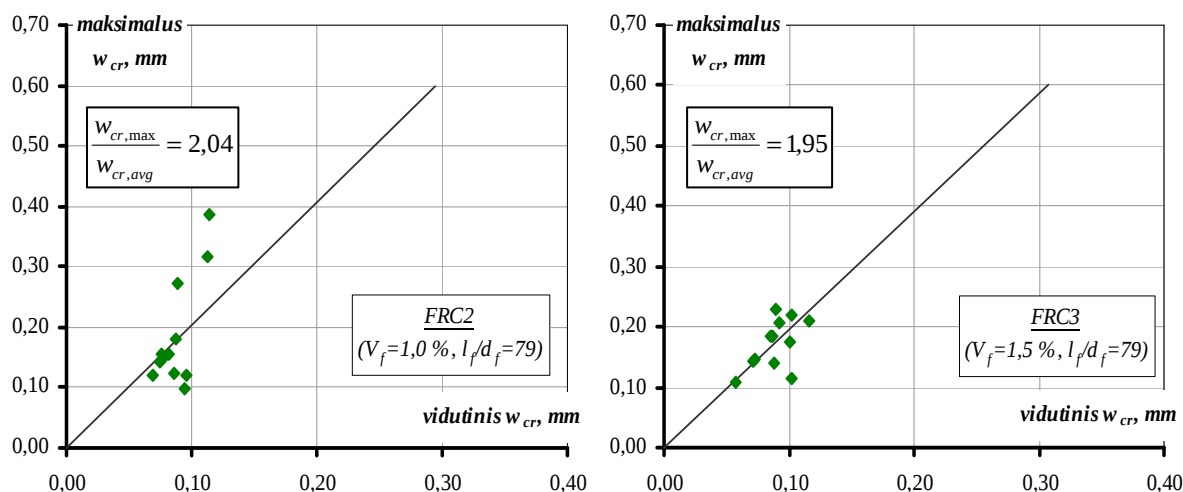


3.36 pav. FRC5 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas: kairėje pusėje w_{cr} apskaičiuoti Deluce'o, dešinėje – nustatyti rengiant baigiamąjį darbą (pagal Deluce *et al.*, 2014)

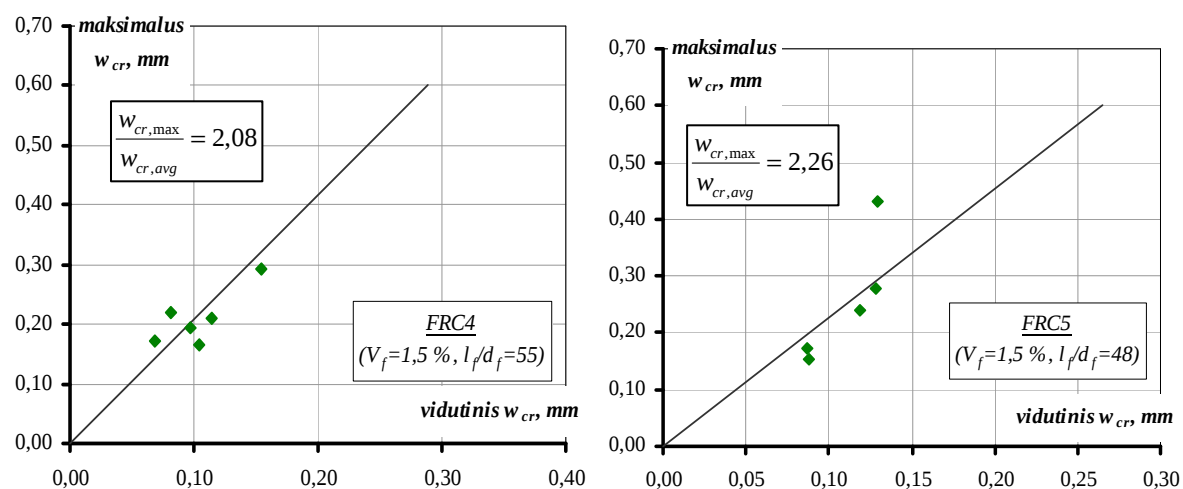
Laikantis anksčiau aptarto principo, tempiamųjų gelžbetoninių prizmių pleišėjimas analizuojamas apkrovai P pasiekus P_{ser} reikšmę (kai įtempiai armatūroje pasiekia 300 MPa). 3.37-3.39 paveiksluose pateikiamas apskaičiuotų $w_{cr,avg}$ ir bandymų metu išmatuotų $w_{cr,max}$ plyšių pločių palyginimas esant minėtai arovimo stadijai. Galima pastebėti, kad įprastajam gelžbetoniui santykis $w_{cr,max}/w_{cr,avg}=1,77$ yra labai artimas Collinso ir Mitchello (1993) deklaruotai reikšmei – 1,7. Plieno plaušu armuotam betonui šis santykis kinta nuo 1,95 iki 2,32.



3.37 pav. PC ir FRC1 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$

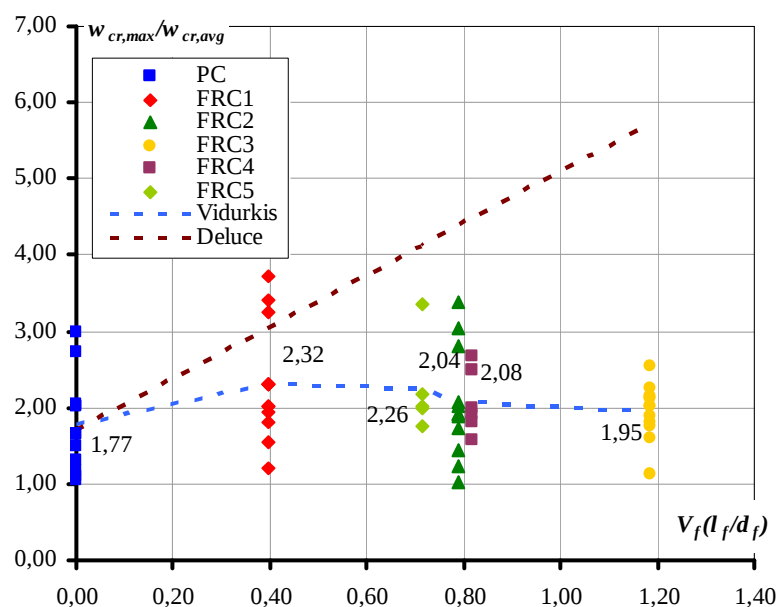


3.38 pav. FRC2 ir FRC3 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$



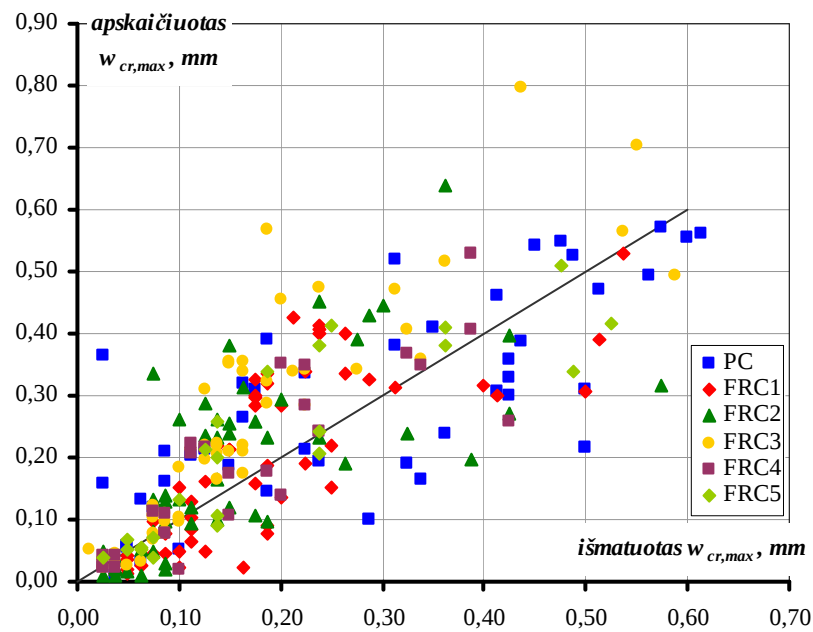
3.39 pav. FRC4 ir FRC5 bandinių maksimalių išmatuotų ir vidutinių apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$

Deluce'o ir Vecchio (Deluce *et al.* 2014) pateikiamoje empirinėje (1.37) formulėje vidutinis ir maksimalus plyšio pločiai susiejami tiesiškai kintančiu santykiu, kuris įvertina plieno plaušo kiekį betone ir fibrų geometrines charakteristikas. 3.40 paveiksle aiškiai matyti, kad šis santykis minėtoje tyrėjų publikacijoje nustatytas neteisingai. Taip atsitiko dėl to, kad anksčiau aptartuose $w_{cr,avg}$ skaičiavimuose mokslininkai naudojo realios situacijos neatitinkančią nekintamą s_m reikšmę visoms pleišėjimo stadijoms.

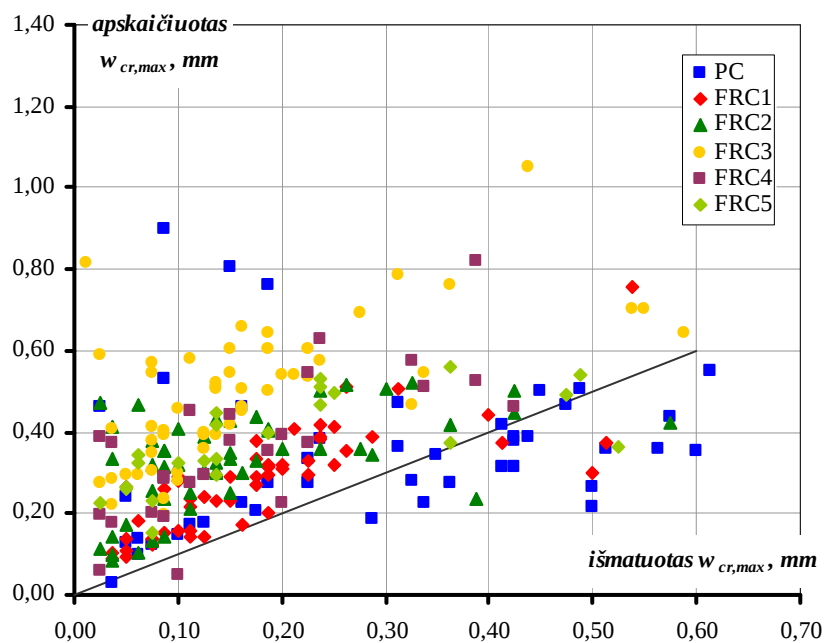


3.40 pav. Maksimalaus ir vidutinio plyšių pločių santykio ($w_{cr,max}/w_{cr,avg}$) ir plieno plaušo indekso ($V_f(l_f/d_f)$) priklausomybė

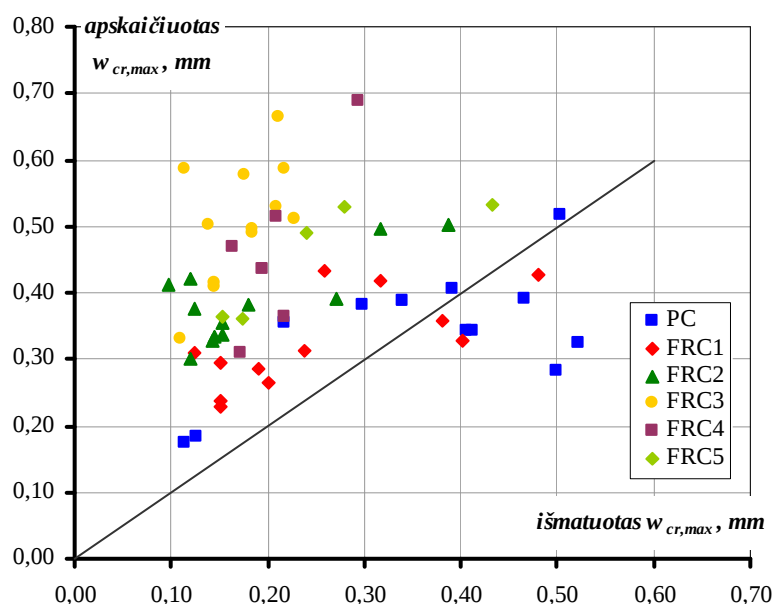
Remdamiesi neteisingai apskaičiuotu $w_{cr,avg}$ (tai įrodyta šio poskyrio pradžioje) ir dėl to klaidingai nustatytu santykiu $w_{cr,max}/w_{cr,avg}$, Deluce'as ir Vecchio pagrindė naująjį *ACI Structural Journal* publikuotą modelį (žr. 3.41 pav.). Iš 3.41 paveikslo, kuriame lyginami teoriškai pagal (1.37) išraišką apskaičiuoti ir eksperimentiškai nustatyti maksimalūs plyšių pločiai, matyti, kad naujoji siūloma formulė turėtų tikti visiems betono mišiniams. Tačiau, rengiant baigiamąjį darbą, vidutinius plyšių pločius $w_{cr,avg}$ apskaičiavus taip, kaip tai aprašyta anksčiau šiame poskyryje, ir pritaikius (1.37) formulę, nustatyta daug didesnė gaunamų rezultatų sklaida (žr. 3.42 pav.). 3.43 paveiksle išskirtas plyšių pločių $w_{cr,max}$ palyginimas, kai apkrova $P=P_{ser}$, tik patvirtina pastarąjį teiginį.



3.41 pav. Maksimalių išmatuotų ir Deluce'o apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas
(pagal Deluce *et al.*, 2014)



3.42 pav. Maksimalių išmatuotų ir, rengiant baigiamąjį darbą, pagal Deluce'o pasiūlytą modelį (2014)
apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas



3.43 pav. Maksimalių išmatuotų ir, rengiant baigiamąjį darbą, pagal Deluce'o pasiūlytą modelį (2014) apskaičiuotų plyšių pločių w_{cr} palyginimas, kai apkrova $P = P_{ser}$

3.5. Skyriaus išvados

Sudarius tempiamųjų gelžbetoninių elementų apkrovos ir deformacijų diagramas ($P - \varepsilon$), nustatytos betono tempimo įtempių ir deformacijų priklausomybės ($\sigma_{ct} - \varepsilon$), leidžiančios teigti, kad plieno plaušu armuotas supleišėjęs betonas geba perimti dalį tempimo jėgos. Identiškų bandinių kreivių sutapimas, rodo atliktų eksperimentų kokybę.

Elementų, pagamintų iš vienodo dispersiškai armuoto betono mišinio, vidutiniai tempiamojo betono įtempiai didėja, augant armavimo koeficientui, t.y. mažėjant atstumui tarp plyšių.

Skaičiavimai pagal aštuonis skirtingus modelius parodė, kad tiksliausiai atstumus tarp plyšių plieno plaušu armuotiems elementams įvertina Moffatto pasiūlyta ENV 1992-1-1:2003 formulės modifikacija, pagrįsta betono tempiamuoju stipriu f_{ct} ir liekamaisiais įtempiais f_{res} , kurių nustatymas išlieka vienu pagrindinių uždavinių tolesniems tyrimams.

Stabili pleišėjimo stadija nėra pasiekama net iki armatūros takumo ribos. Nauji plyšiai atsiveria ir tekant armatūrai, tokiu būdu labai sumažėja vidutiniai atstumai tarp plyšių.

Nagrinėjamų eksperimentinių tyrimų autorių Deluce'o ir Vecchio pasiūlytas atstumo tarp plyšių modelis yra klaidingas, nes plaušo įtaką įvertinantis daugiklis nustatytas apkrovai, viršijančiai takumo ribą, tuo tarpu bazinis modelis CEB-FIP 1978 buvo sukurtas norminei apkrovai, kai armatūros įtempiai pasiekia apie 300 MPa. Dėl tos pačios priežasties maksimalaus plyšių pločio modelis taip pat yra klaidingas.

Nustatyta, kad maksimalaus ir vidutinio plyšių pločio santykis $w_{cr,max}/w_{cr,avg}$ dispersiškai armuotam betonui nepriklauso nuo plieno plaušo indekso $V_f/(l_f/d_f)$ ir apytiksliai yra lygus 2,0.

Nėra teisinga tempiamųjų elementų vidutinės deformacijas nustatyti betono paviršiuje, kaip tai buvo daroma Deluce'o atliktuose eksperimentiniuose tyrimuose. Todėl gautąsias tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų priklausomybes reikėtų vertinti kokybiniu (pagal kreivių charakterį), o ne kiekybiniu požiūriu. Ateities eksperimentiniuose tyrimuose tempiamųjų išilginiu strypų armuotų elementų vidutinės deformacijos turėtų būti nustatomos pagal armatūros taškų poslinkius elemento galuose.

BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Atlikus literatūros analizę, galima teigti, kad dispersiškai armuotų konstrukcijų pleišėjimo modeliai yra paremti įprastojo gelžbetonio modeliais, įvedant papildomą daugiklį, kuris įvertina plieno plaušo įtaką. Įvairiuose modeliuose šis daugiklis gali priklausyti nuo fibrų geometrijos, fibrų tūrio dalies, perimamų liekamųjų įtempių ir kt.

Tiek literatūros apžvalga, tiek eksperimentinių tyrimų analizė parodė, kad net minimalus armavimas plieno plaušu (0,5 % pagal tūrį) pastebimai pagerina tempiamųjų elementų stiprumo, atsparumo pleišėjimui ir ypač deformacinės savybės.

Betono tempiamasis stipris f_{ct} , nustatytas tiesioginio tempimo bandymu, yra apie 1,6 karto mažesnis nei tempiamasis stipris lenkiant, gautas pagal Rilem TC 162 ir ASTM C 1609 metodikas.

Skaiciavimai pagal aštuonis skirtingus modelius parodė, kad tiksliausiai atstumus tarp plyšių plieno plaušu armuotiems elementams įvertina Moffatto pasiūlyta ENV 1992-1-1:2003 formulės modifikacija, pagrįsta betono tempiamuoju stipriu f_{ct} ir liekamaisiais įtempiais f_{res} , kurių nustatymas išlieka vienu pagrindinių uždavinių tolesniems tyrimams.

Elementų, pagamintų iš vienodo dispersiškai armuoto betono mišinio, vidutiniai tempiamojo betono įtempiai didėja, augant armavimo koeficientui, t.y. mažėjant atstumui tarp plyšių.

Stabili pleišėjimo stadija nėra pasiekama net iki armatūros takumo ribos. Nauji plyšiai atsiveria ir tekant armatūrai, tokiu būdu labai sumažėja vidutiniai atstumai tarp plyšių.

Nagrinėjamų eksperimentinių tyrimų autorių Deluce'o ir Vecchio pasiūlytas atstumo tarp plyšių modelis yra klaidingas, nes plaušo įtaką įvertinantis daugiklis nustatytas apkrovai, viršijančiai takumo ribą, tuo tarpu bazinis modelis CEB-FIP 1978 buvo sukurtas norminei apkrovai, kai armatūros įtempiai pasiekia apie 300 MPa. Dėl tos pačios priežasties maksimalaus plyšių pločio modelis taip pat yra klaidingas.

Nustatyta, kad maksimalaus ir vidutinio plyšių pločio santykis $w_{cr,max}/w_{cr,avg}$ dispersiškai armuotam betonui nepriklauso nuo plieno plaušo indekso $V_f/(l_f/d_f)$ ir apytiksliai yra lygus 2,0.

Nėra teisinga tempiamųjų elementų vidutinės deformacijas nustatyti betono paviršiuje, kaip tai buvo daroma Deluce'o atliktuose eksperimentiniuose tyrimuose. Todėl gautąsias tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų priklausomybes reikėtų vertinti kokybiniu (pagal kreivių charakterį), o ne kiekybiniu požiūriu. Ateities eksperimentiniuose tyrimuose tempiamųjų armuotų elementų vidutinės deformacijos turėtų būti nustatomos pagal armatūros taškų poslinkius elemento galuose.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Abrishami, H. H.; Mitchell, D. 1997. “Influence of Steel Fibers on Tension Stiffening,” *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 6, pp. 769-776.
- Bischoff, P. H. 2001. “Effects of shrinkage on tension stiffening and cracking in reinforced concrete”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, pp. 363-374.
- CEB-FIP, 1978. “Model Code for Concrete Structures”, *CEB-FIP International Recommendations*, 3rd. ed., Comité Euro-International du Béton, Paris, 348 p.
- CEB-FIP, 1993. “Model Code 1990 (Design Code)” Comité Euro-International du Béton, Lausanne, 437 p.
- Chiaia, B.; Fantilli, A. P.; Vallini, P. 2009. “Evaluation of Crack Width in FRC Structures and Application to Tunnel Linings,” *Materials and Structures*, V. 42, No. 3, p. 339-351.
- Collins, M. P.; Mitchell, D. 1993. *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 766 p.
- Deluce, J. R. 2011. *Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Containing Conventional Steel Reinforcement*, MASc thesis, University of Toronto, Toronto, ON, Canada, 506 p.
- Deluce, J. R.; Vecchio, F. J. 2013. “Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement” *ACI Structural Journal*, V. 110, No. 3, pp. 481-490.
- Deluce, J. R.; Vecchio, F. J. 2014. “Crack Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement” *ACI Structural Journal*, V. 111, No. 9, pp. 93-103.
- Dupont, D.; Vandewalle, L. 2003. “Calculation of Crack Widths with the $\sigma - \varepsilon$ Method,” *Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: Background and Experiences — Proceedings of the RILEM TC162-TDF Workshop*, RILEM Technical Committee 162-TDF, Bochum, Germany, pp. 119-144.
- ENV 1992-1-1, 1991. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings”, 226 p.

- ENV 1992-1-1, 2003 “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules for buildings”, European Committee for Standardisation, 226 p.
- Grimaldi, A.; Luciano, R. 2000. “Tensile Stiffness And Strength Of Fiber-Reinforced Concrete”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48 (2000), p. 1987-2008.
- Henager, Charles H.; Doherty, Terrence J. 1976. Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams, *Proceedings*, ASCE, V12, ST-1, p. 177-188.
- Kaklauskas G.; Bačinskas D.; Gribniak V.; Jakubovskis R.; Ulbinas D.; Gudonis E.; Meškėnas A.; Timinskas E.; Sokolov A. 2012. *Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 300 p.
- Lee, S.-C.; Cho, J.-Y.; Vecchio, F. J. 2011. “Diverse Embedment Model for Fiber-Reinforced Concrete in Tension: Model Development,” *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 5, p. 516-525.
- Lee, S.-C.; Cho, J.-Y.; Vecchio, F. J. 2013. “Tension Stiffening Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Containing Conventional Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, V. 110, No. 4, p. 639-648.
- Moffatt, K. 2001. *Analyse de Dalles de Pont avec Armature Réduite et Béton de Fibres Metalliques*, MScA thesis, École Polytechnique de Montréal, Montreal, QC, Canada, 248 p.
- Naaman, A. E. 1972. *A Statistical Theory of Strength for Fiber Reinforced Concrete*, PhD thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 196 p.
- Naaman A. E. 2003. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. *RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 95-113.
- Shah, S. P.; Batson, G. B.; Editors 1987. *Fiber Reinforced Concrete-Properties and Applications*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 597 p.
- Soroushian, P.; Lee, C. 1990. “Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 5, p. 433-439.

- Stang, H.; Aarre, T. 1992. "Evaluation of Crack Width in FRC with Conventional Reinforcement," *Cement and Concrete Composites*, V. 14, No. 2, p. 143-154.
- Stang, H.; Li, V. C.; Krenchel, H. 1995. "Design and Structural Applications of Stress-Crack Width Relations in Fibre Reinforced Concrete," *Materials and Structures*, V. 28, No. 4, p. 210-219.
- Vecchio, F. J. 2000. "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 126, No. 9, p. 1070-1077.
- Vecchio, F. J.; Collins, M. P. 1986. "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," *ACI Journal*, V. 83, No. 2, p. 219-231.
- Voo, J. Y. L.; Foster, S. J. 2003. "Variable Engagement Model for Fibre Reinforced Concrete in Tension," *UNICIV Report* No. R-420, The University of New South Wales, Sydney, Australia, p. 1-86.

A priedas. J. R. Deluce'o atliktų eksperimentų duomenys

Šiame priede pateikiami J. R. Deluce'o atliktų, tempiamųjų išilgine armatūra armuotų prizmių bandymų duomenys (Deluce 2011). A.1 lentelėje matyti bandinių skerpjūvio matmenys, taip pat armavimo procentas, armatūros strypų tamprumo modulis bei stipris pagal takumo ribą. Čia pateikiami ir betoninių cilindų gniuždymo, kaulo formos bandinių tempimo ir laisvojo susitraukimo eksperimentiniai duomenys.

A.1 lentelė. Tempiamųjų plieno plaušu ir išilgine armatūra armuotų prizmių bandymų duomenys
(pagal Deluce, 2011)

Bandinio žymuo	b (mm)	d _b (mm)	ρ (%)	E _s (MPa)	f _y (MPa)	f _c (MPa)	E _c (MPa)	ε _{sh} (x10 ⁻³)	f _{ct} (MPa)	ε _{ct} (x10 ⁻³)
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
H-50/10-PC <1>	50	11,3	4,00	199000	442	92,6	38500	-0,31	3,57 ²	0,093 ³
H-50/10-PC <2>	50	11,3	4,00	199000	442	92,6	38500	-0,31	3,57 ²	0,093 ³
H-80/10-PC <1>	80	11,3	1,56	199000	442	92,6	38500	-0,31	3,57 ²	0,093 ³
H-80/10-PC <2>	80	11,3	1,56	199000	442	92,6	38500	-0,31	3,57 ²	0,093 ³
H-100/20-PC <1>	100	19,5	3,00	194000	456	92,1	38500 ¹	-0,31	3,56 ²	0,092 ³
H-100/20-PC <2>	100	19,5	3,00	194000	456	92,2	38500 ¹	-0,31	3,56 ²	0,092 ³
H-150/20-PC <1>	150	19,5	1,33	194000	456	92,6	38500 ¹	-0,38	3,57 ²	0,093 ³
H-150/20-PC <2>	150	19,5	1,33	194000	456	92,6	38500 ¹	-0,38	3,57 ²	0,093 ³
H-150/30-PC <1>	150	29,9	3,11	187000	376	92,6	38500	-0,31	3,57 ²	0,093 ³
H-150/30-PC <2>	150	29,9	3,11	187000	376	92,6	38500	-0,31	3,57 ²	0,093 ³
H-200/30-PC <1>	200	29,9	1,75	187000	376	95,0	38500 ¹	-0,30	3,60 ²	0,093 ³
H-200/30-PC <2>	200	29,9	1,75	187000	376	95,6	38500 ¹	-0,30	3,61 ²	0,094 ³
H-50/10-FRC1 <1>	50	11,3	4,00	199000	442	78,0	39200	-0,55	3,36 ²	0,086 ³
H-50/10-FRC1 <2>	50	11,3	4,00	199000	442	78,0	39200	-0,55	3,36 ²	0,086 ³
H-80/10-FRC1 <1>	80	11,3	1,56	199000	442	78,5	35500	-0,60	3,62	0,141
H-80/10-FRC1 <2>	80	11,3	1,56	199000	442	78,5	35500	-0,60	3,62	0,141
H-100/20-FRC1 <1>	100	19,5	3,00	194000	456	83,9	35500	-0,54	3,28	0,137
H-100/20-FRC1 <2>	100	19,5	3,00	194000	456	83,9	35500	-0,54	3,28	0,137
H-150/20-FRC1 <1>	150	19,5	1,33	194000	456	81,8	35500 ¹	-0,60	3,41 ²	0,096 ³
H-150/20-FRC1 <2>	150	19,5	1,33	194000	456	81,8	35500 ¹	-0,60	3,41 ²	0,096 ³
H-150/30-FRC1 <1>	150	29,9	3,11	187000	376	84,3	37600	-0,50	3,85	0,121
H-150/30-FRC1 <2>	150	29,9	3,11	187000	376	84,3	37600	-0,50	3,85	0,121
H-200/30-FRC1 <1>	200	29,9	1,75	187000	376	78,5	35500	-0,55	3,62	0,141
H-200/30-FRC1 <2>	200	29,9	1,75	187000	376	78,0	39200	-0,49	3,36 ²	0,086 ³
H-50/10-FRC2 <1>	50	11,3	4,00	199000	442	54,8	26200	-0,63	3,41	0,185
H-50/10-FRC2 <2>	50	11,3	4,00	199000	442	54,8	26200	-0,63	3,41	0,185
H-80/10-FRC2 <1>	80	11,3	1,56	199000	442	54,8	26200	-0,63	3,41	0,185
H-80/10-FRC2 <2>	80	11,3	1,56	199000	442	54,8	26200	-0,63	3,41	0,185
H-100/20-FRC2 <1>	100	19,5	3,00	194000	456	54,8	26200	-0,63	3,41	0,185
H-100/20-FRC2 <2>	100	19,5	3,00	194000	456	54,8	26200	-0,63	3,41	0,185
H-150/20-FRC2 <1>	150	19,5	1,33	194000	456	45,5	20000	-0,83	2,74 ²	0,137 ³
H-150/20-FRC2 <2>	150	19,5	1,33	194000	456	45,5	20000	-0,83	2,74 ²	0,137 ³
H-150/30-FRC2 <1>	150	29,9	3,11	187000	376	54,3	26400	-0,76	3,26	0,142
H-150/30-FRC2 <2>	150	29,9	3,11	187000	376	54,3	26400	-0,76	3,26	0,142
H-200/30-FRC2 <1>	200	29,9	1,75	187000	376	54,8	26200	-0,63	3,41	0,185
H-200/30-FRC2 <2>	200	29,9	1,75	187000	376	63,4	26200 ¹	-0,63	3,56	0,201

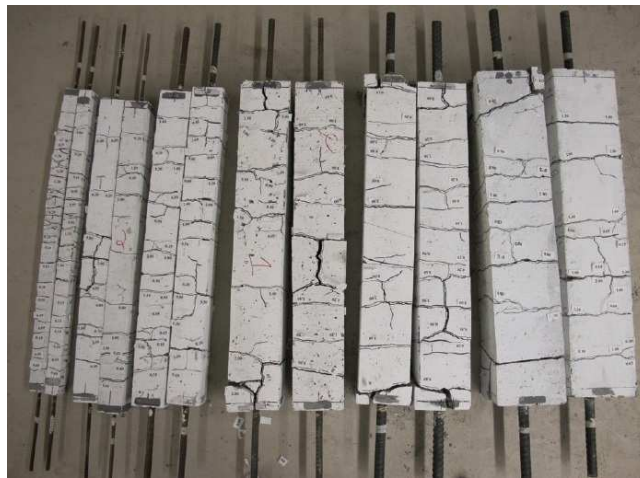
A.1 lentelės pabaiga

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
H-50/10-FRC3 <1>	50	11,3	4,00	199000	442	46,2	21200	-0,83	3,12	0,127
H-50/10-FRC3 <2>	50	11,3	4,00	199000	442	46,2	21200	-0,83	3,12	0,127
H-80/10-FRC3 <1>	80	11,3	1,56	199000	442	46,2	21200	-0,83	3,12	0,127
H-80/10-FRC3 <2>	80	11,3	1,56	199000	442	46,2	21200	-0,83	3,12	0,127
H-100/20-FRC3 <1>	100	19,5	3,00	194000	456	61,0	28000	-0,78	3,40	0,242
H-100/20-FRC3 <2>	100	19,5	3,00	188000	525	61,0	28000	-0,78	3,40	0,242
H-150/20-FRC3 <1>	150	19,5	1,33	194000	456	61,0	28000	-0,78	3,40	0,242
H-150/20-FRC3 <2>	150	19,5	1,33	194000	456	61,0	28000	-0,78	3,40	0,242
H-150/30-FRC3 <1>	150	29,9	3,11	187000	376	46,2	21200	-0,81	3,12	0,127
H-150/30-FRC3 <2>	150	29,9	3,11	187000	376	46,2	21200	-0,81	3,12	0,127
H-200/30-FRC3 <1>	200	29,9	1,75	187000	376	59,2	29900	-0,77	3,03 ²	0,101 ³
H-200/30-FRC3 <2>	200	29,9	1,75	187000	376	59,2	29900	-0,77	3,03 ²	0,101 ³
H-150/20-FRC4 <1>	150	19,5	1,33	188000	525	52,3	26700	-0,71	2,90	0,244
H-150/20-FRC4 <2>	150	19,5	1,33	188000	525	52,3	26700	-0,71	2,90	0,244
H-150/30-FRC4 <1>	150	29,9	3,11	187000	376	31,5	18000	-0,77	2,58	0,210
H-150/30-FRC4 <2>	150	29,9	3,11	187000	376	31,5	18000	-0,77	2,58	0,210
H-200/30-FRC4 <1>	200	29,9	1,75	187000	376	42,5	22300	-0,72	3,16	0,204
H-200/30-FRC4 <2>	200	29,9	1,75	187000	376	42,5	22300	-0,72	3,16	0,204
H-150/20-FRC5 <1>	150	19,5	1,33	188000	525	78,8	33700	-0,42	3,15	0,148
H-150/20-FRC5 <2>	150	19,5	1,33	188000	525	78,8	33700	-0,42	3,15	0,148
H-150/30-FRC5 <1>	150	29,9	3,11	187000	376	77,0	33700	-0,49	3,06	0,129
H-200/30-FRC5 <1>	200	29,9	1,75	187000	376	70,3	33700	-0,40	3,37	0,123
H-200/30-FRC5 <2>	200	29,9	1,75	187000	376	70,3	33700	-0,40	3,37	0,123

Pastabos.

1. Tais atvejais, kai nebuvo nustatytas betono tamprumo modulis E_c , skaičiavimams jis buvo parinktas toks pat kaip kitų tos pačios betonavimo partijos bandinių, atsižvelgiant į gniuždomąjį stiprį f_c .
2. Tais atvejais, kai nebuvo nustatytas betono tempiamasis stipris f_{ct} , jis buvo apskaičiuotas pagal ENV 1992-1-1:2003.
3. Tais atvejais, kai nebuvo nustatyta ribinė tempiamojo betono deformacija ε_{ct} , ji buvo apskaičiuota kaip tempiamojo betono stiprio f_{ct} ir tamprumo modulio E_c santykis.

Šiame priede taip pat pateikiamos išilginiu armatūros styryu armuotų, po tempimo bandymo supleišėjusių prizmių nuotraukos.



A.1 pav. PC ($V_f = 0,0 \%$) betono mišinio išilginiu armatūros styryu armuotos supleišėjusios prizmės
(Deluce 2011)



A.2 pav. FRC1 ($V_f = 0,5 \%$, $l_f/d_f = 79$) betono mišinio išilginiu armatūros styryu armuotos
supleišėjusios prizmės (Deluce 2011)



A.3 pav. FRC2 ($V_f = 1,0 \%$, $l_f/d_f = 79$) betono mišinio išilginiu armatūros styryu armuotos
supleišėjusios prizmės (Deluce 2011)



A.4 pav. FRC3 ($V_f = 1,5 \%$, $l/d_f = 79$) betono mišinio išilginiu armatūros styriu armuotos
supleišėjusios prizmės (Deluce 2011)



A.5 pav. FRC4 ($V_f = 1,5 \%$, $l/d_f = 55$) betono mišinio išilginiu armatūros styriu armuotos
supleišėjusios prizmės (Deluce 2011)

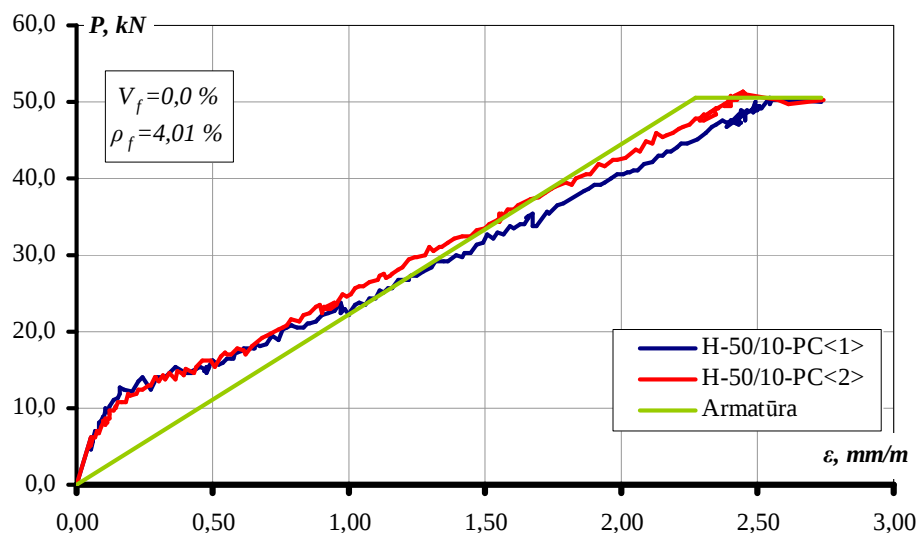


A.6 pav. FRC5 ($V_f = 1,5 \%$, $l/d_f = 48$) betono mišinio išilginiu armatūros styriu armuotos
supleišėjusios prizmės (Deluce 2011)

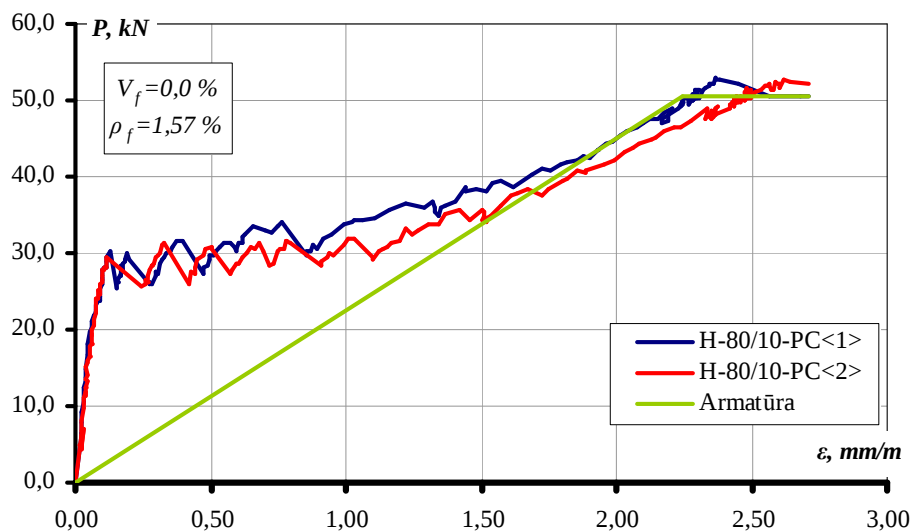
B.1 priedas. Tempiamųjų gelžbetoninių prizmių apkrovos ir deformacijos

priklausomybės

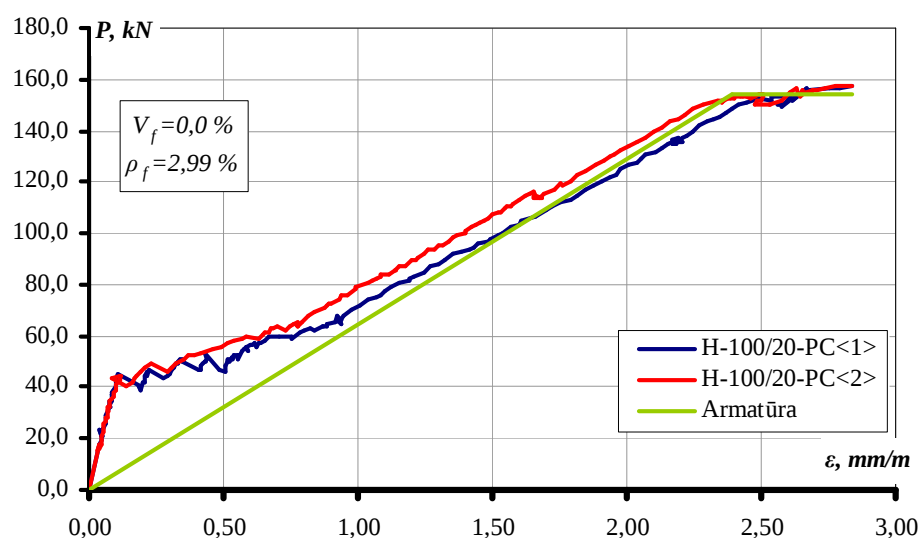
Šiame priede pateikiamos 3.2 poskyryje aprašytos, rengiant baigiamąjį darbą pagal Deluce'o atliktų eksperimentų rezultatus sudarytos tempiamųjų gelžbetoninių prizmių apkrovos ir deformacijos priklausomybės. Sudarinėjant šiuos grafikus, pagal 1.3 poskyryje aprašytą Bischoffo metodiką (2001), buvo įvertintas betono susitraukimas. Tam, kad būtų galima lengviau stebėti betono perimamą jėgą tempiamuose elementuose, grafikuose atidėta armatūros apkrovos ir deformacijos kreivė. Kiekviename paveiksle (išskyrus B.1.29 pav.) pateikiama po dvi kreives, kurios gautos apdorojant identiškų bandinių eksperimentinius duomenis. Šios kreivės vaizduojamos iki armatūros takumo pradžios arba bandymo pabaigos, jei tai įvyko anksčiau.



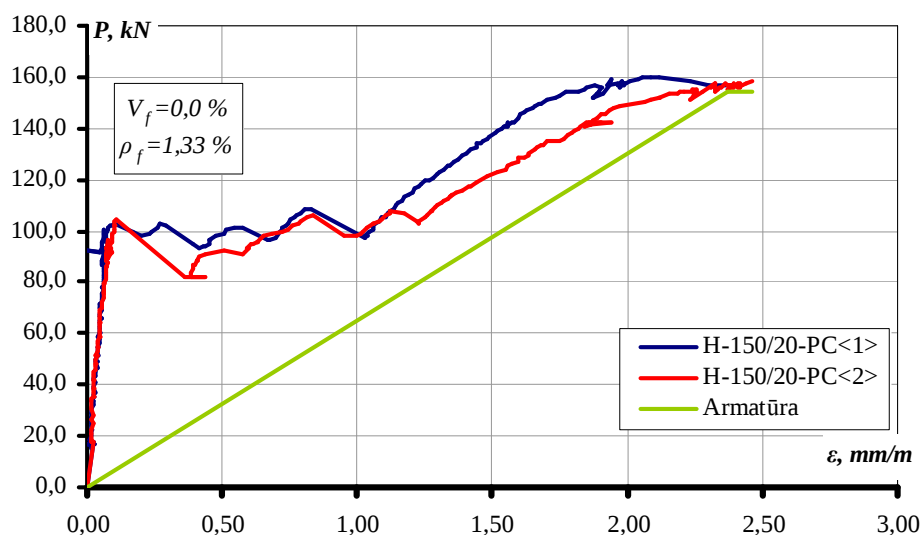
B.1.1 pav. H-50/10-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



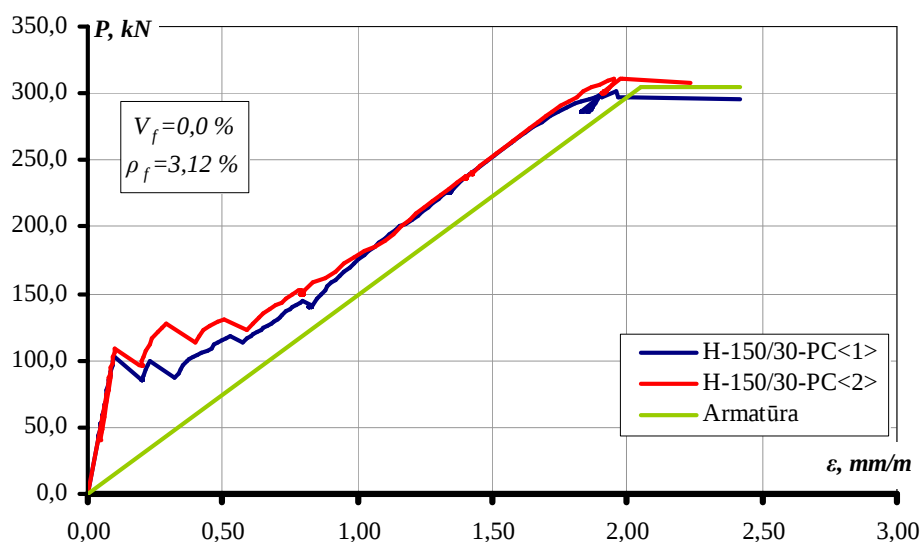
B.1.2 pav. H-80/10-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



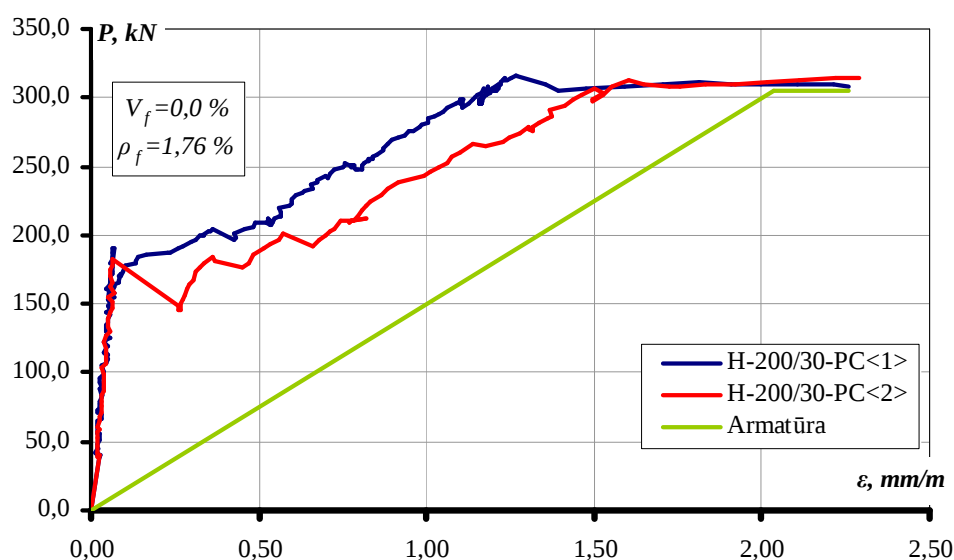
B.1.3 pav. H-100/20-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



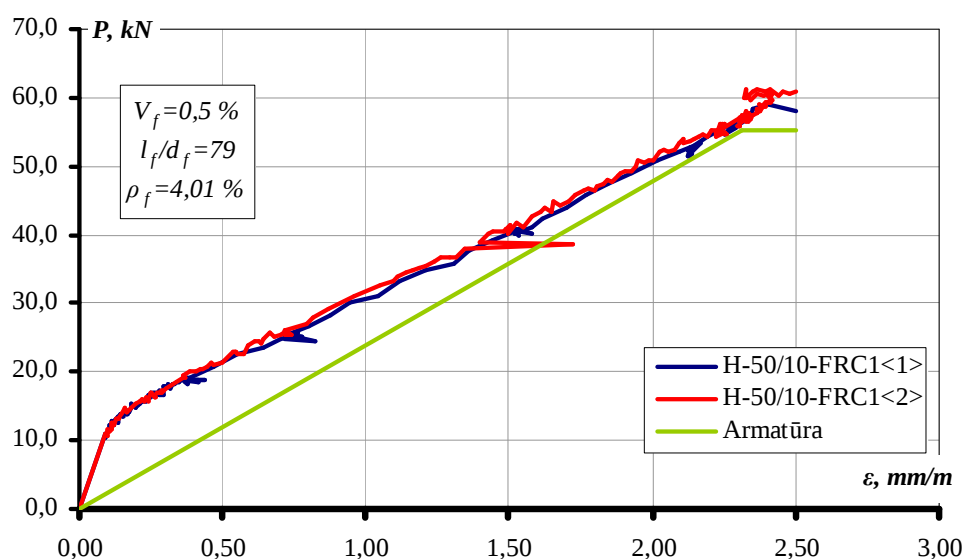
B.1.4 pav. H-150/20-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



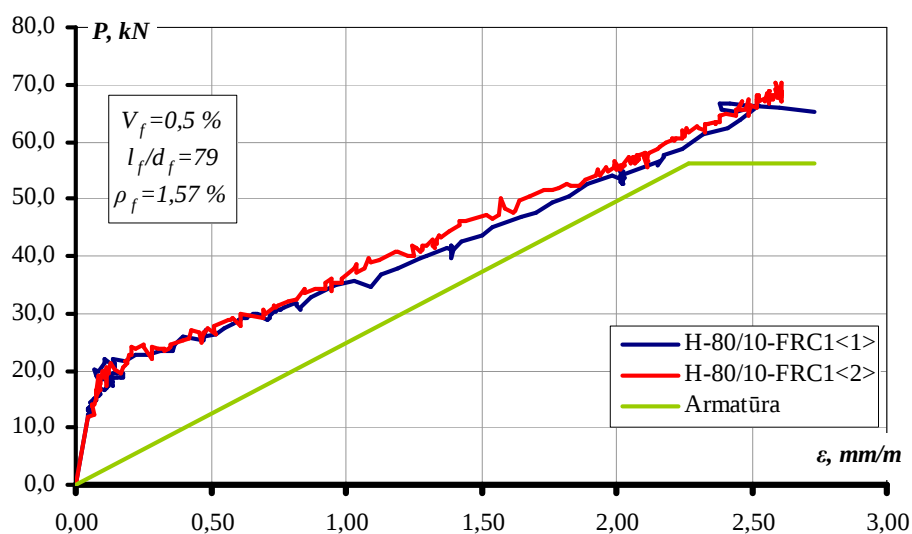
B.1.5 pav. H-150/30-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



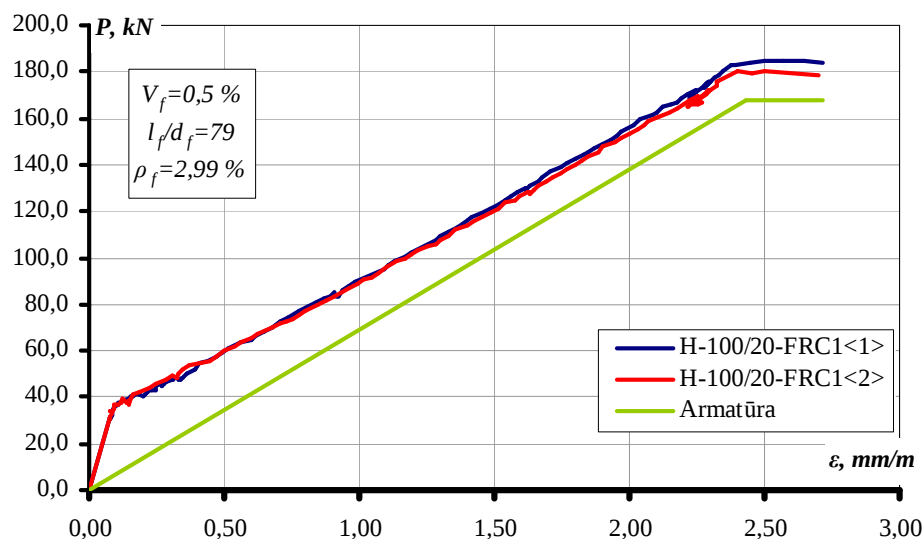
B.1.6 pav. H-200/30-PC bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



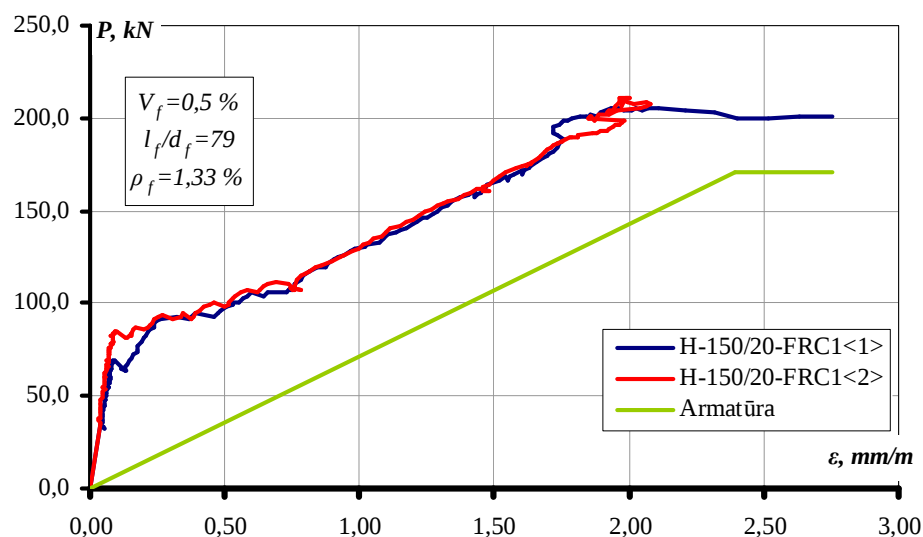
B.1.7 pav. H-50/10-FRC1 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



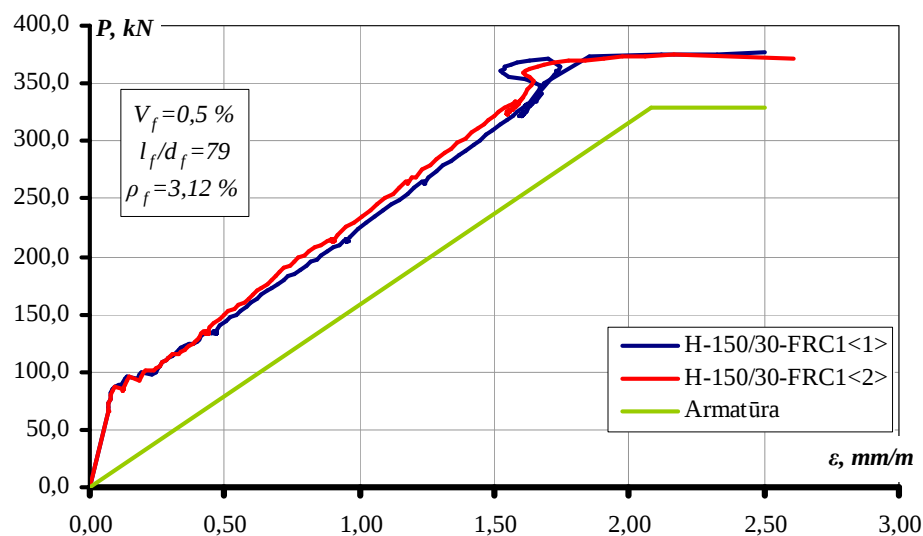
B.1.8 pav. H-80/10-FRC1 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



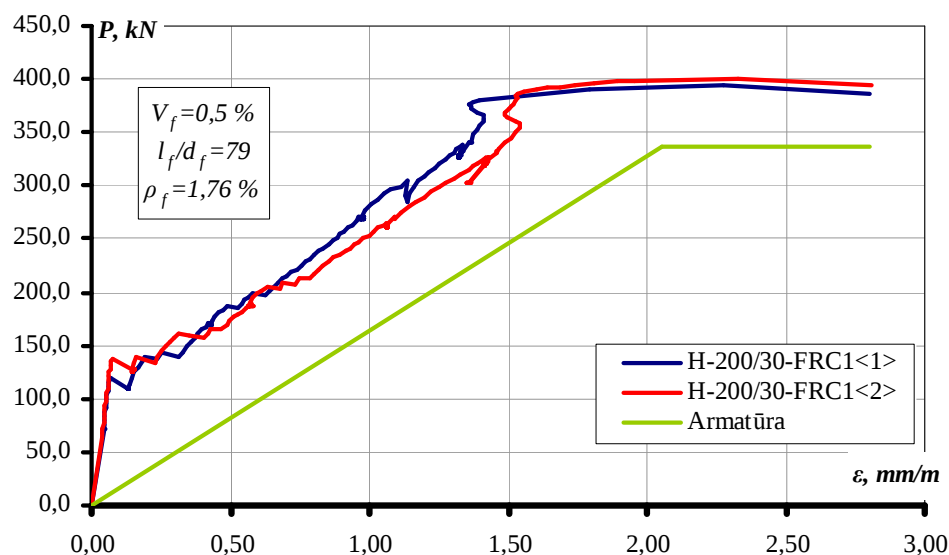
B.1.9 pav. H-100/20-FRC1 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



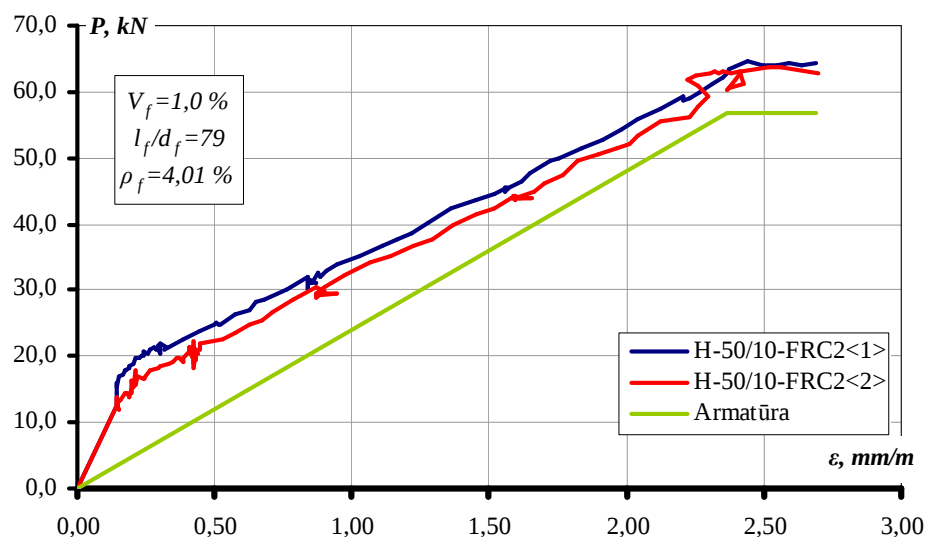
B.1.10 pav. H-150/20-FRC1 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



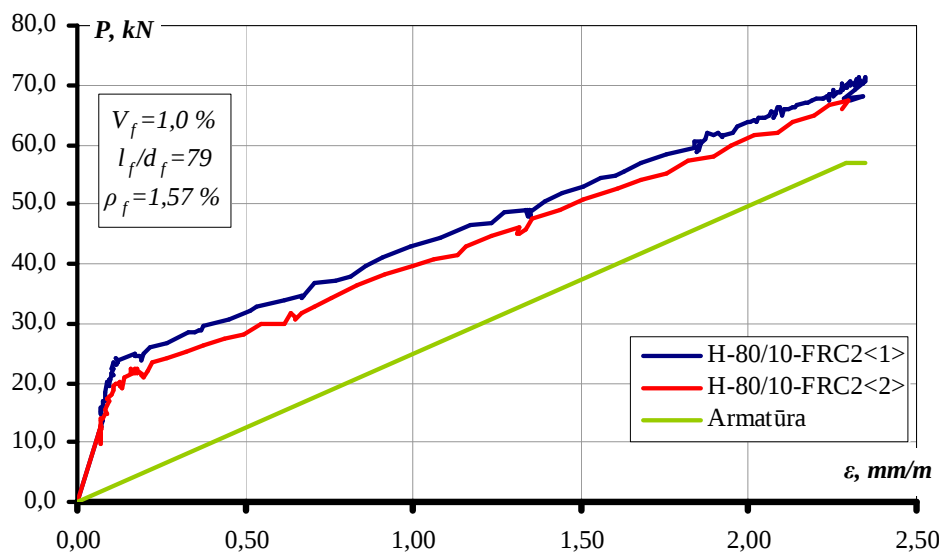
B.1.11 pav. H-150/30-FRC1 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



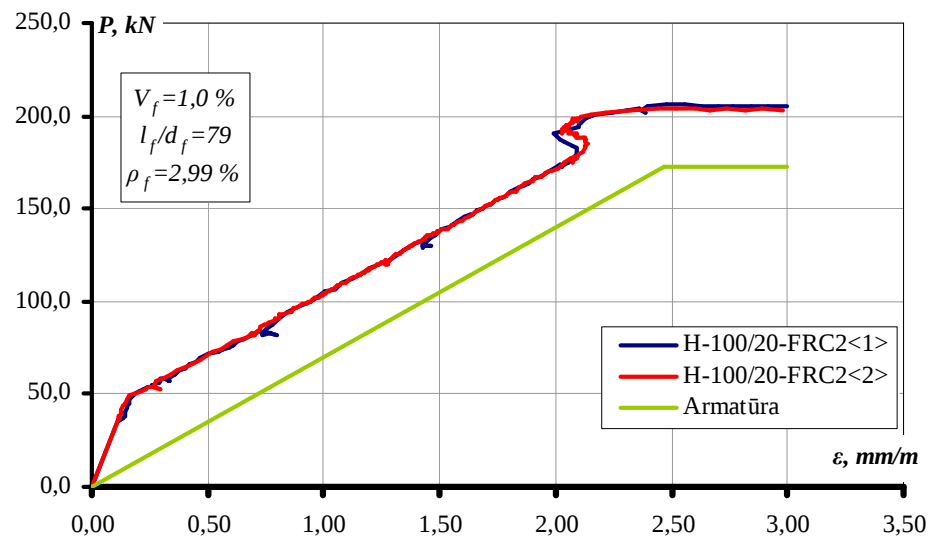
B.1.12 pav. H-200/30-FRC1 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



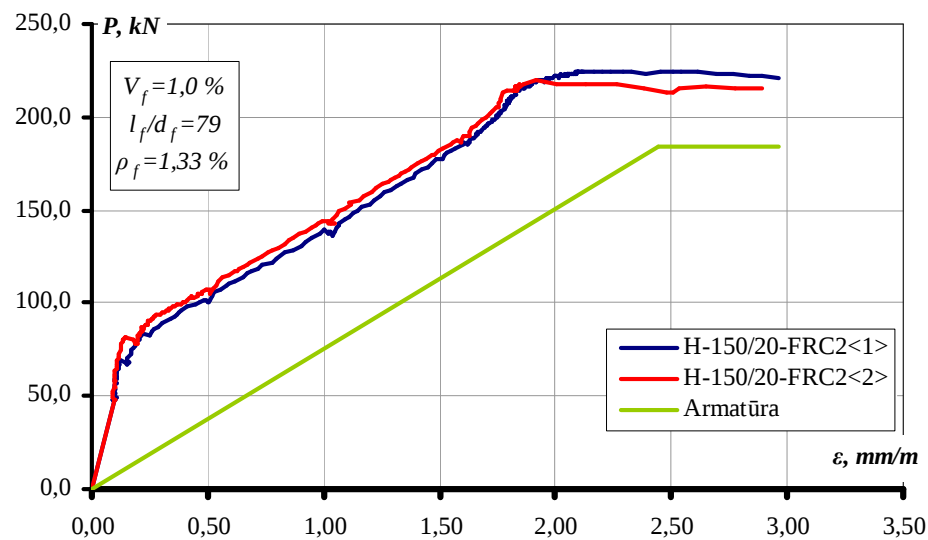
B.1.13 pav. H-50/10-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



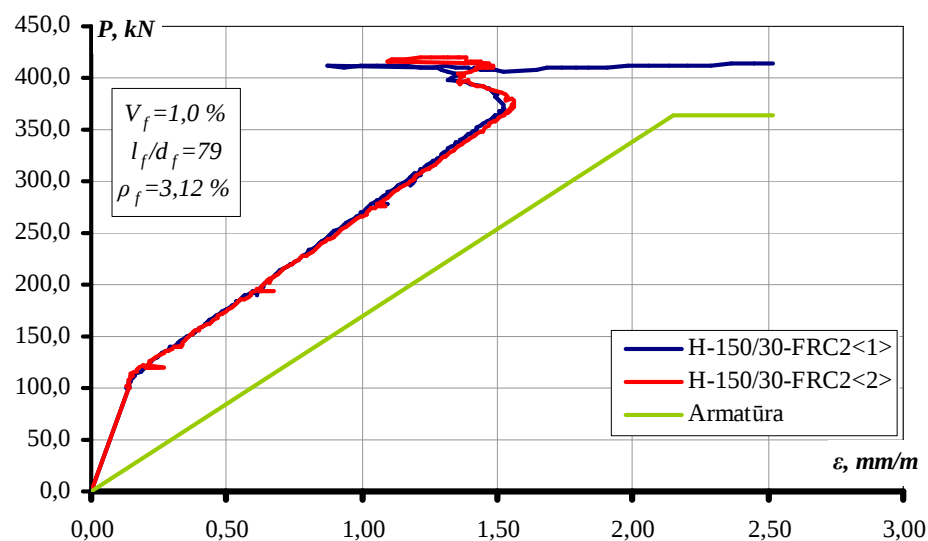
B.1.14 pav. H-80/10-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



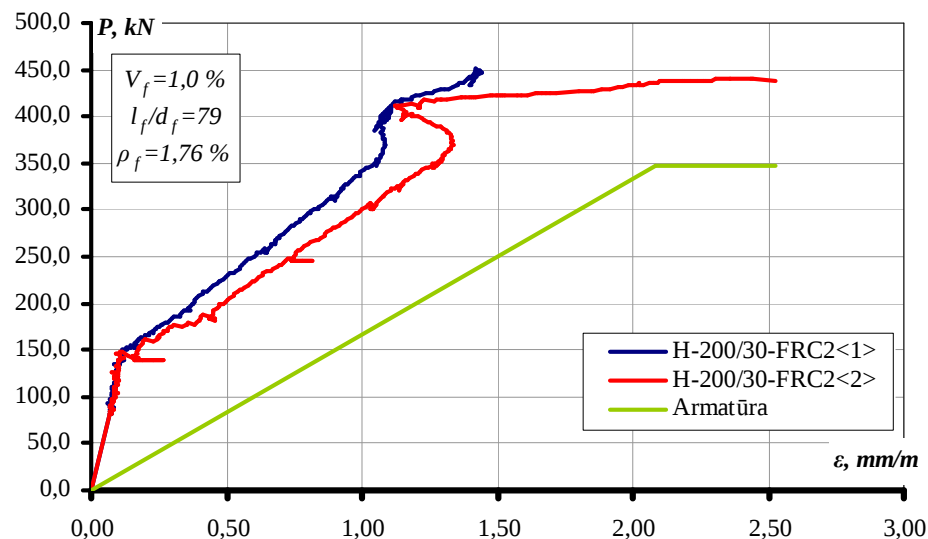
B.1.15 pav. H-100/20-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



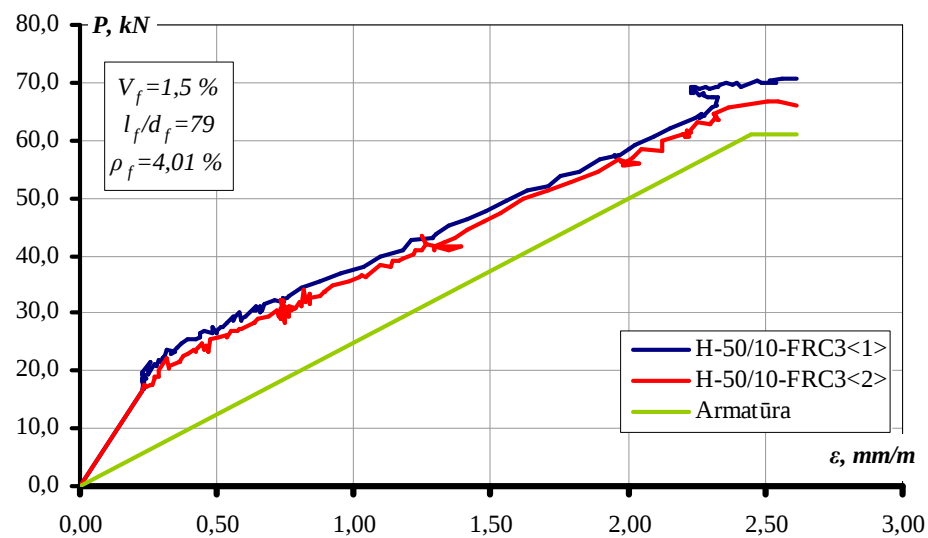
B.1.16 pav. H-150/20-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



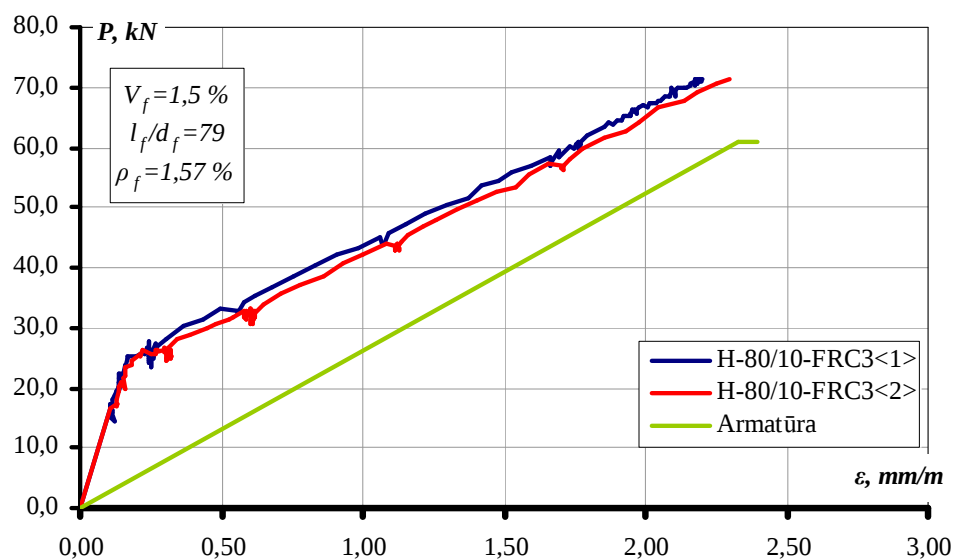
B.1.17 pav. H-150/30-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



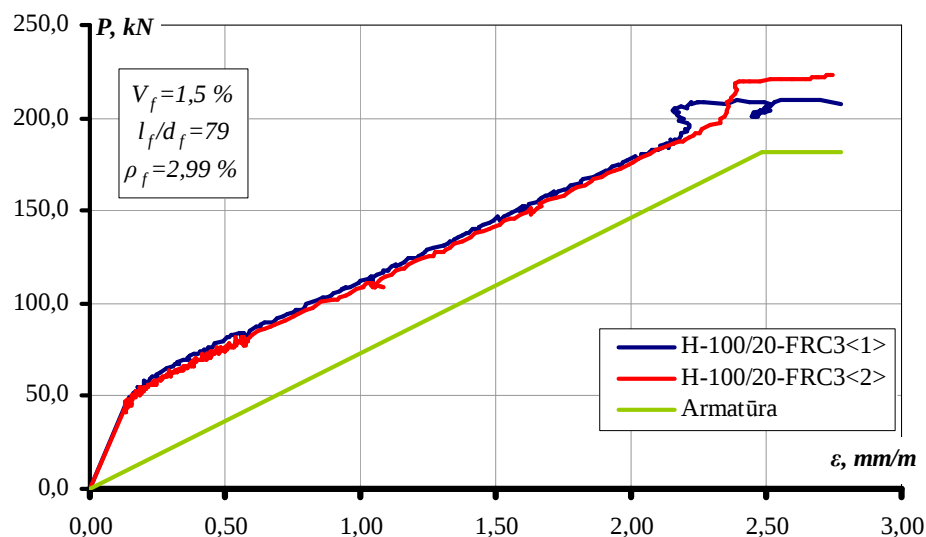
B.1.18 pav. H-200/30-FRC2 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



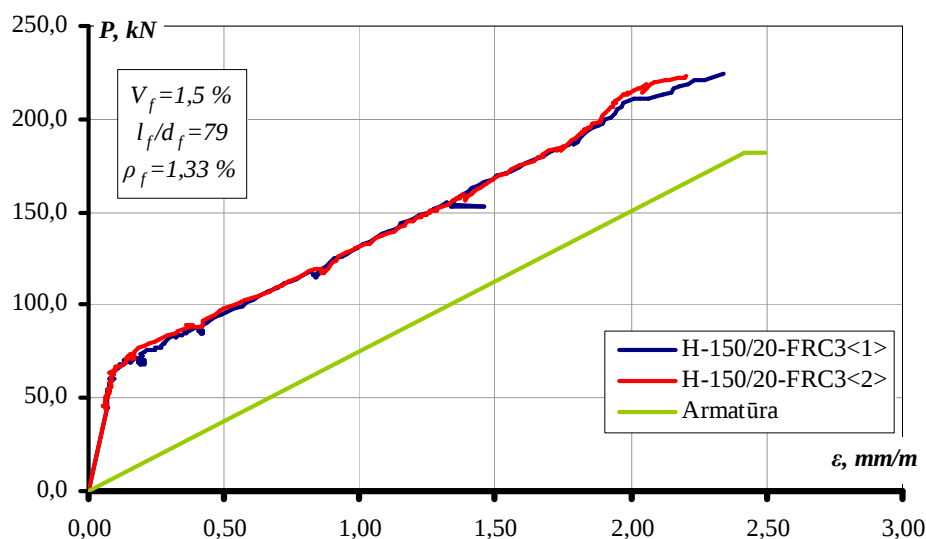
B.1.19 pav. H-50/10-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



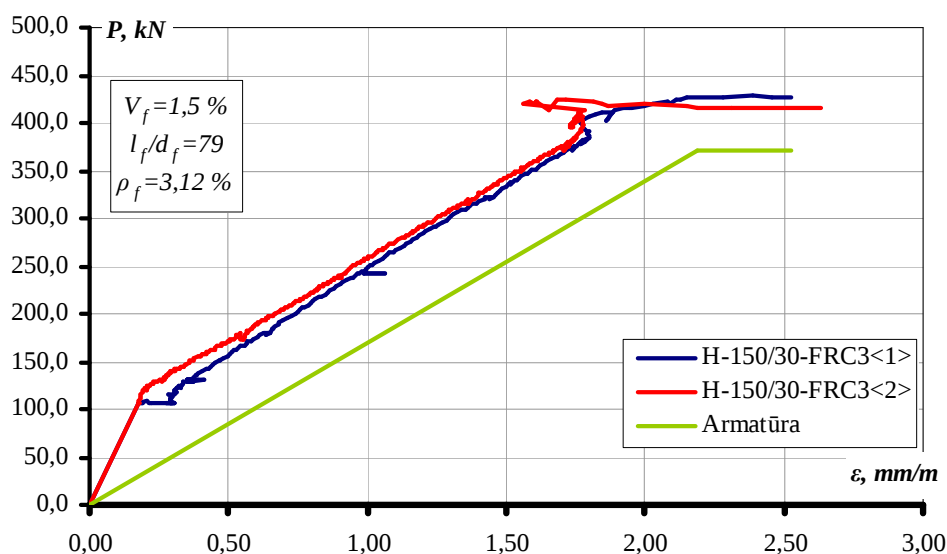
B.1.20 pav. H-80/10-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



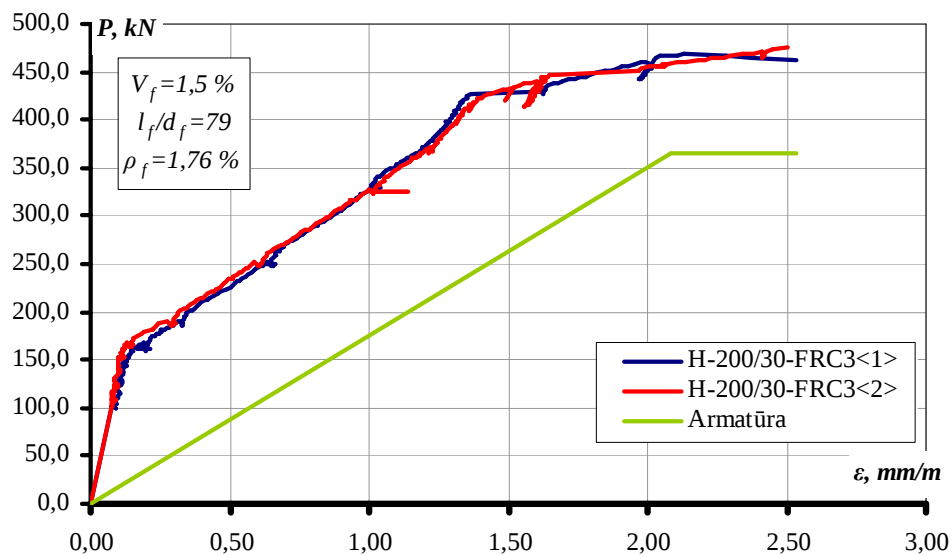
B.1.21 pav. H-100/20-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



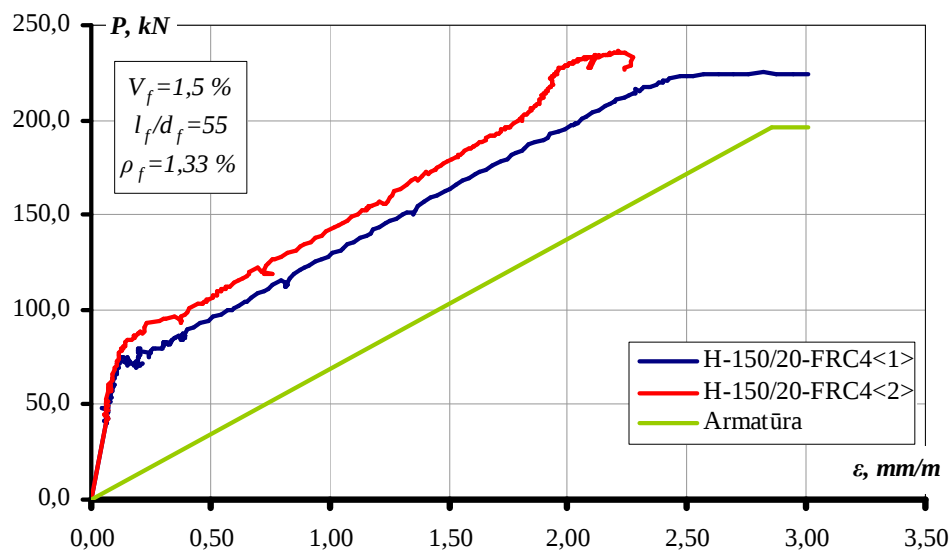
B.1.22 pav. H-150/20-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



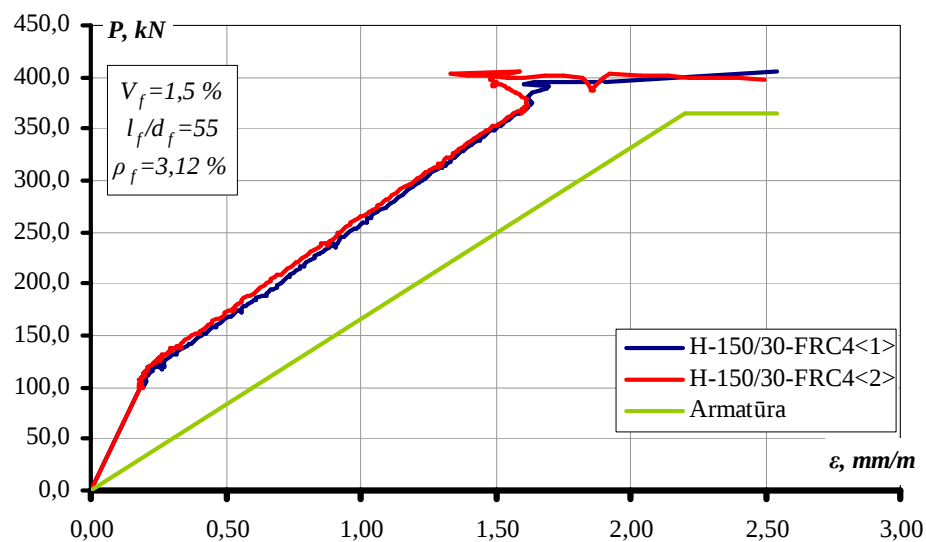
B.1.23 pav. H-150/30-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



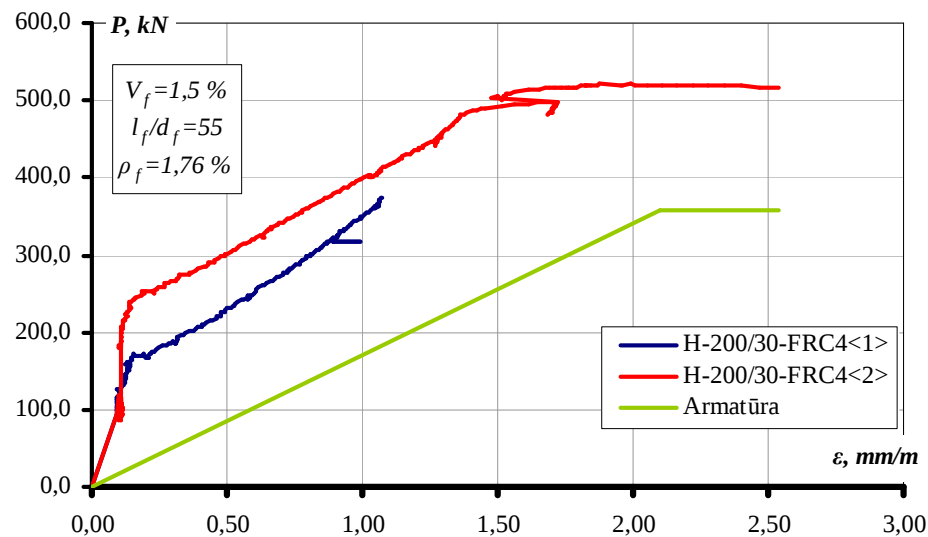
B.1.24 pav. H-200/30-FRC3 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



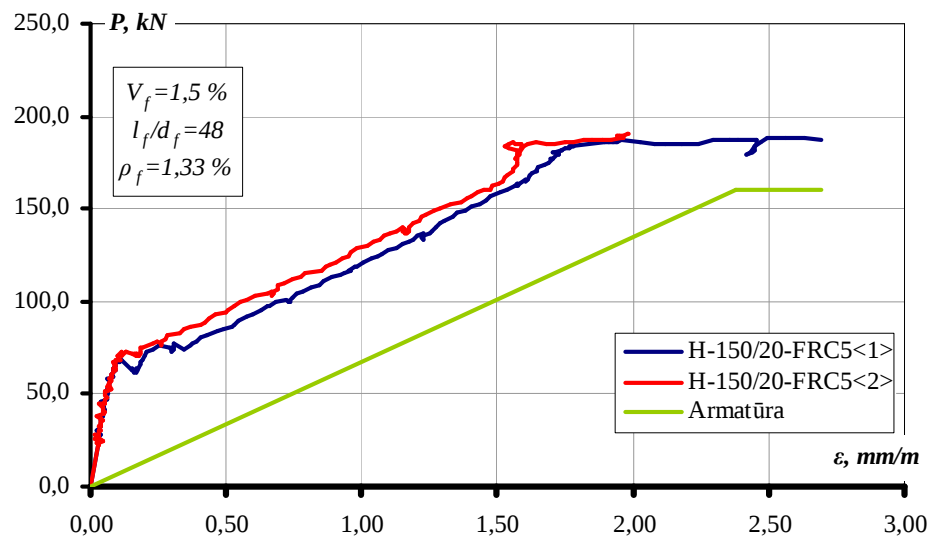
B.1.25 pav. H-150/20-FRC4 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



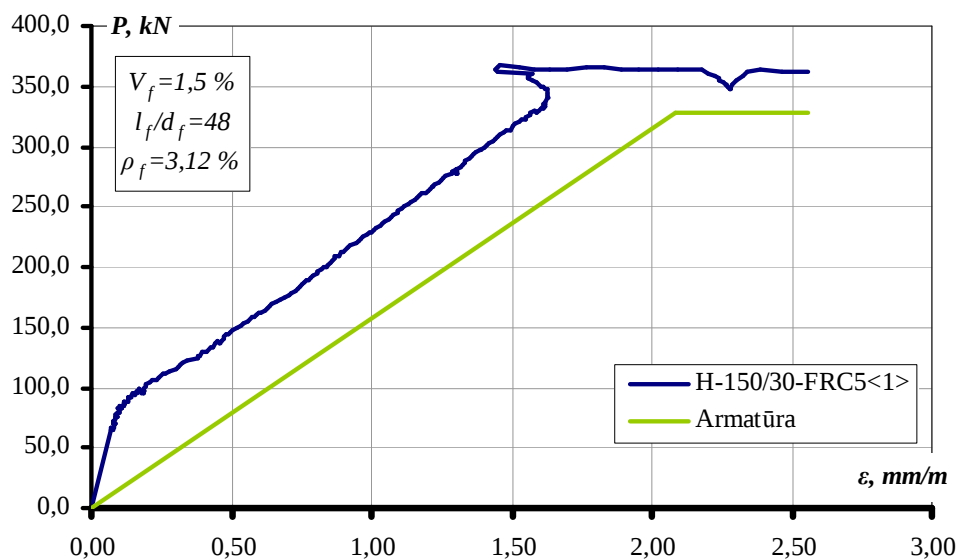
B.1.26 pav. H-150/30-FRC4 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



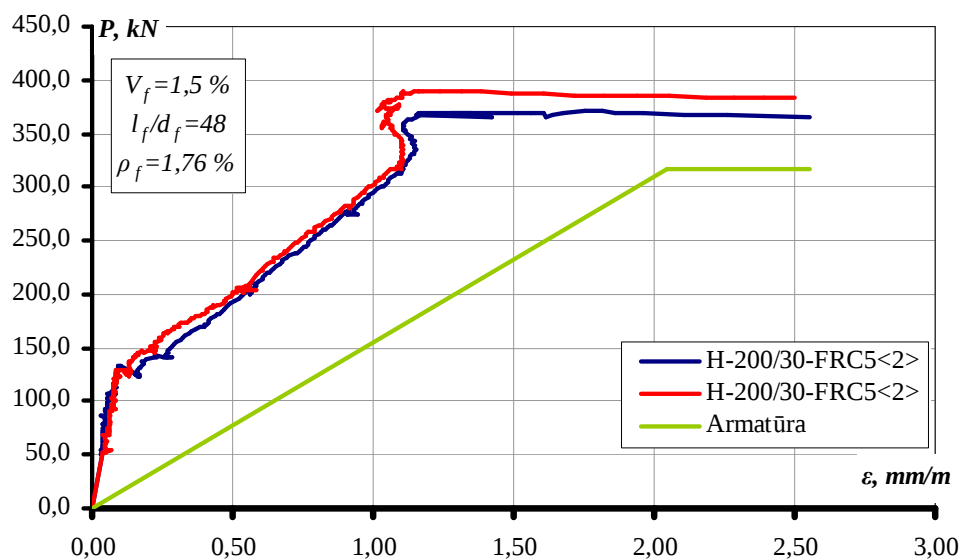
B.1.27 pav. H-200/30-FRC4 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



B.1.28 pav. H-150/20-FRC5 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)



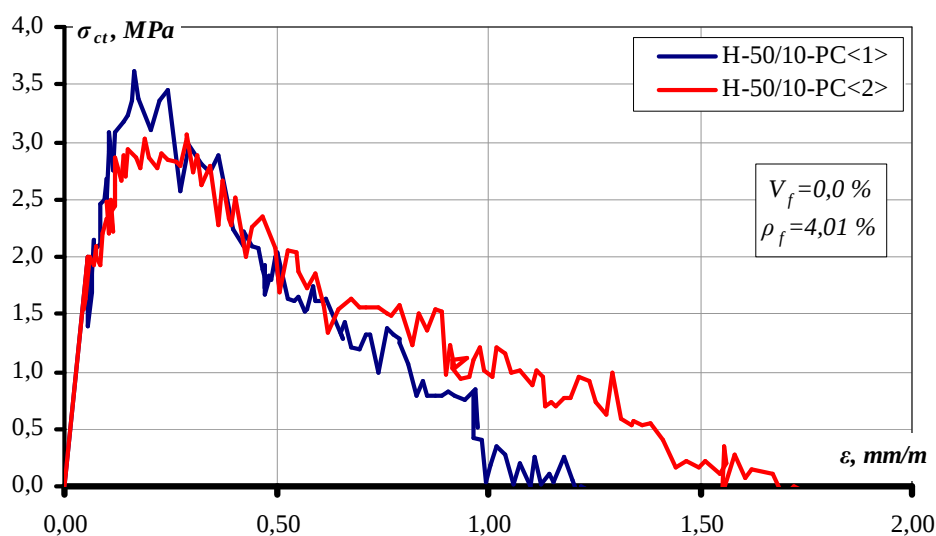
B.1.29 pav. H-150/30-FRC5 bandinio apkrovos ir deformacijos priklausomybė (pagal Deluce, 2011)



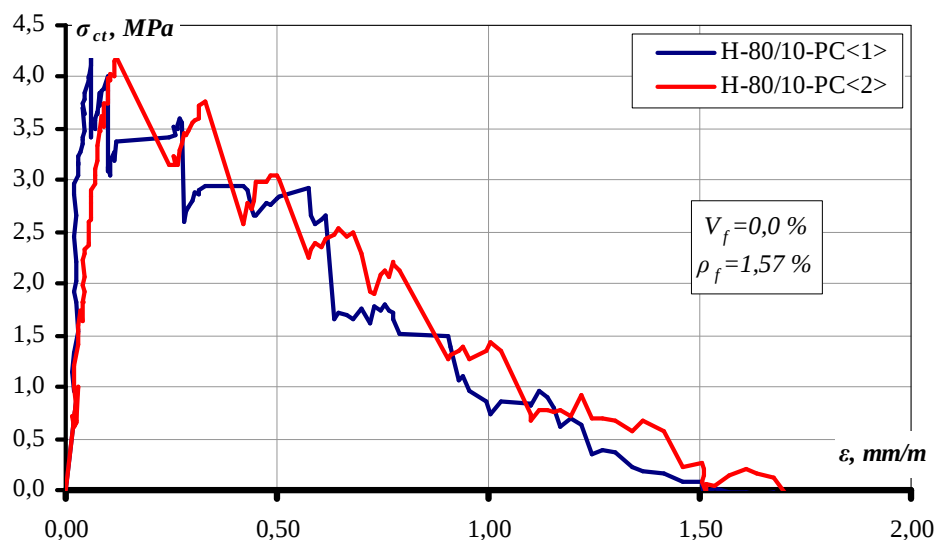
B.1.30 pav. H-200/30-FRC5 bandinių apkrovos ir deformacijos priklausomybės (pagal Deluce, 2011)

B.2 priedas. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės

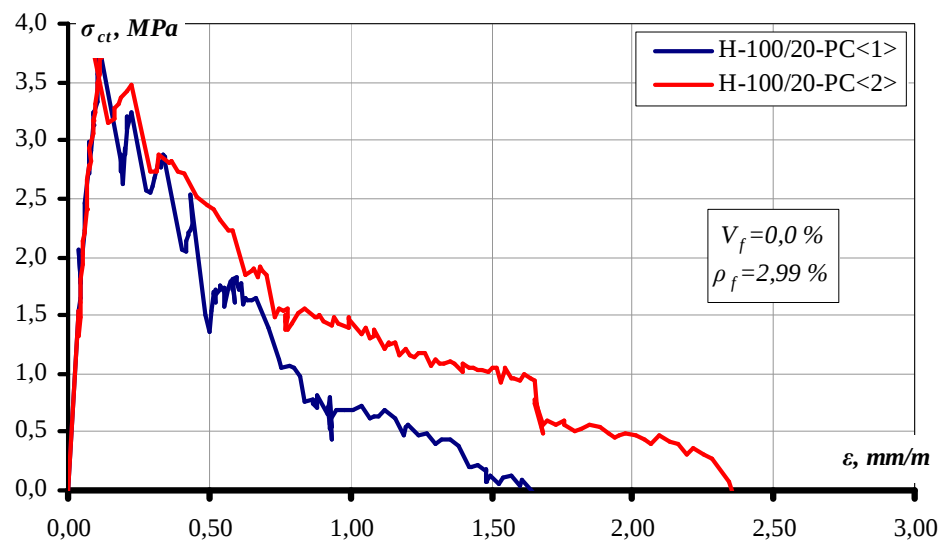
Šiame priede pateikiamos 3.2 poskyryje aprašytos, pagal B.1 priedo tempiamųjų gelžbetoninių prizmių eksperimentines kreives sudarytos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės. Sudarinėjant šiuos grafikus, betono tempimo įtempiai buvo apskaičiuoti pagal 1.3 poskyryje pateikiamą metodiką. Kiekviename paveiksle (išskyrus B.2.29 pav.) pateikiama po dvi kreives, kurios gautos apdorojant identišκών bandinių eksperimentinius duomenis. Šios kreivės vaizduojamos iki armatūros takumo pradžios arba bandymo pabaigos, jei tai įvyko anksčiau.



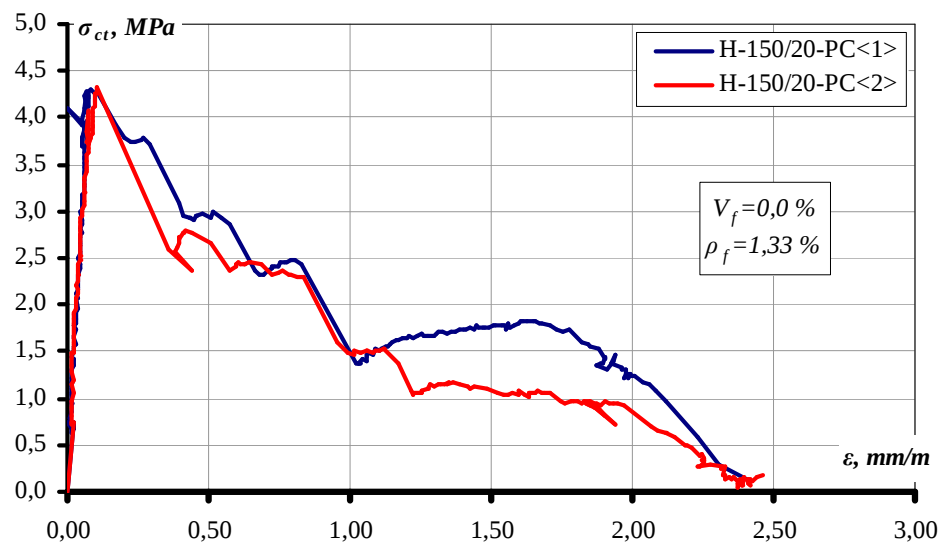
B.2.1 pav. H-50/10-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



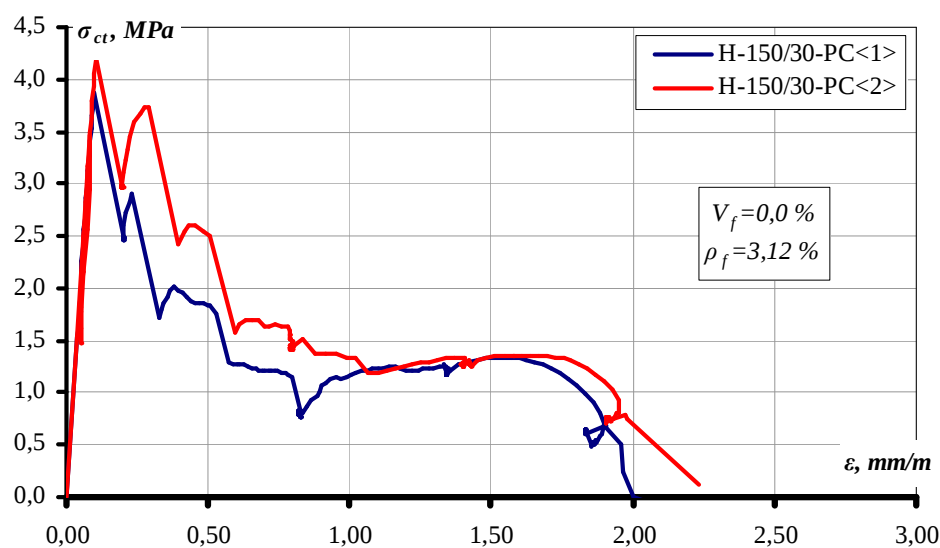
B.2.2 pav. H-80/10-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



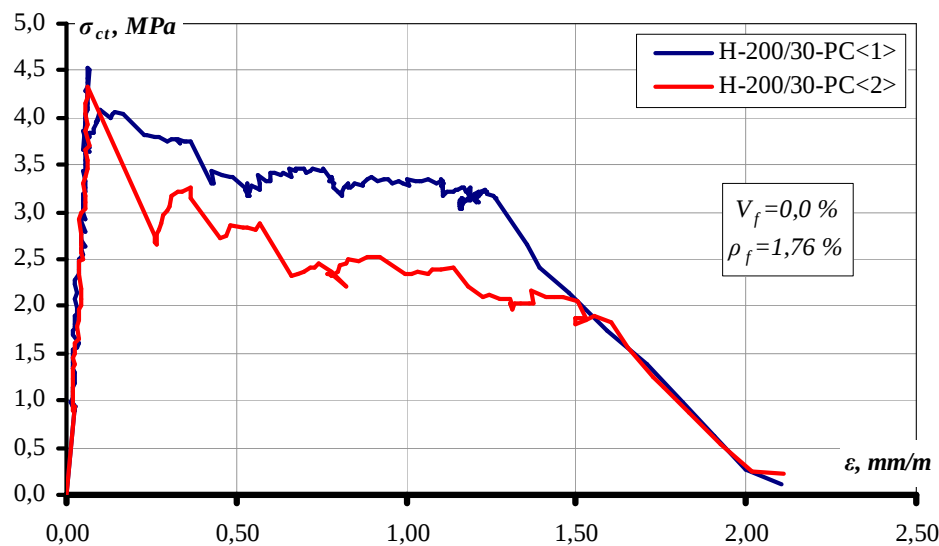
B.2.3 pav. H-100/20-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



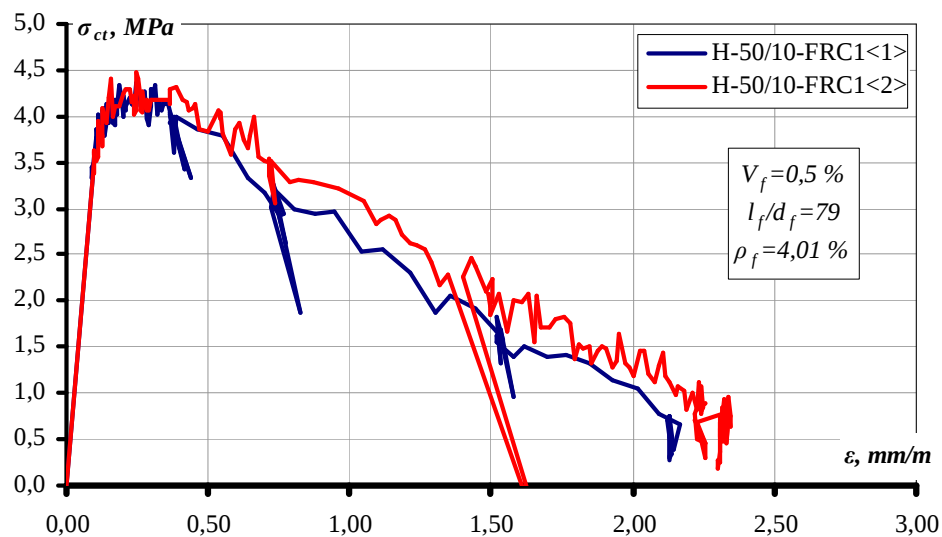
B.2.4 pav. H-150/20-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



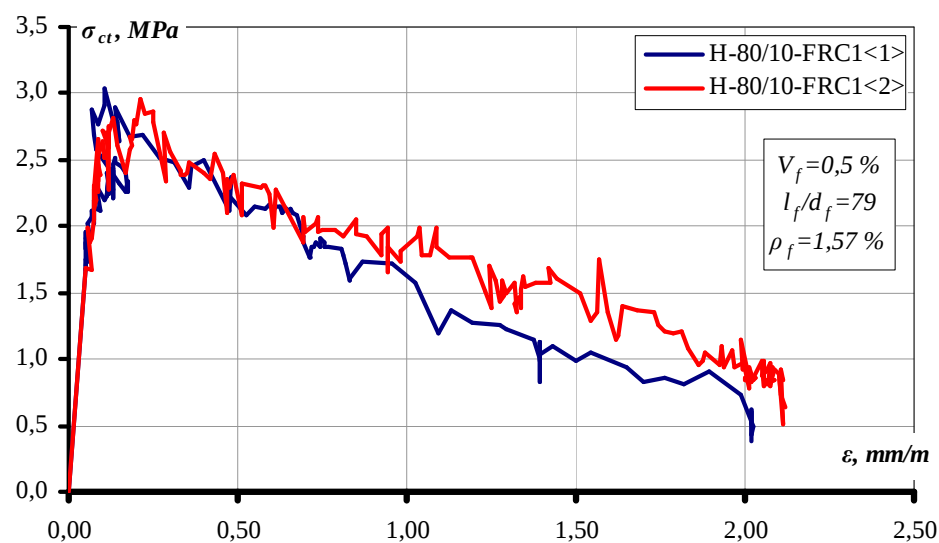
B.2.5 pav. H-150/30-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



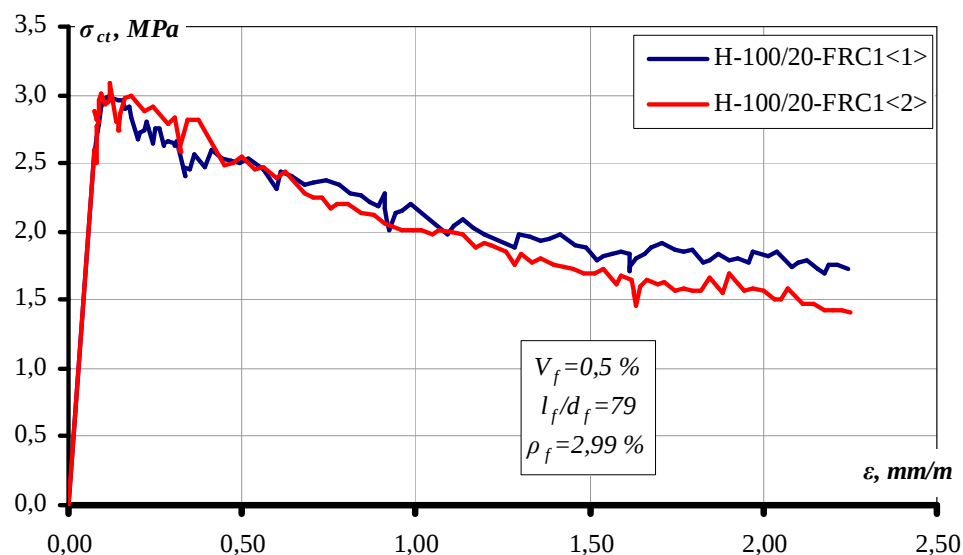
B.2.6 pav. H-200/30-PC bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



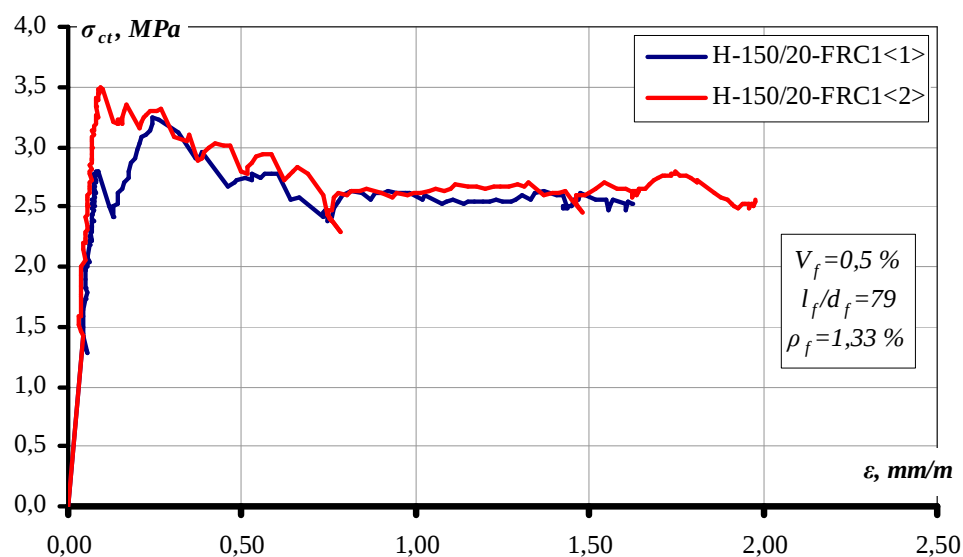
B.2.7 pav. H-50/10-FRC1 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



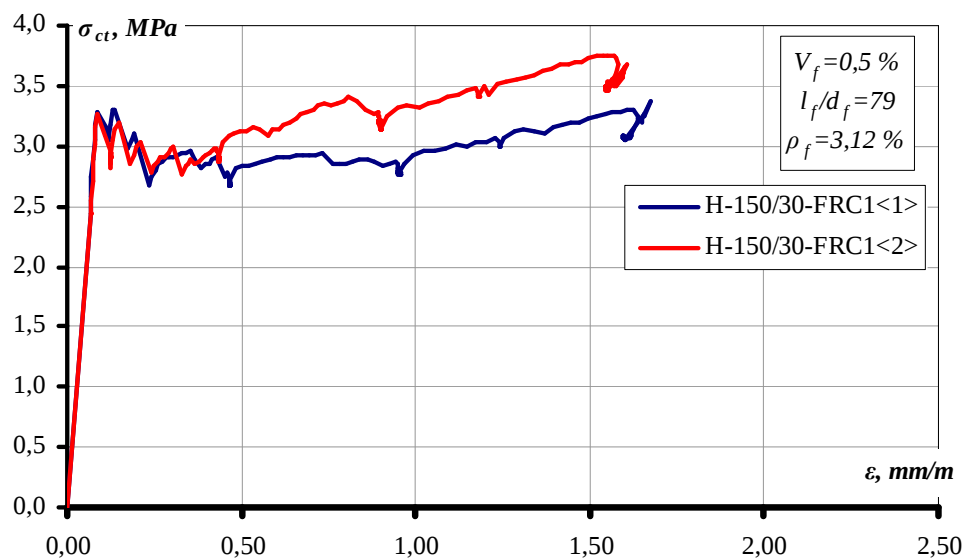
B.2.8 pav. H-80/10-FRC1 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



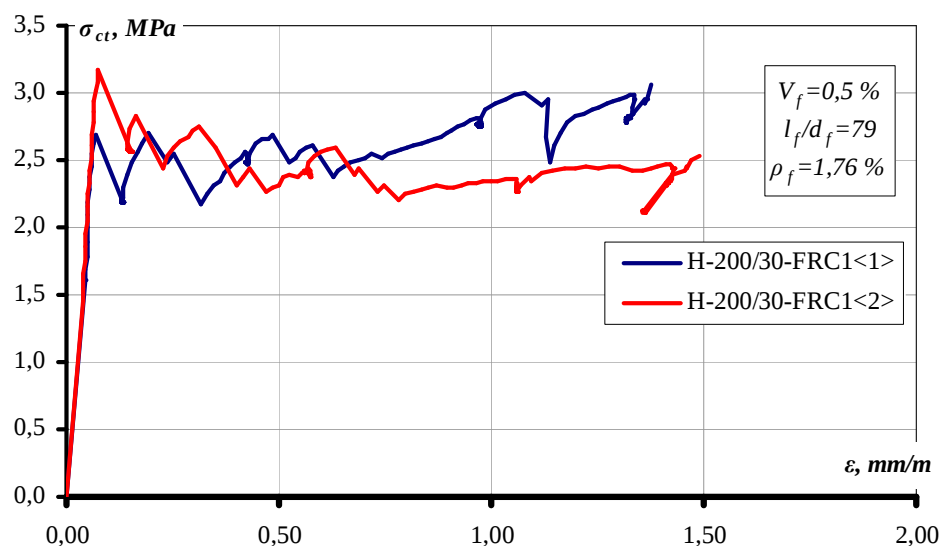
B.2.8 pav. H-100/20-FRC1 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



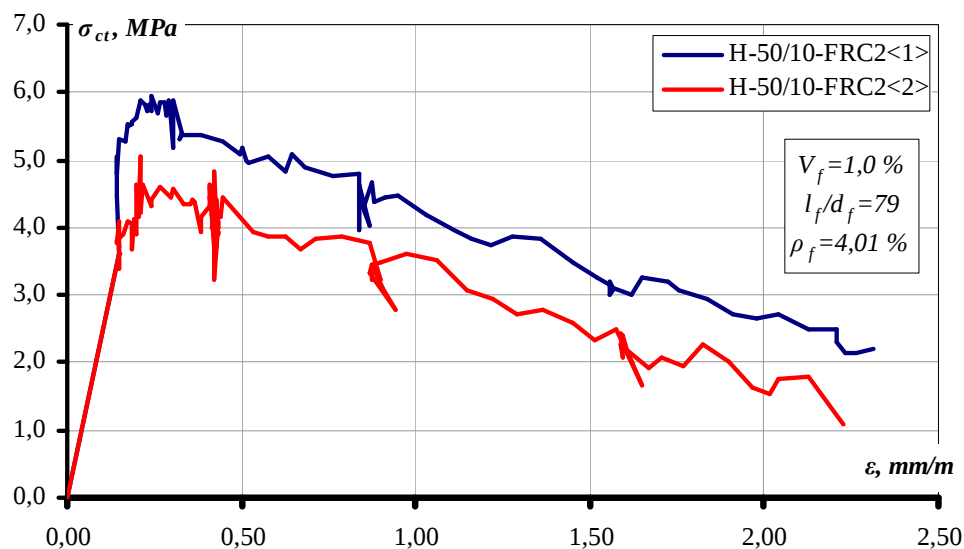
B.2.10 pav. H-150/20-FRC1 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



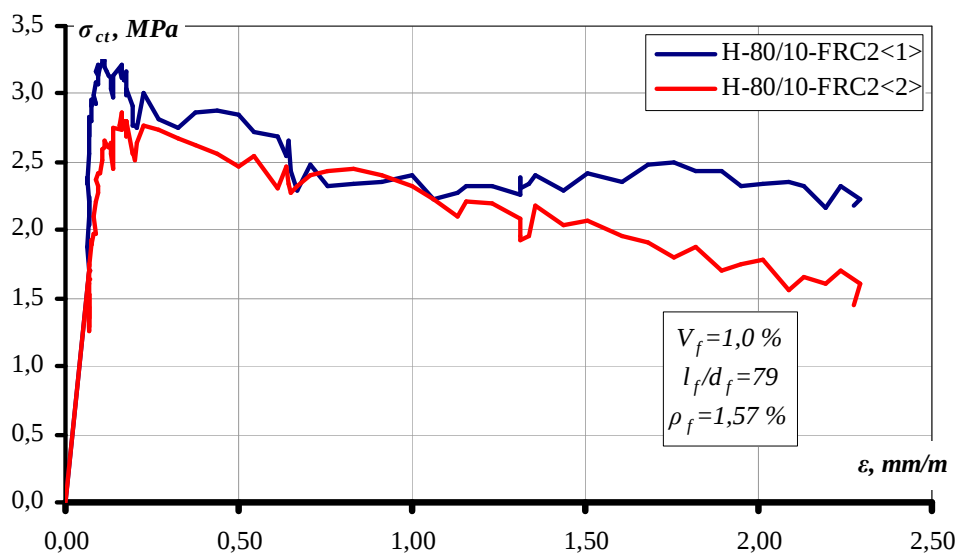
B.2.11 pav. H-150/30-FRC1 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



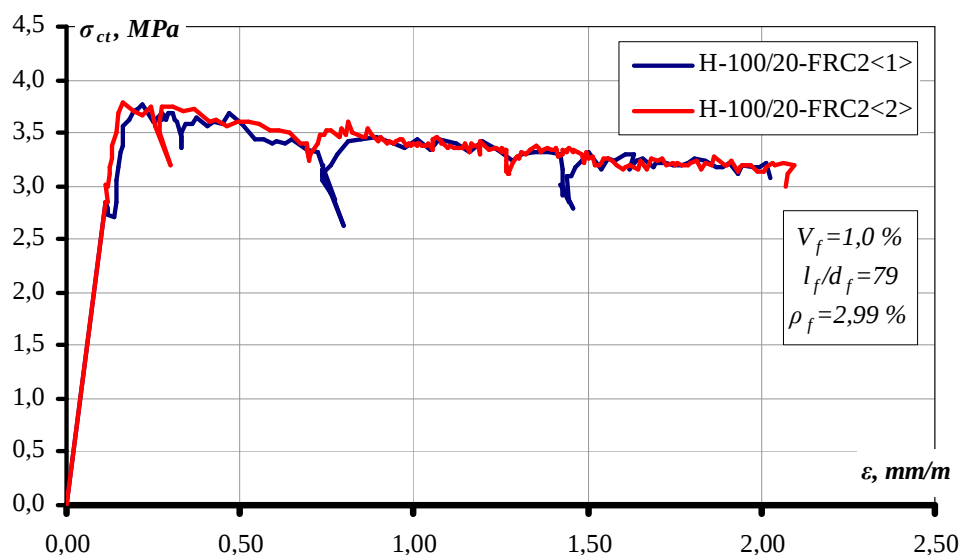
B.2.12 pav. H-200/30-FRC1 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



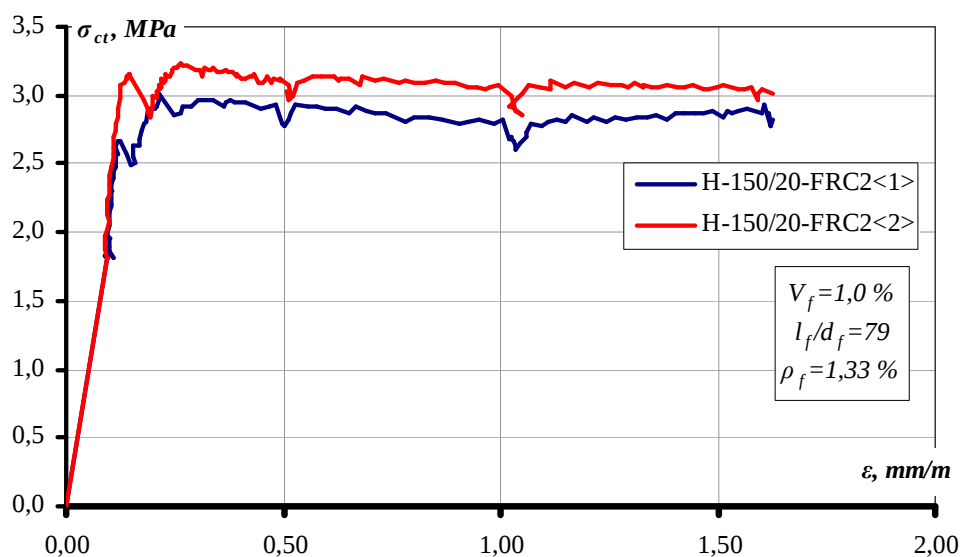
B.2.13 pav. H-50/10-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



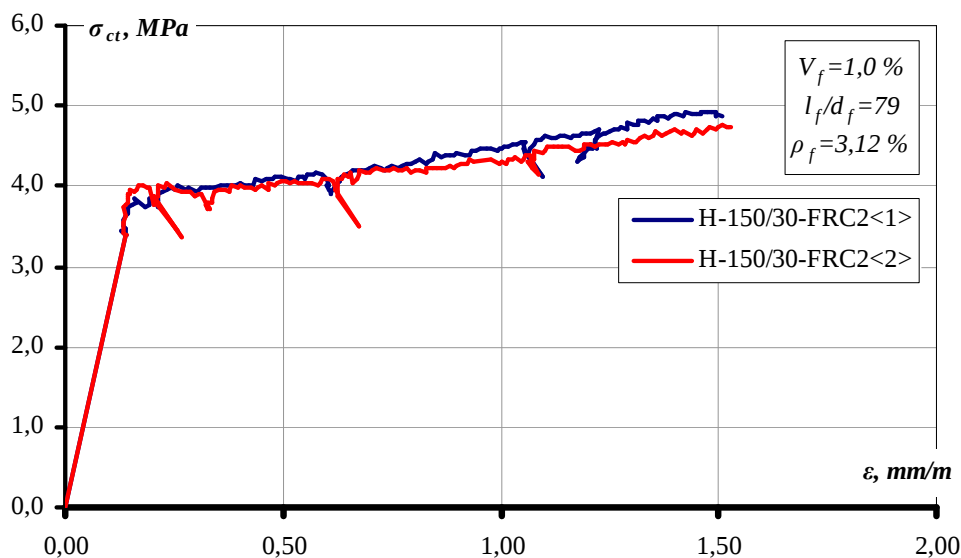
B.2.14 pav. H-80/10-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



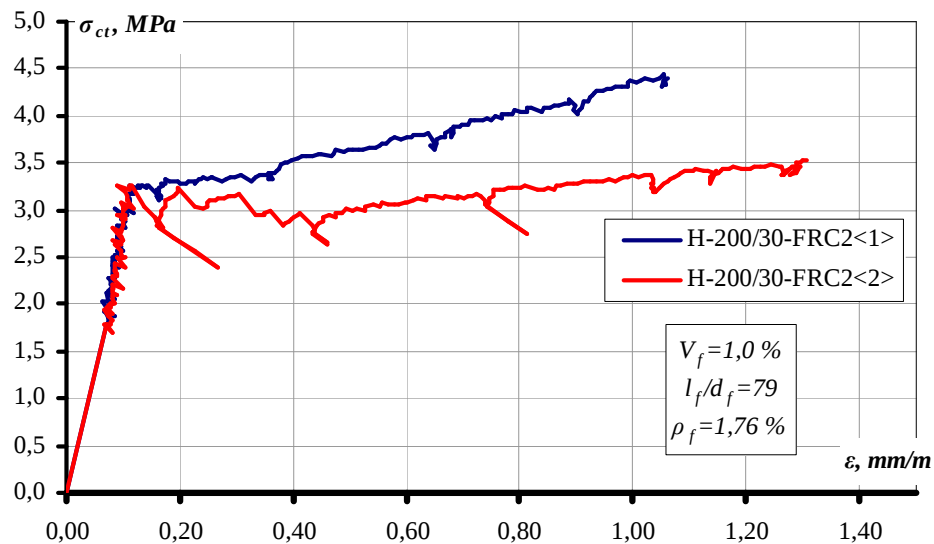
B.2.15 pav. H-100/20-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



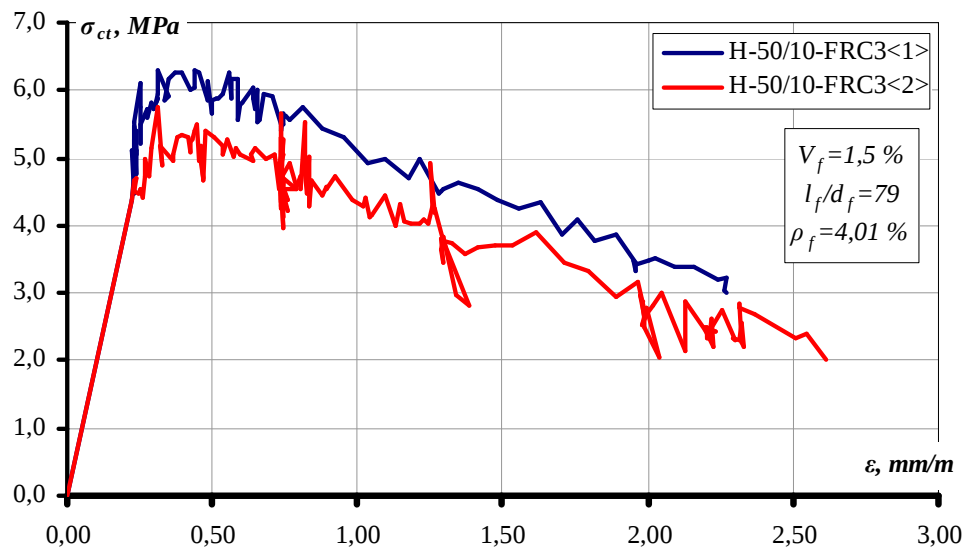
B.2.16 pav. H-150/20-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



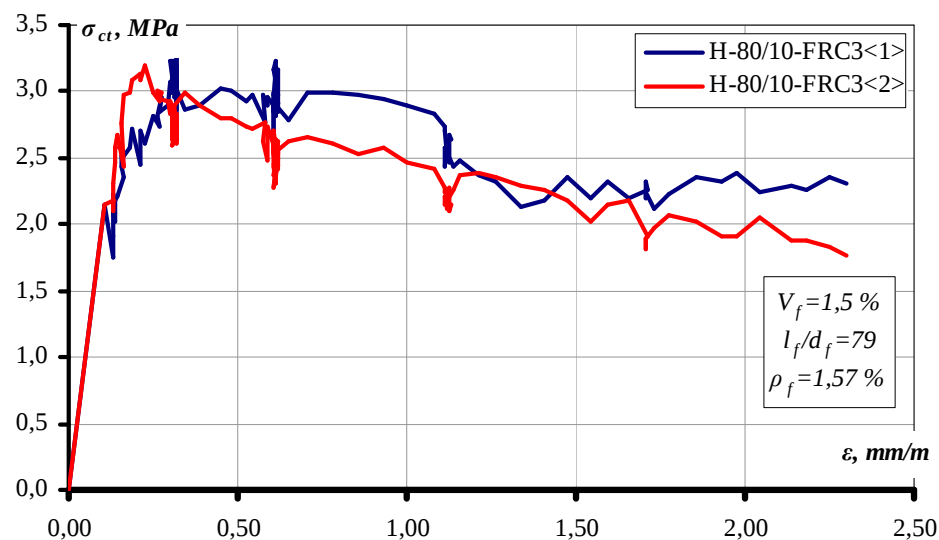
B.2.17 pav. H-150/30-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



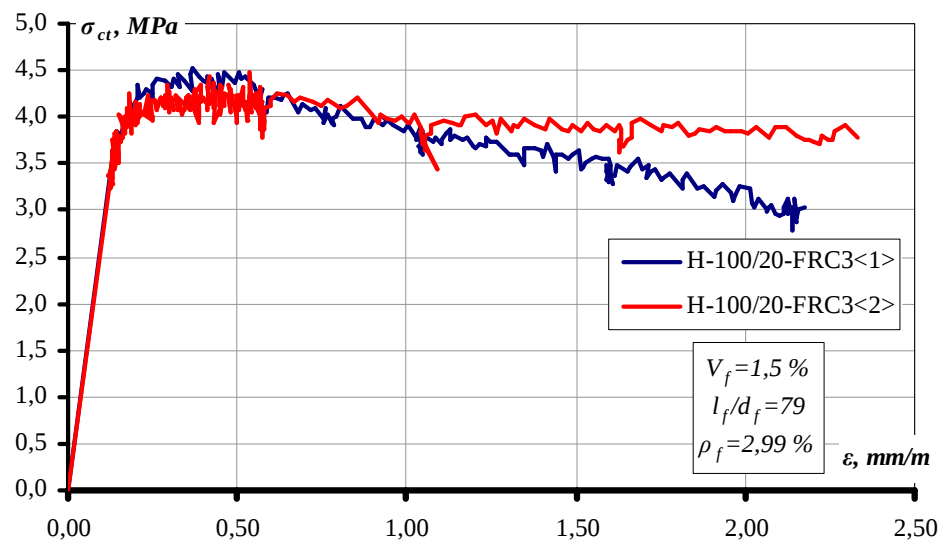
B.2.18 pav. H-200/30-FRC2 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



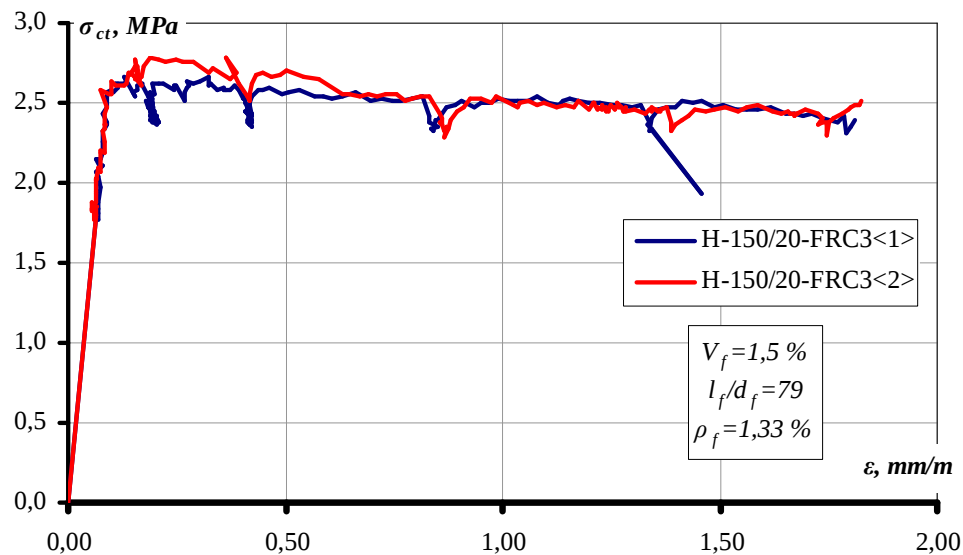
B.2.19 pav. H-50/10-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



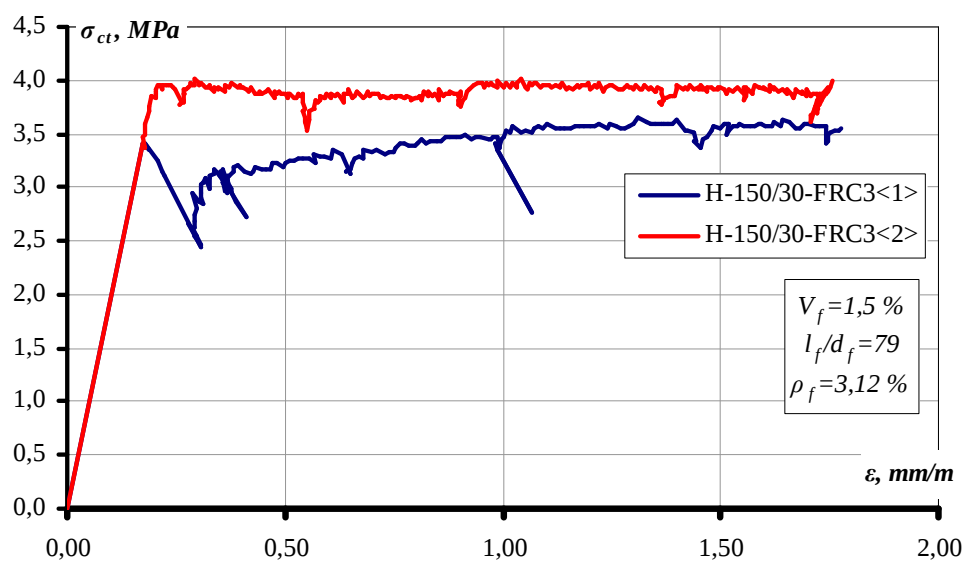
B.2.20 pav. H-80/10-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



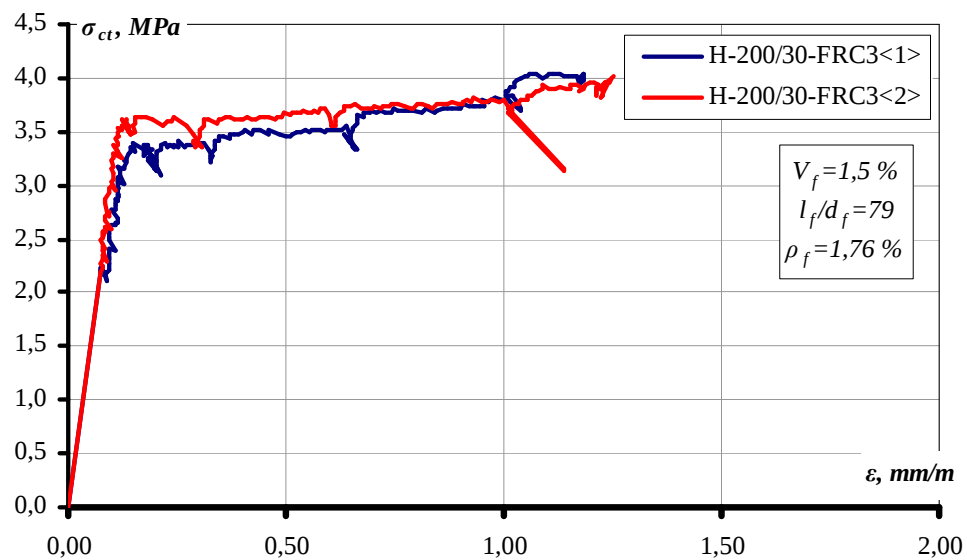
B.2.21 pav. H-100/20-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



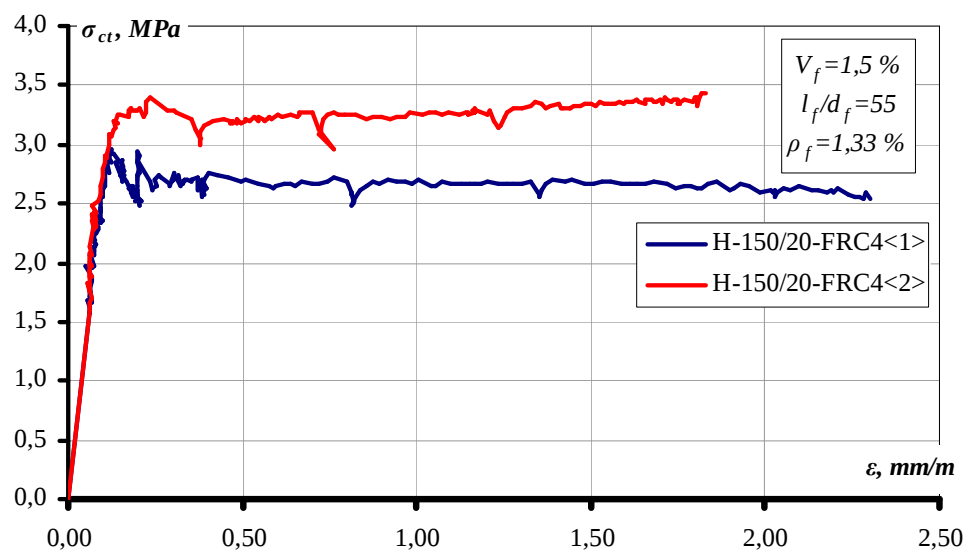
B.2.22 pav. H-150/20-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



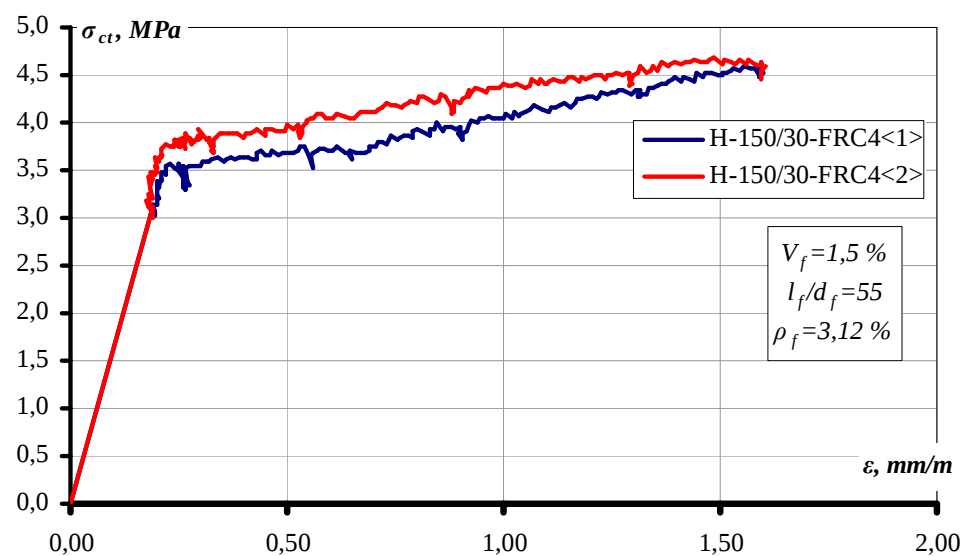
B.2.23 pav. H-150/30-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



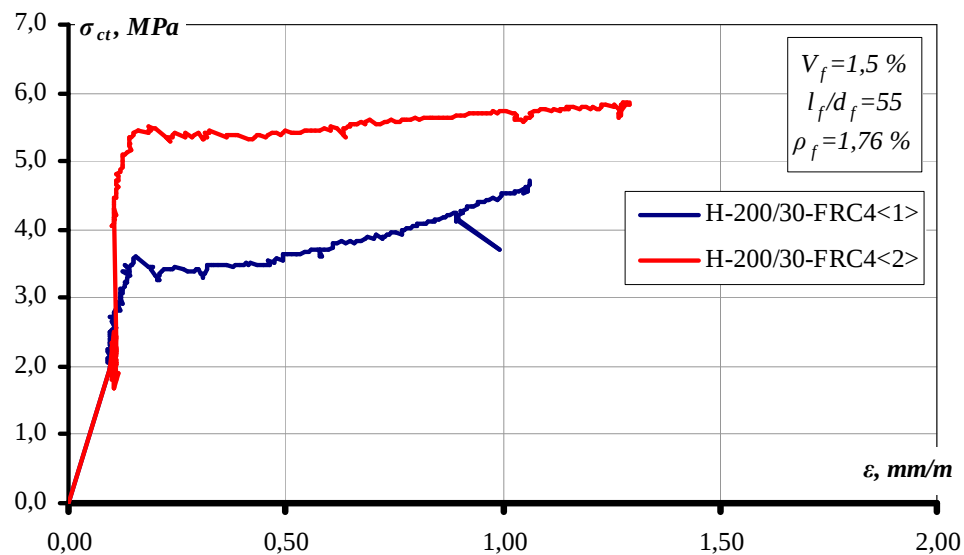
B.2.24 pav. H-200/30-FRC3 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



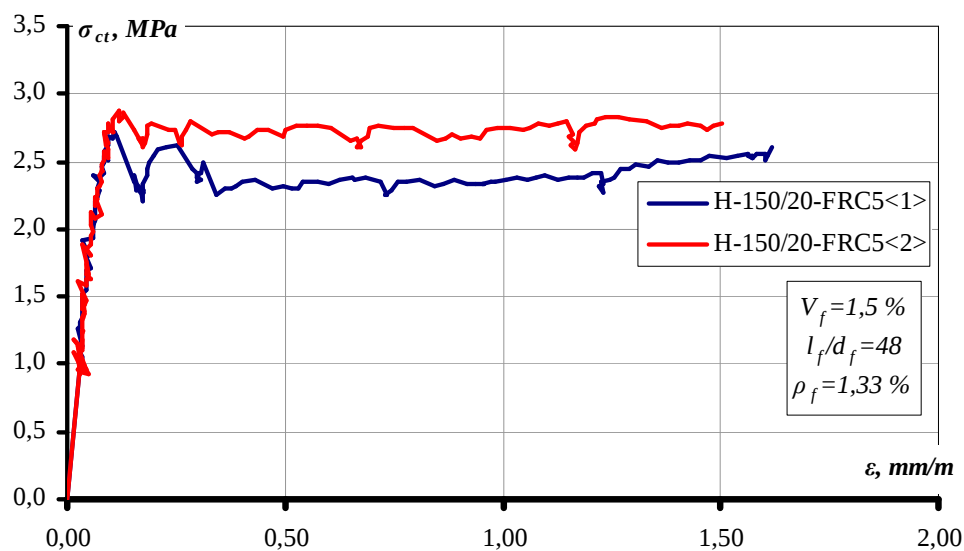
B.2.25 pav. H-150/20-FRC4 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



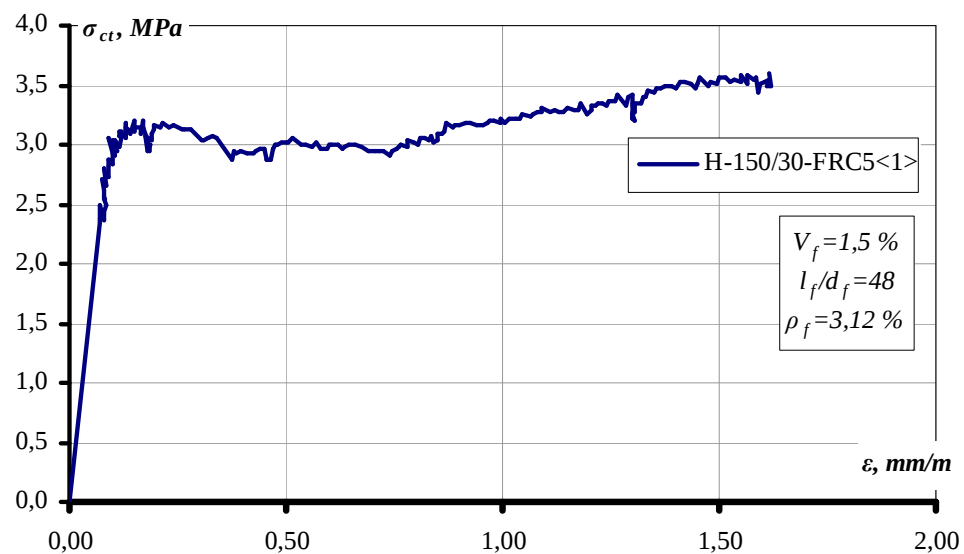
B.2.26 pav. H-150/30-FRC4 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



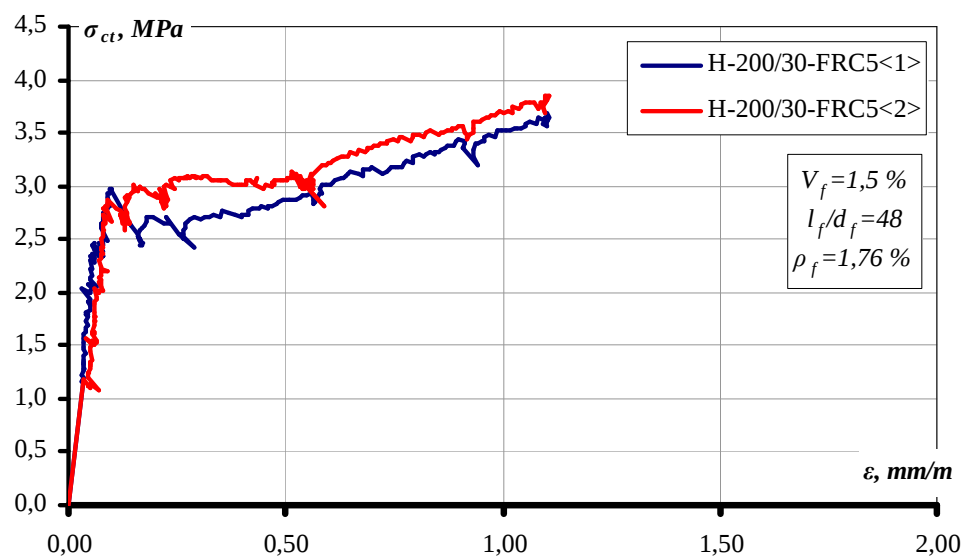
B.2.27 pav. H-200/30-FRC4 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



B.2.28 pav. H-150/20-FRC5 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



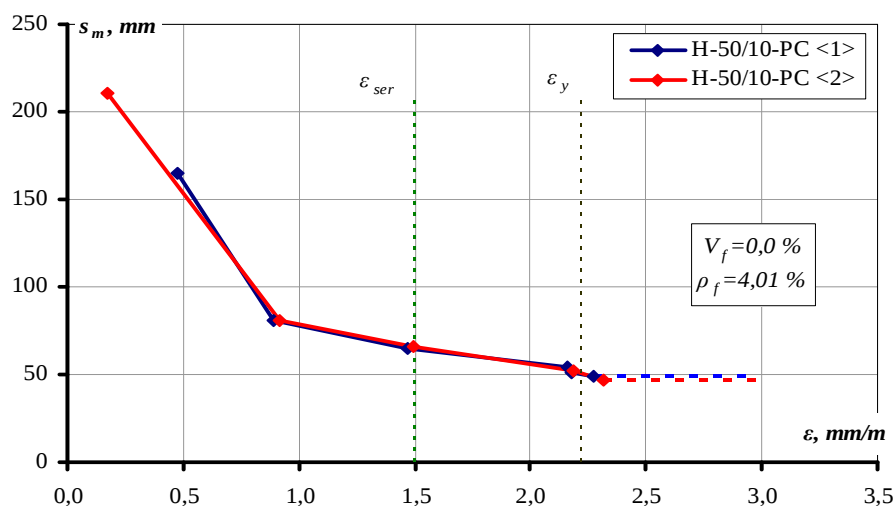
B.2.29 pav. H-150/30-FRC5 bandinio tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybė



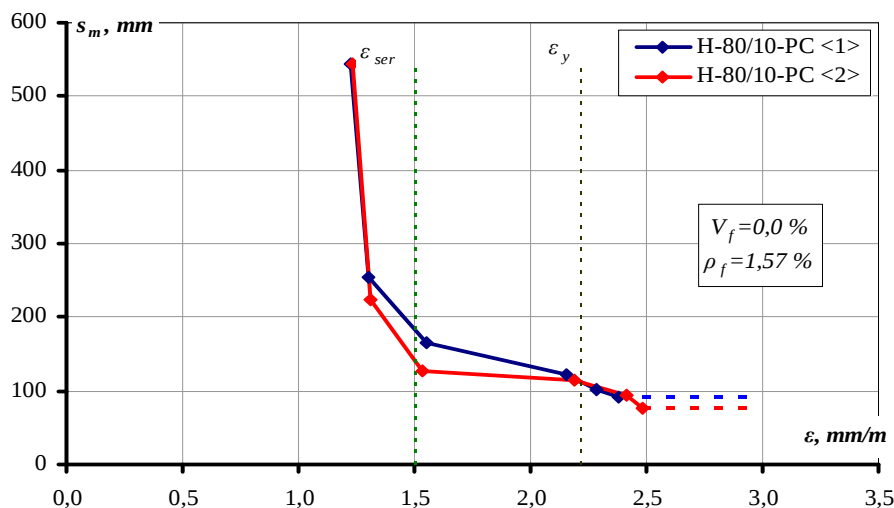
B.2.30 pav. H-200/30-FRC5 bandinių tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės

C priedas. Tempiamųjų gelžbetoninių prizmių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės

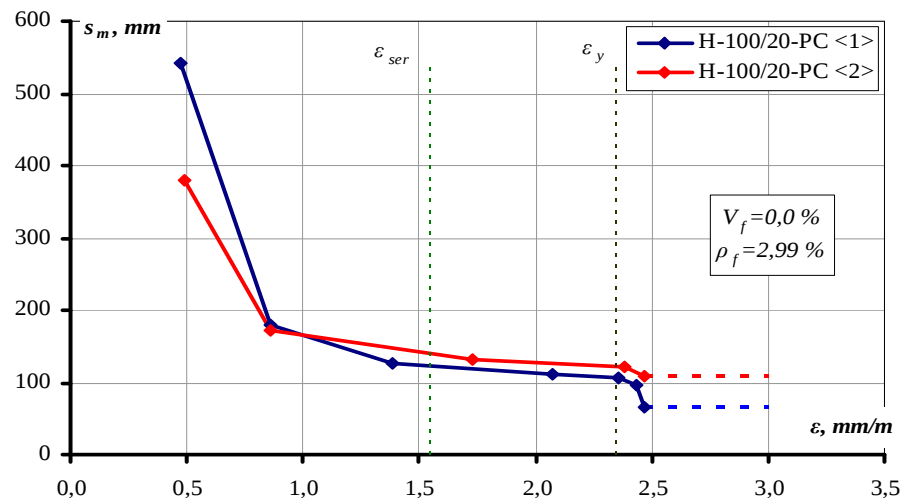
Šiame priede pateikiamos 3.2 poskyryje aprašytos, rengiant baigiamąjį darbą pagal Deluce'o atliktų eksperimentų rezultatus sudarytos tempiamųjų gelžbetoninių prizmių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės. Kiekviename paveiksle (išskyrus C.29 pav.) pateikiama po dvi kreives, kurios gautos apdorojant identiškų bandinių eksperimentinius duomenis.



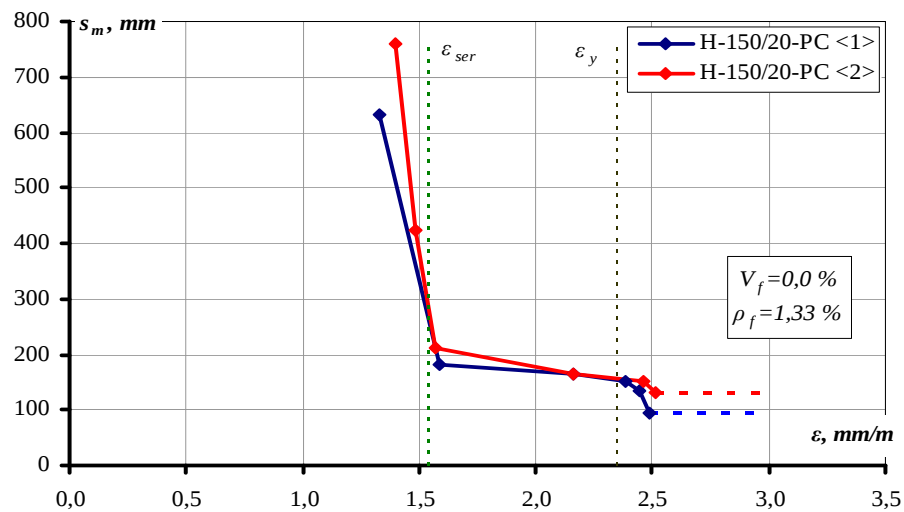
C.1 pav. H-50/10-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



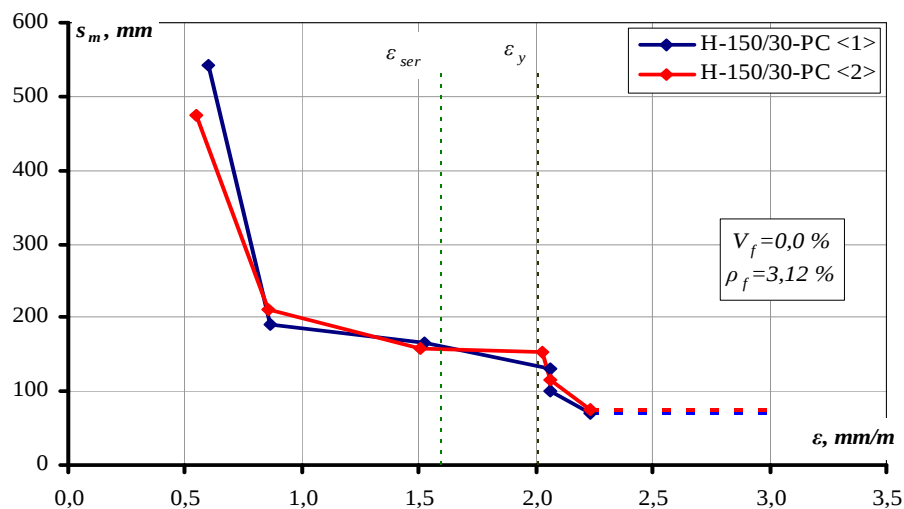
C.2 pav. H-80/10-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



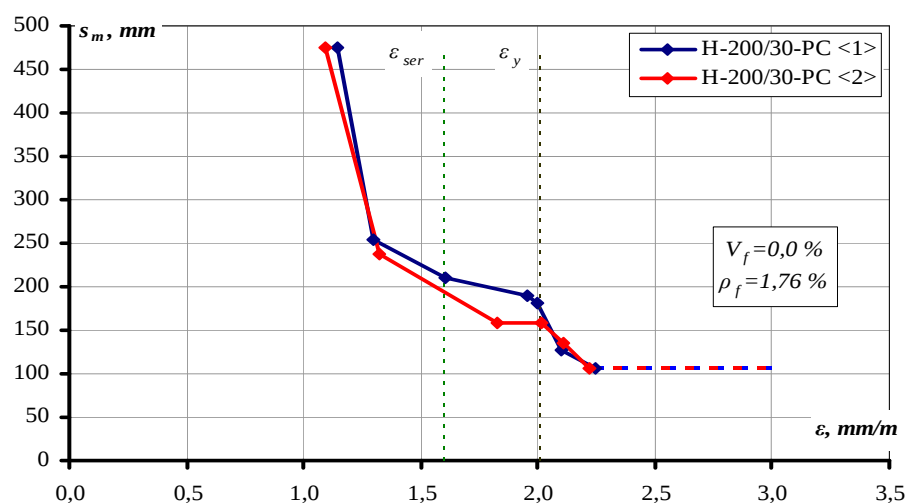
C.3 pav. H-100/20-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



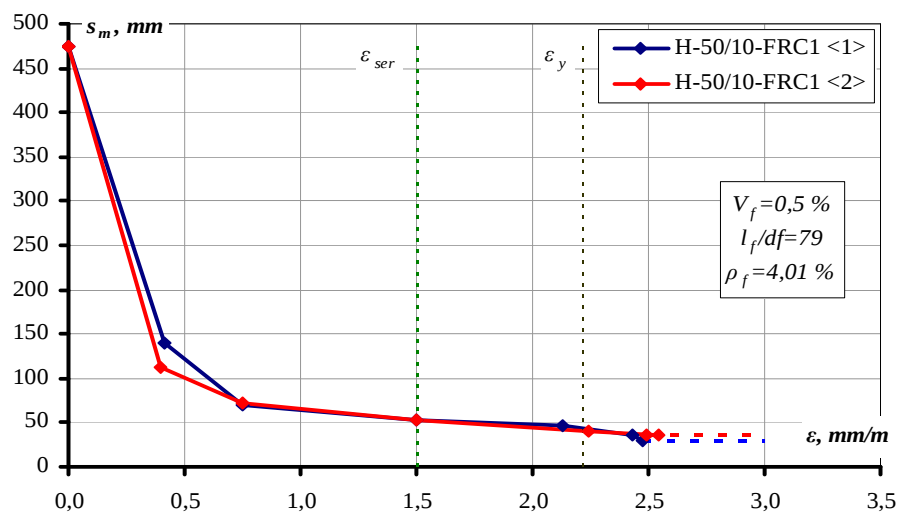
C.4 pav. H-150/20-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



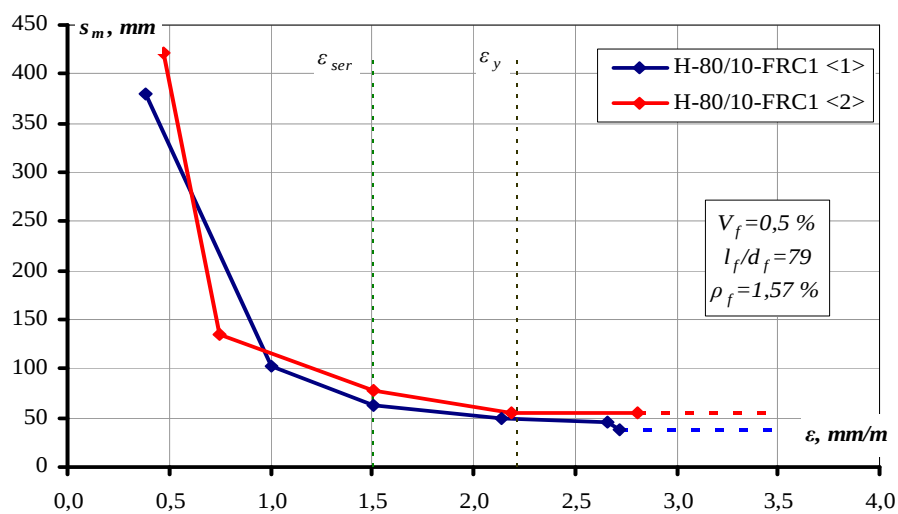
C.5 pav. H-150/30-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



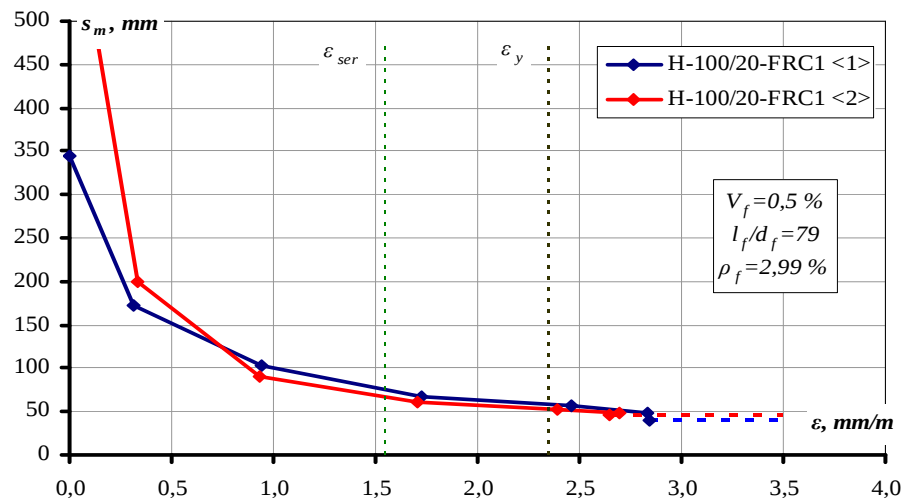
C.6 pav. H-200/30-PC bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



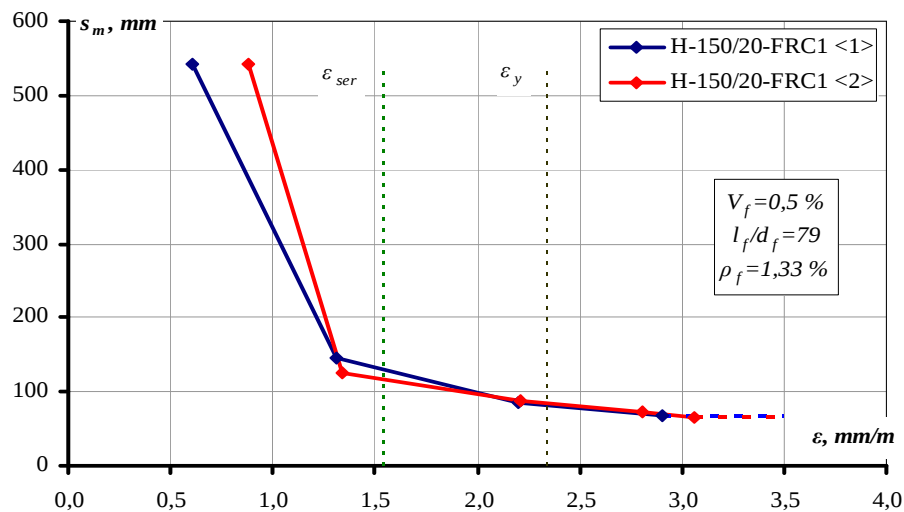
C.7 pav. H-50/10-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės (pagal
Deluce, 2011)



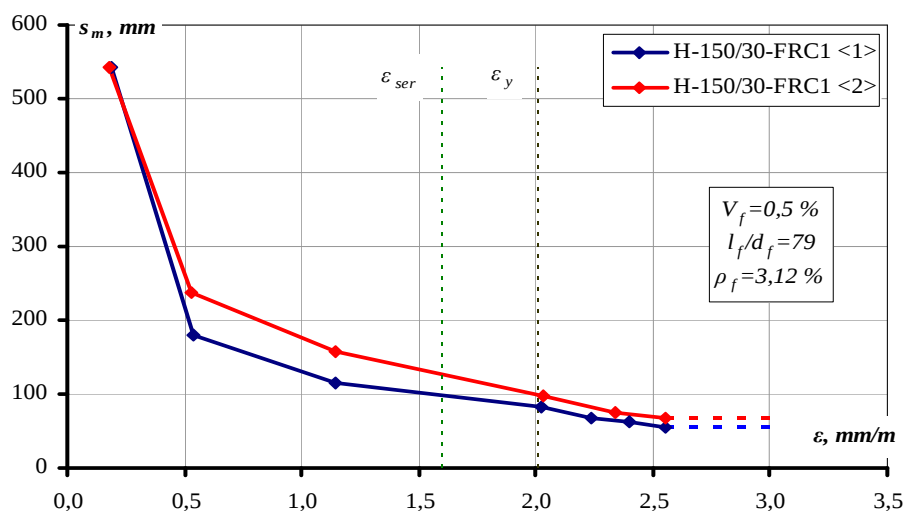
C.8 pav. H-80/10-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės (pagal
Deluce, 2011)



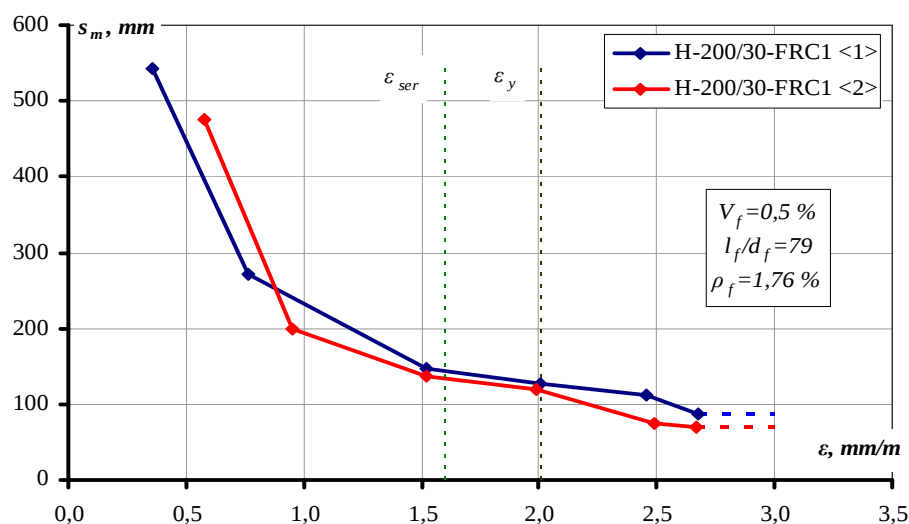
C.9 pav. H-100/20-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



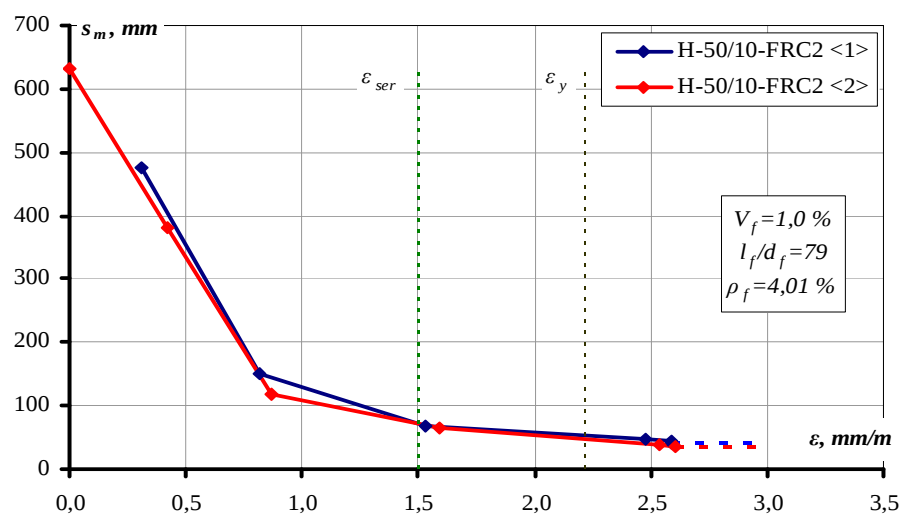
C.10 pav. H-150/20-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



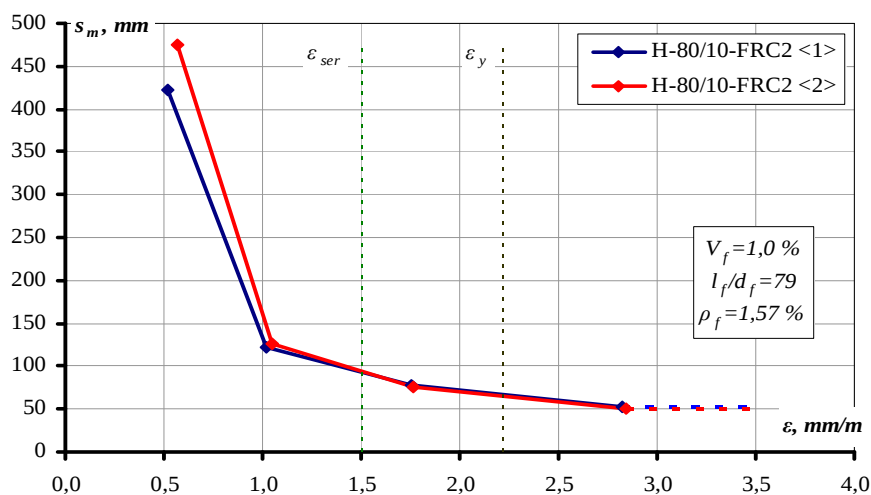
C.11 pav. H-150/30-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



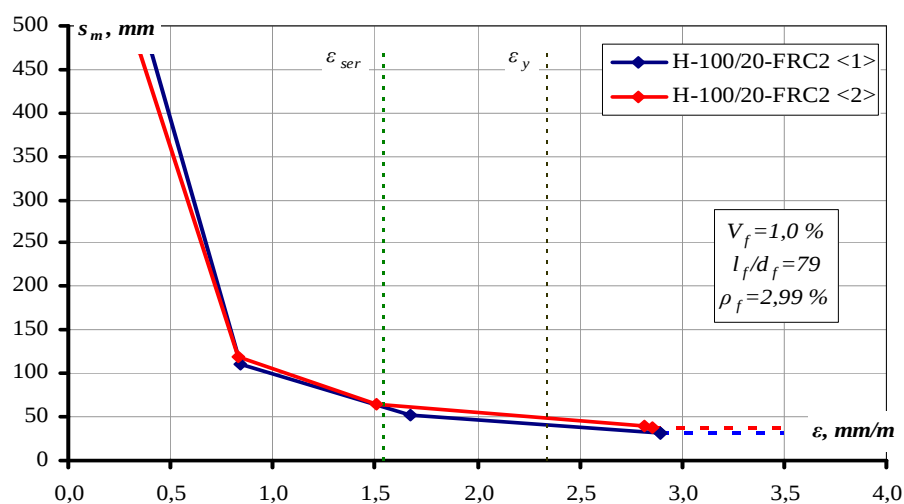
C.12 pav. H-200/30-FRC1 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



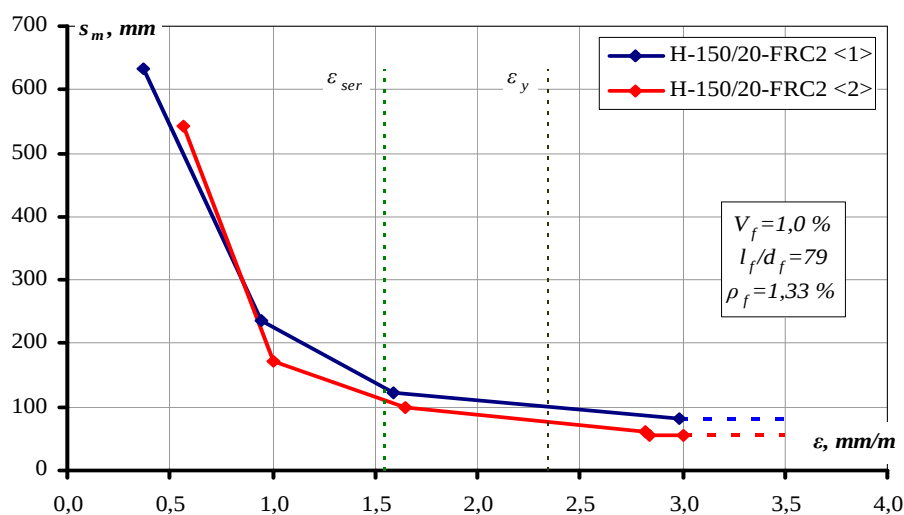
C.13 pav. H-50/10-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



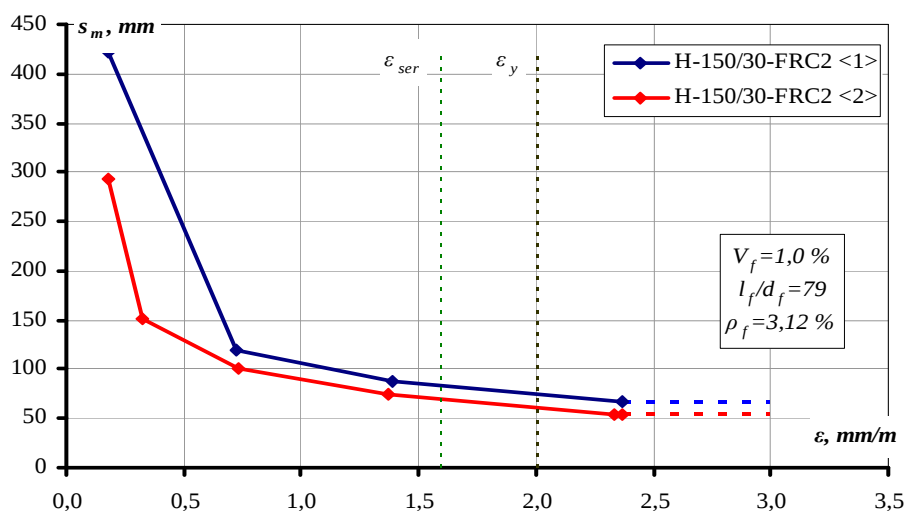
C.14 pav. H-80/10-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



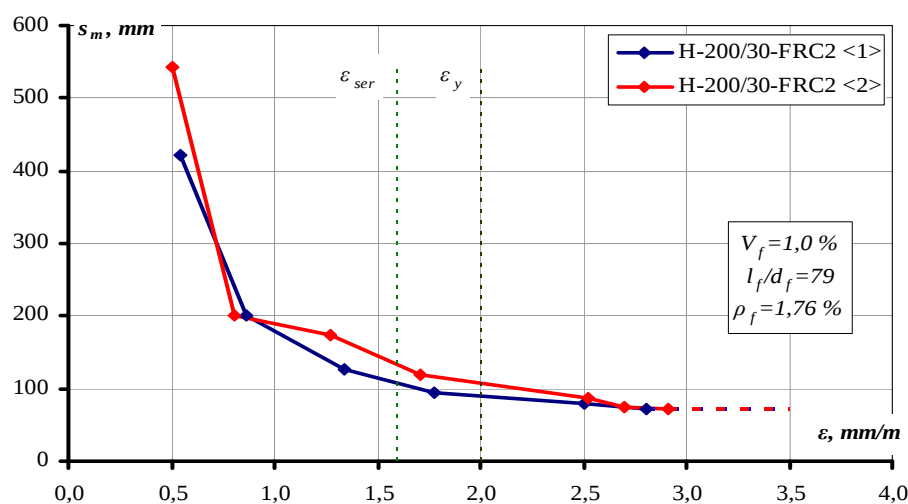
C.15 pav. H-100/20-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



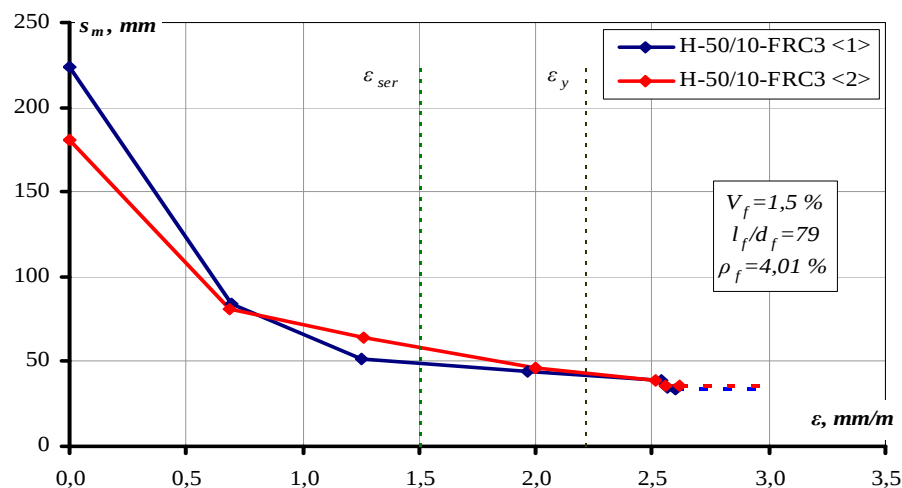
C.16 pav. H-150/20-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



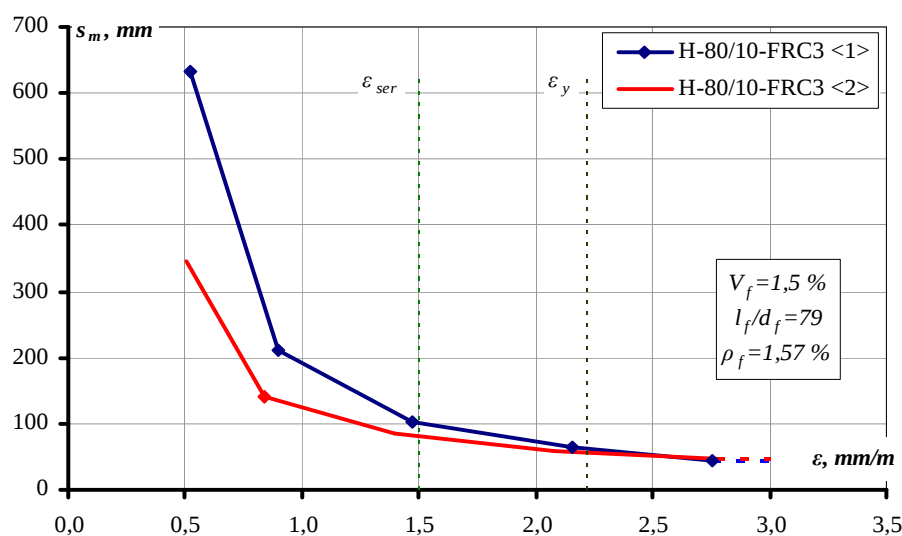
C.17 pav. H-150/30-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



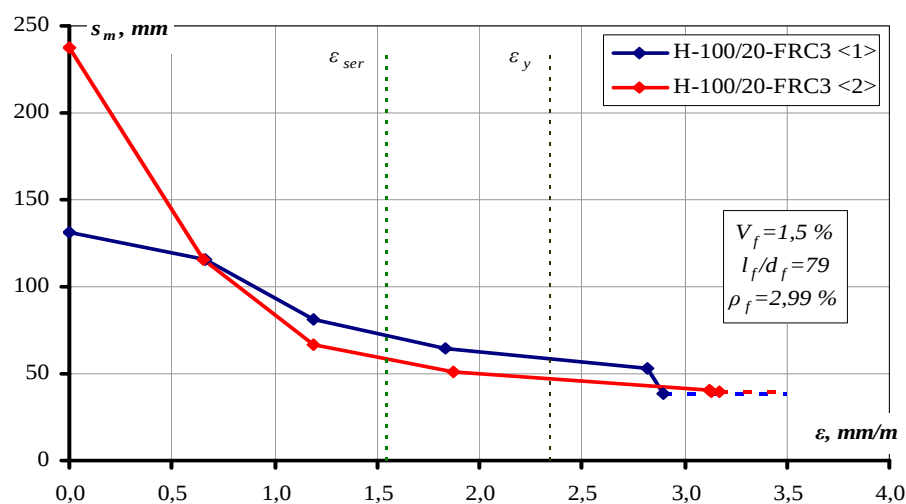
C.18 pav. H-200/30-FRC2 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



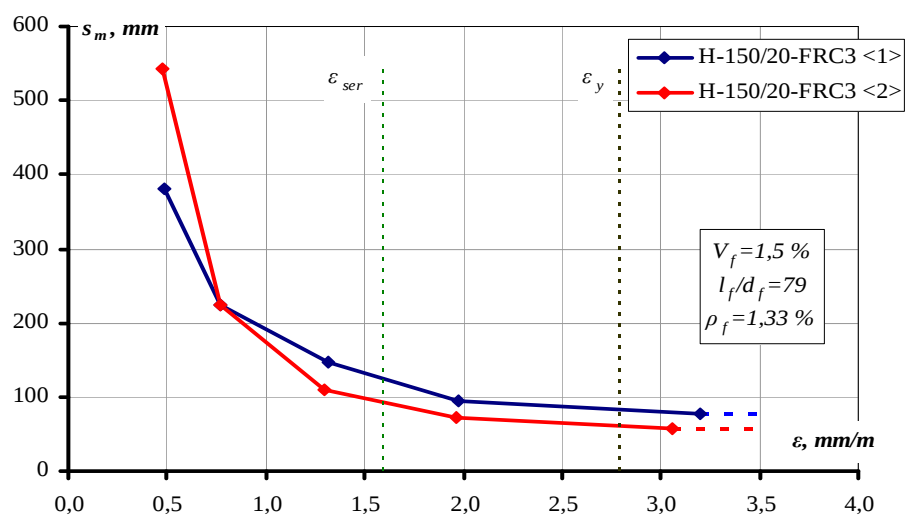
C.19 pav. H-50/10-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



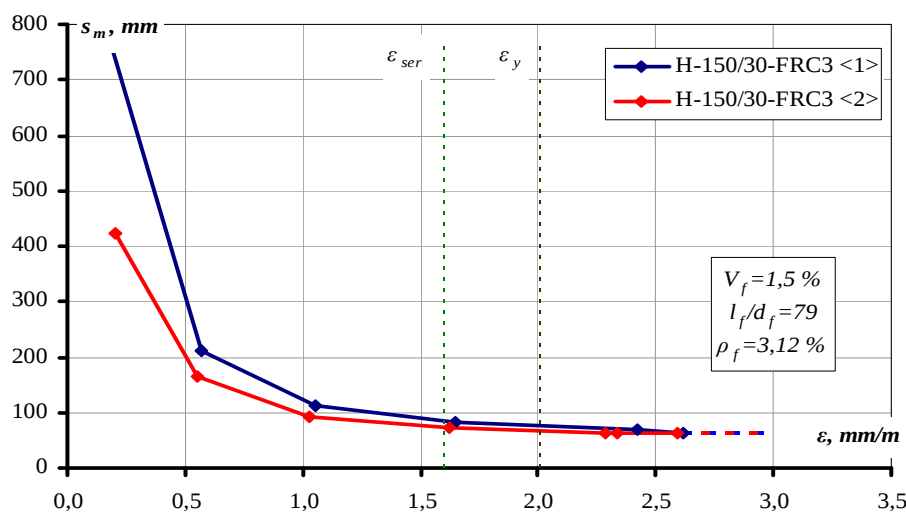
C.20 pav. H-80/10-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



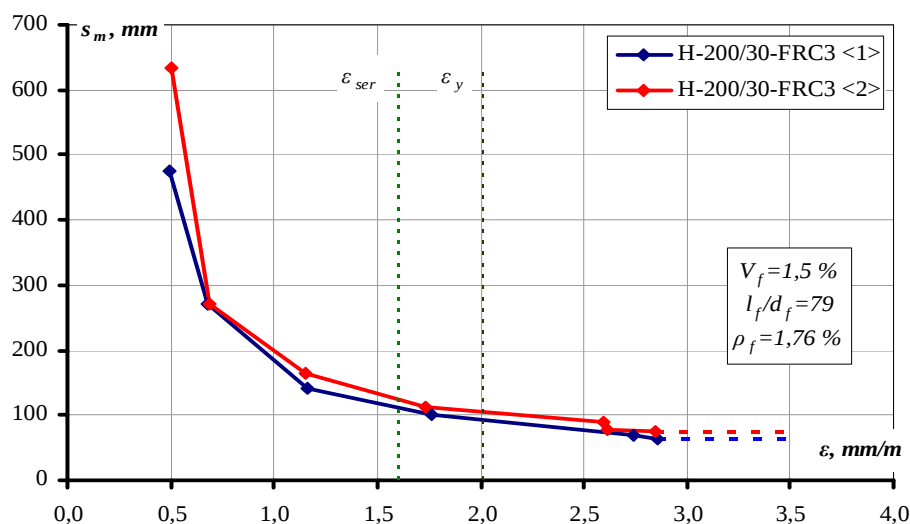
C.21 pav. H-100/20-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



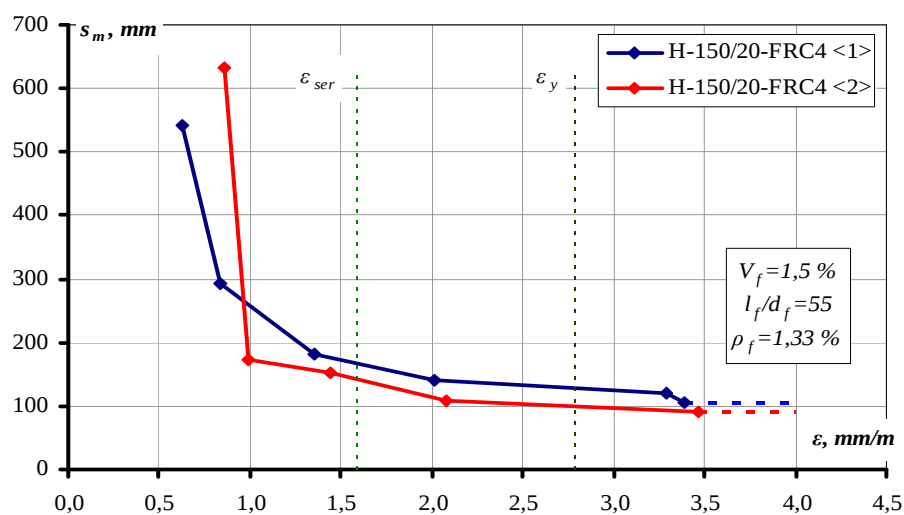
C.22 pav. H-150/20-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



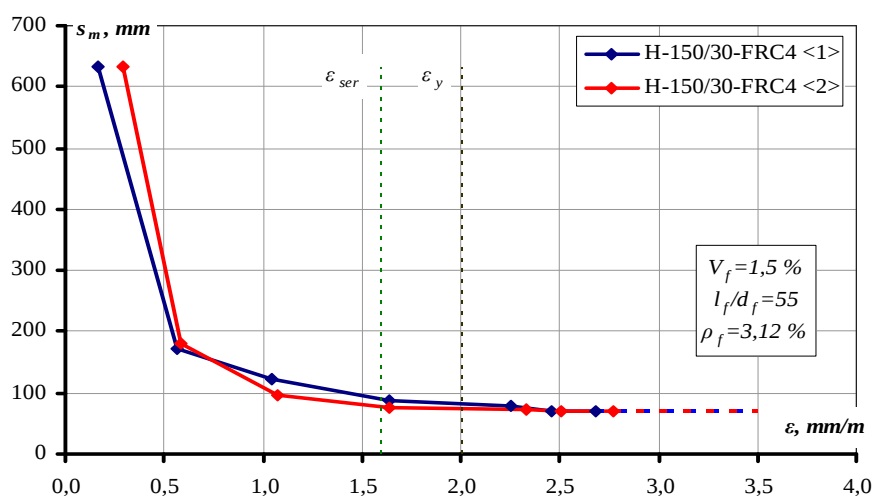
C.23 pav. H-150/30-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



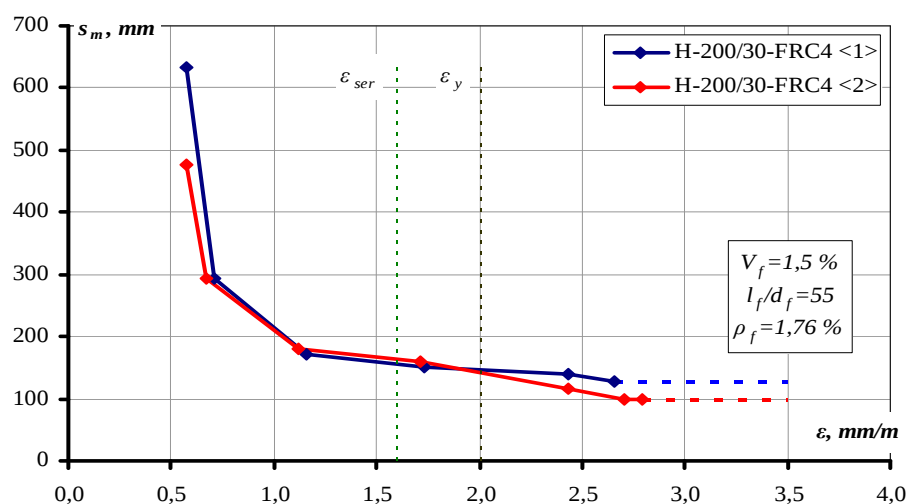
C.24 pav. H-200/30-FRC3 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



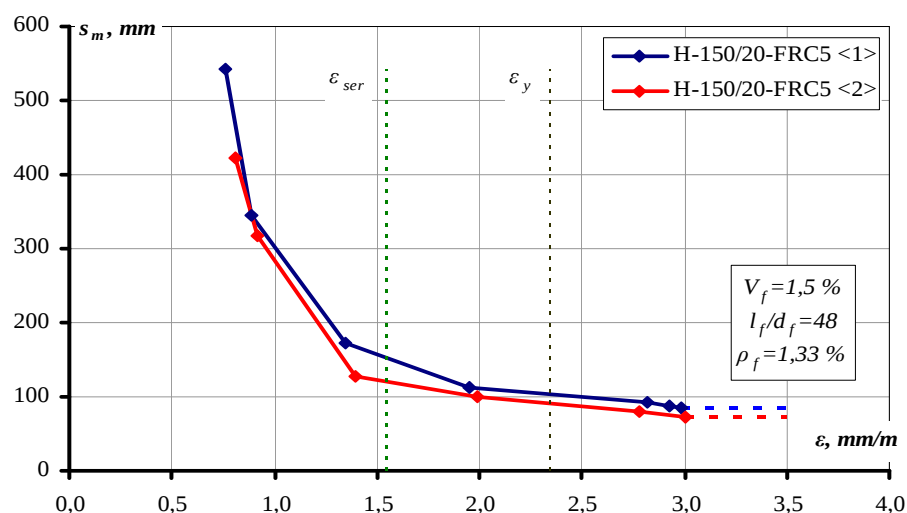
C.25 pav. H-150/20-FRC4 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



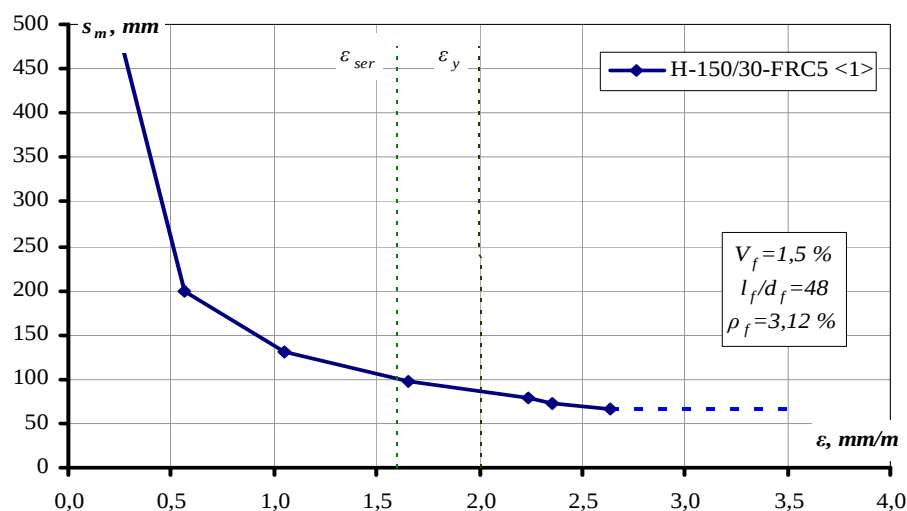
C.26 pav. H-150/30-FRC4 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



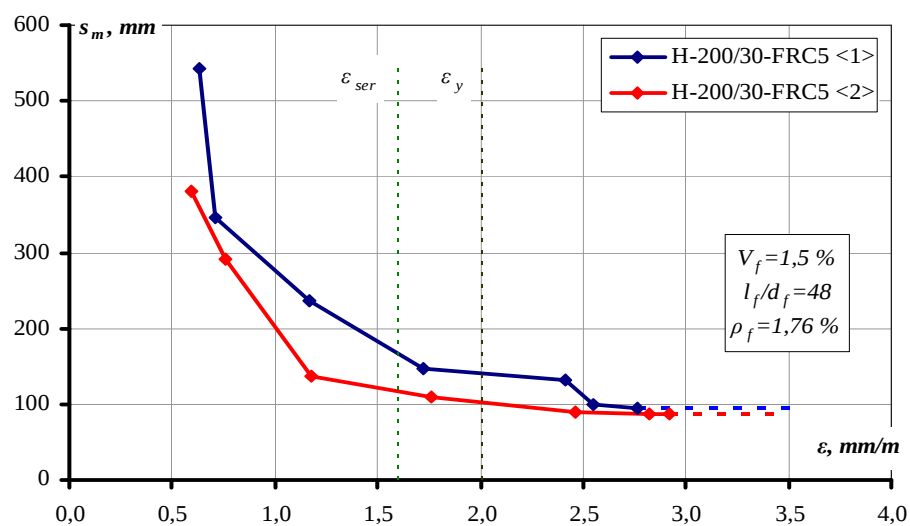
C.27 pav. H-200/30-FRC4 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



C.28 pav. H-150/20-FRC5 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)



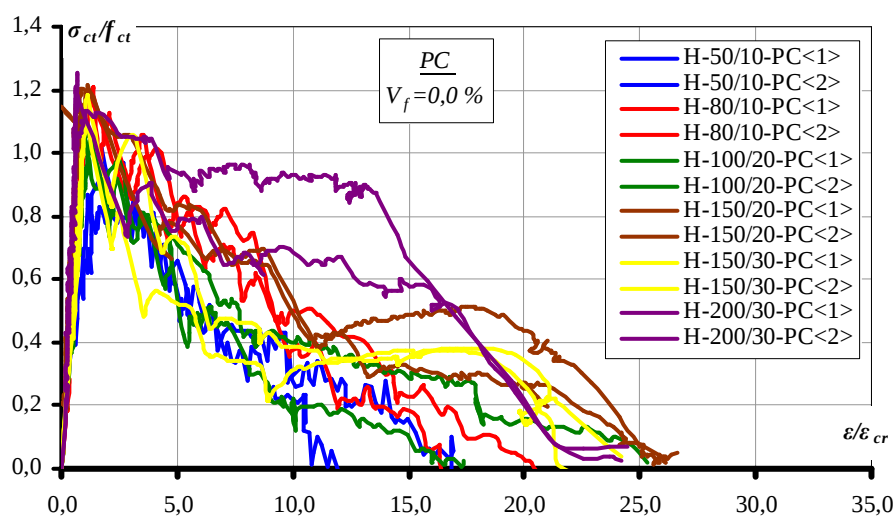
C.29 pav. H-150/30-FRC5 bandinio vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybė
(pagal Deluce, 2011)



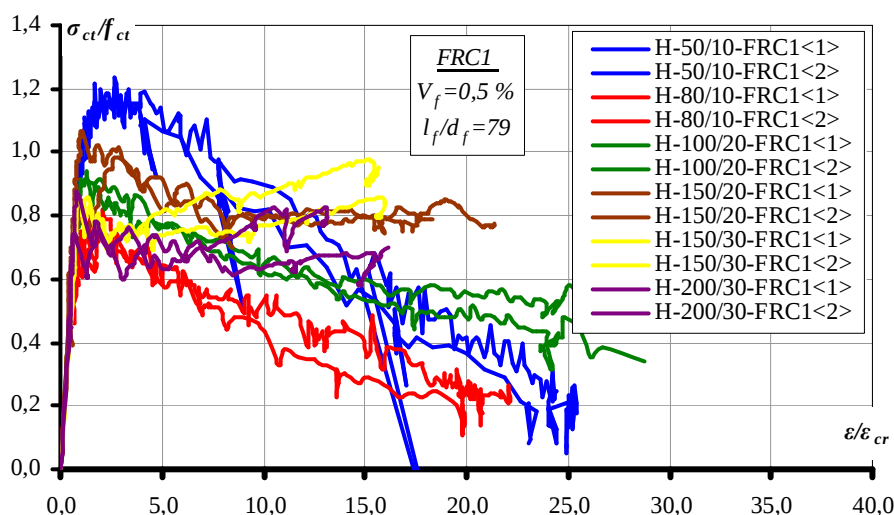
C.30 pav. H-200/30-FRC5 bandinių vidutinio atstumo tarp plyšių ir deformacijos priklausomybės
(pagal Deluce, 2011)

D priedas. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų normalizuotos priklausomybės

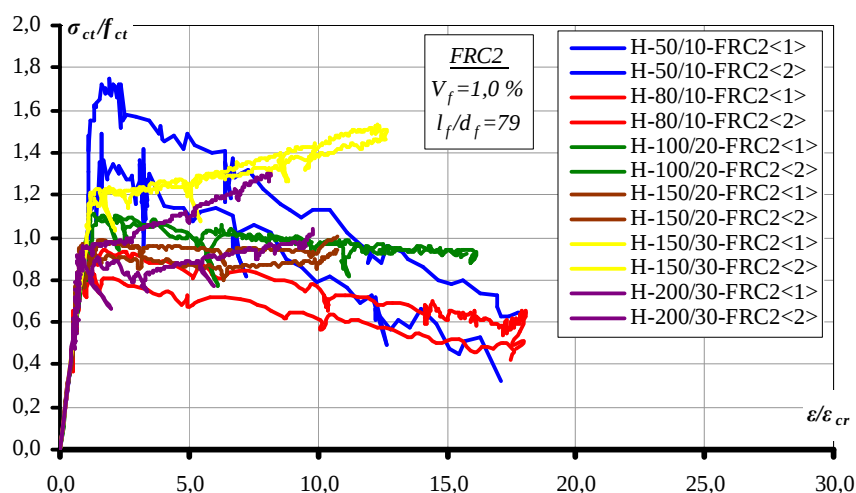
Šiame priede pateikiamos 3.2 poskyryje aprašytos, pagal B.2 priedo tempiamųjų gelžbetoninių prizmių kreives sudarytos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų normalizuotos priklausomybės. Sudarinėjant šiuos grafikus, apskaičiuotieji betono tempimo įtempiai σ_{ct} buvo padalinti iš tempiamojo stiprio f_{ct} . Kiekviename grafike identiškų bandinių kreivės žymimos viena spalva. Šios kreivės vaizduojamos iki armatūros takumo pradžios arba bandymo pabaigos, jei tai įvyko anksčiau.



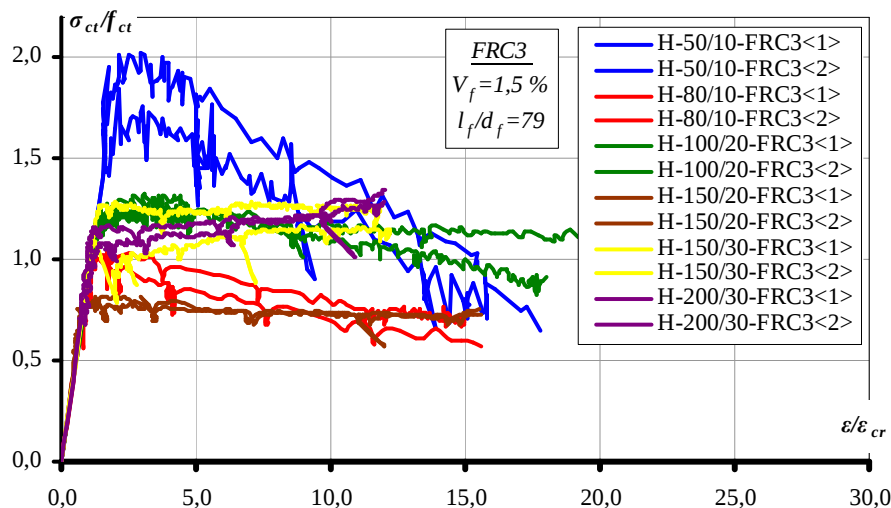
D.1 pav. PC betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



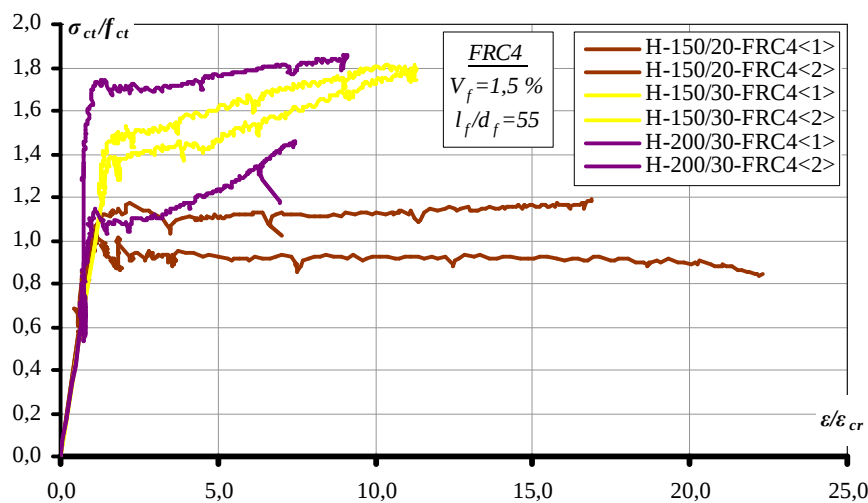
D.2 pav. FRC1 betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



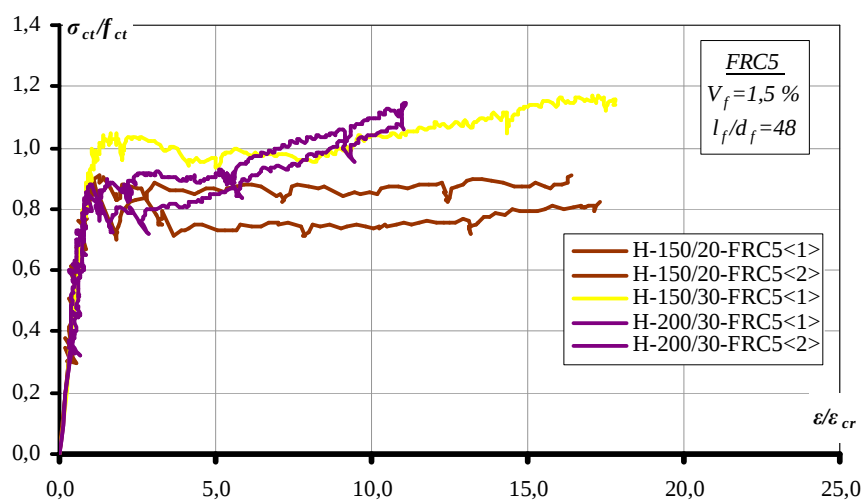
D.3 pav. FRC2 betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempimų ir deformacijos priklausomybės



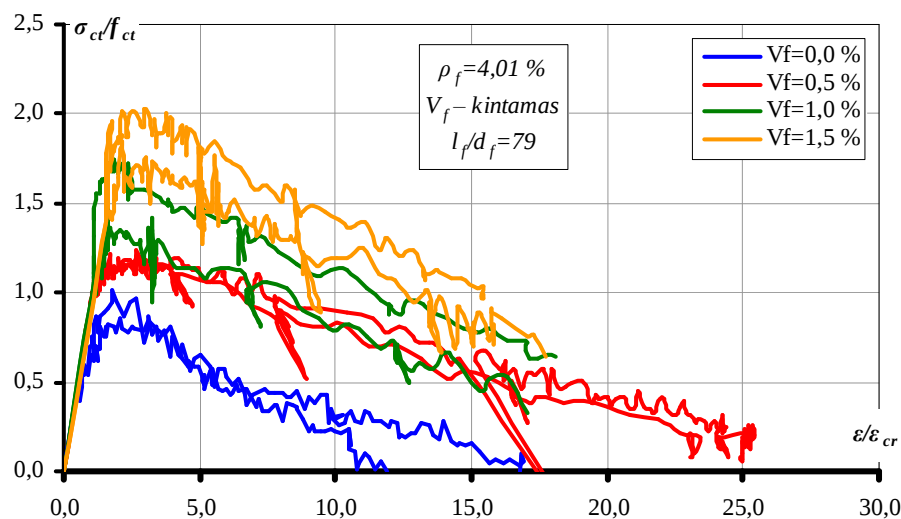
D.4 pav. FRC3 betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempimų ir deformacijos priklausomybės



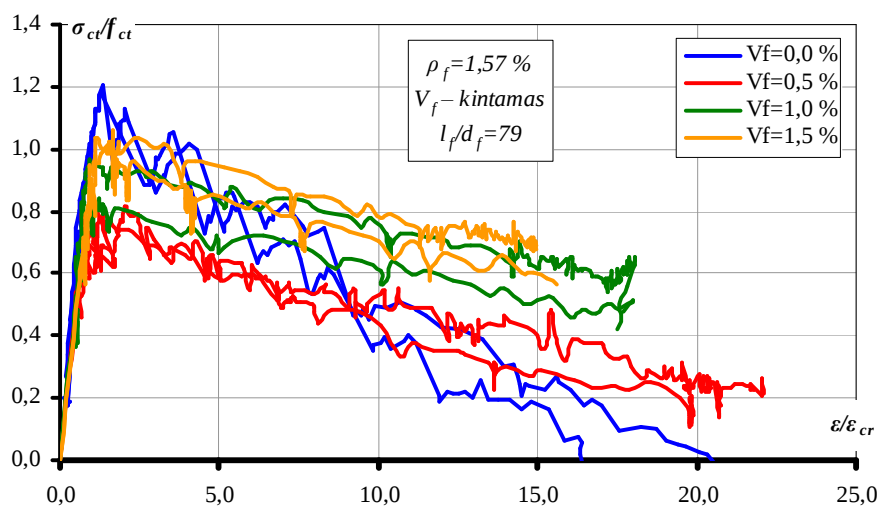
D.5 pav. FRC4 betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempimų ir deformacijos priklausomybės



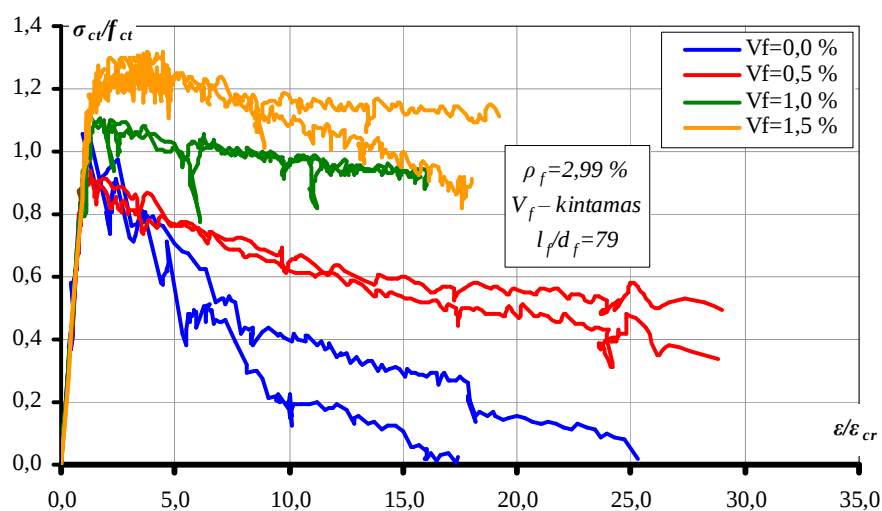
D.6 pav. FRC5 betono mišinio bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



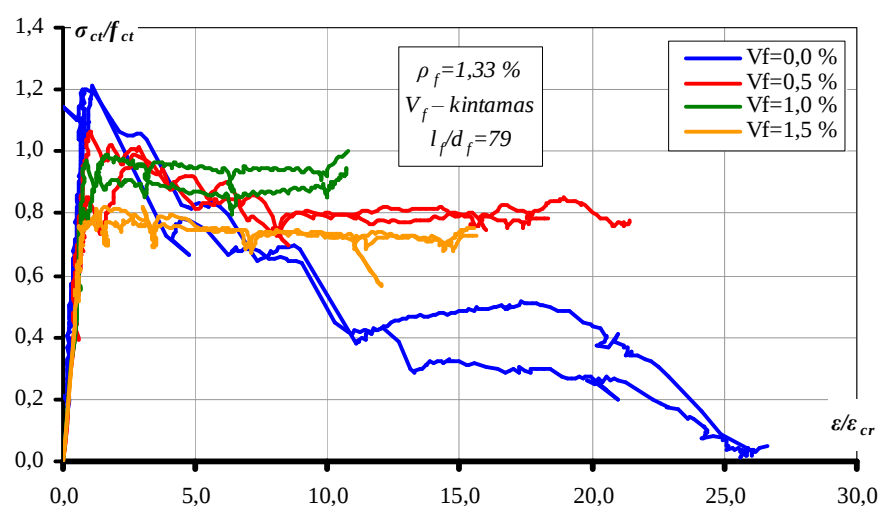
D.7 pav. H-50/10 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %



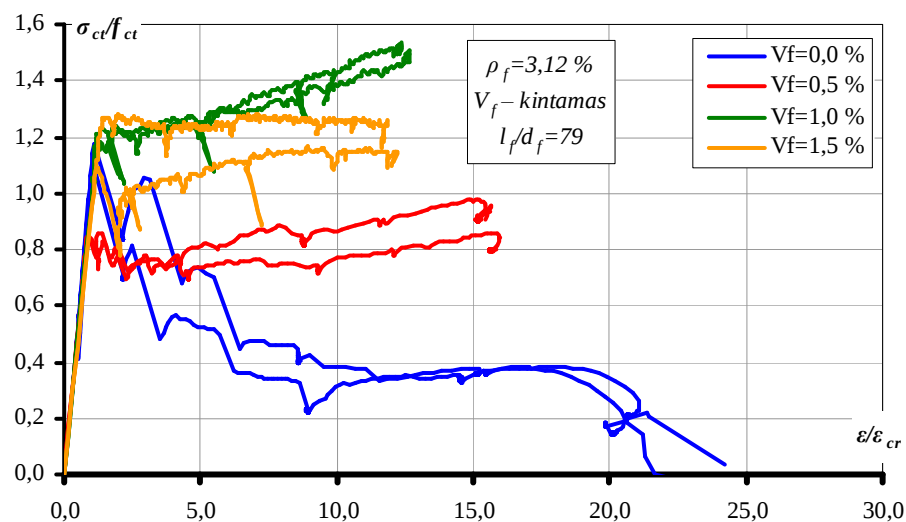
D.8 pav. H-80/10 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %



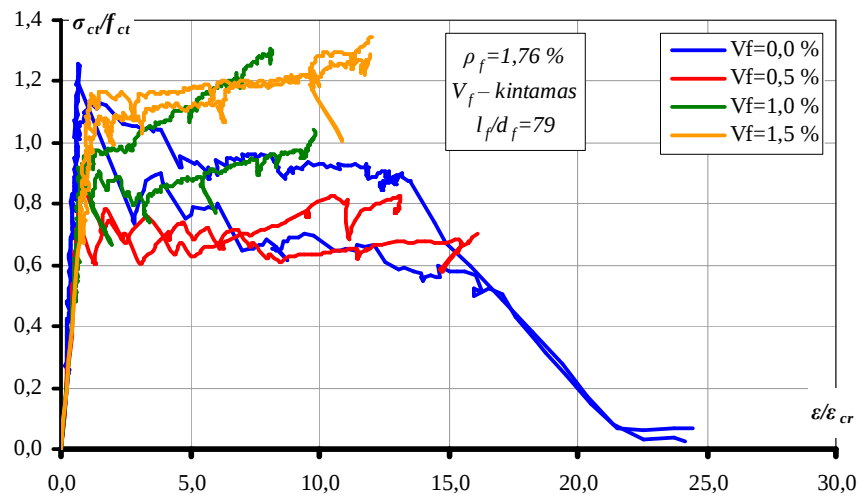
D.9 pav. H-100/20 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %



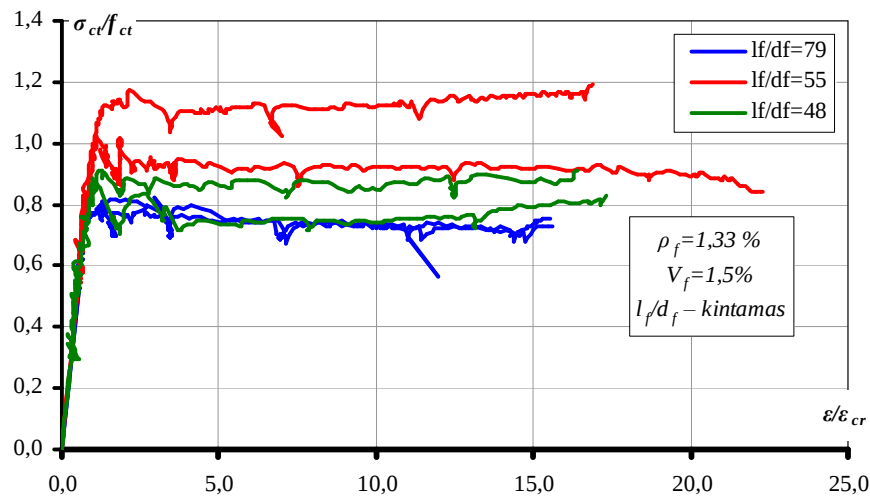
D.10 pav. H-150/20 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %



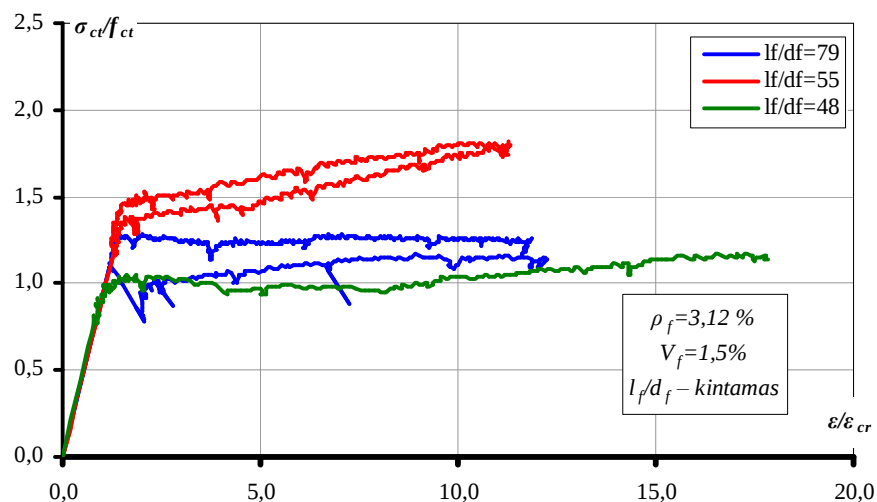
D.11 pav. H-150/30 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %



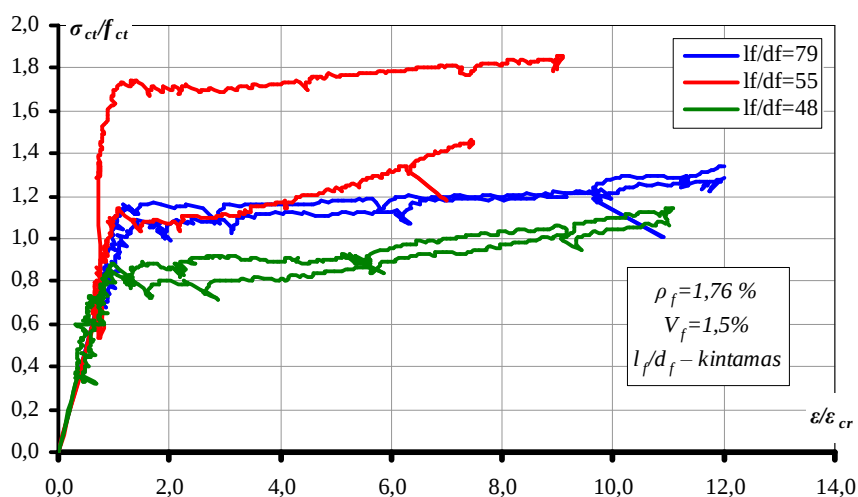
D.12 pav. H-200/30 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai V_f kinta nuo 0 iki 1,5 %



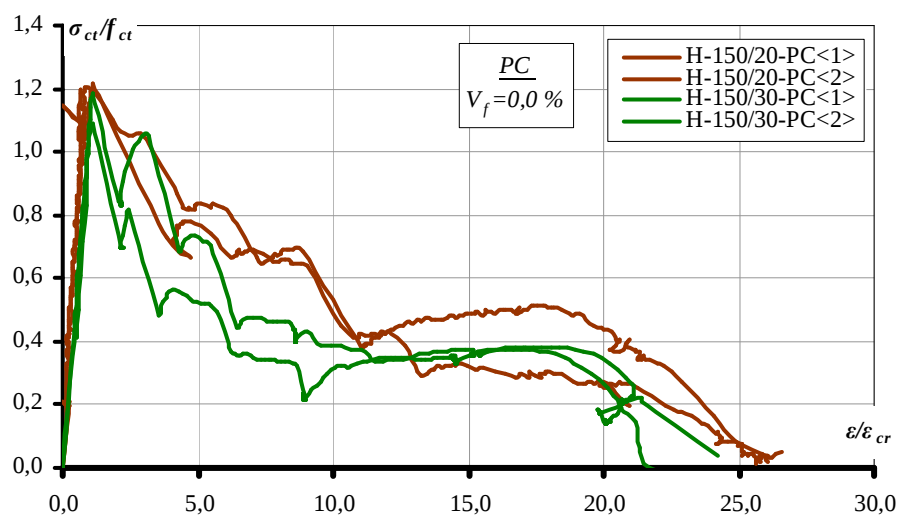
D.13 pav. H-150/20 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai l_f/d_f kinta nuo 48 iki 79



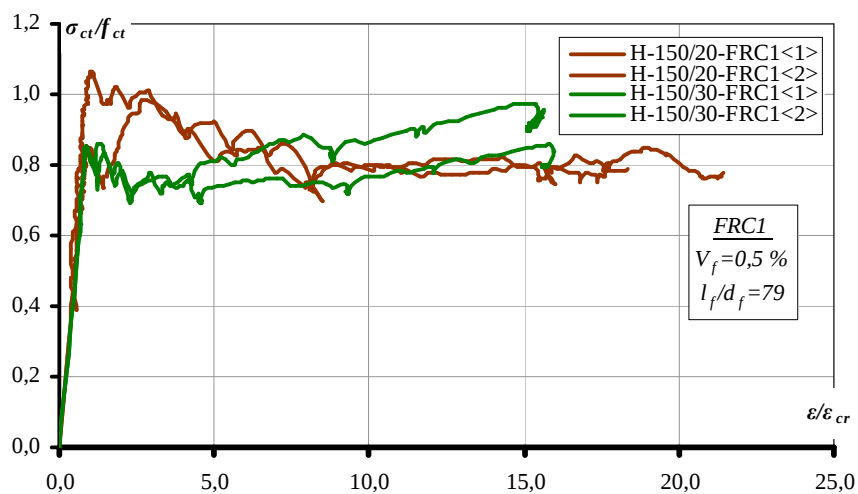
D.14 pav. H-150/30 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai l_f/d_f kinta nuo 48 iki 79



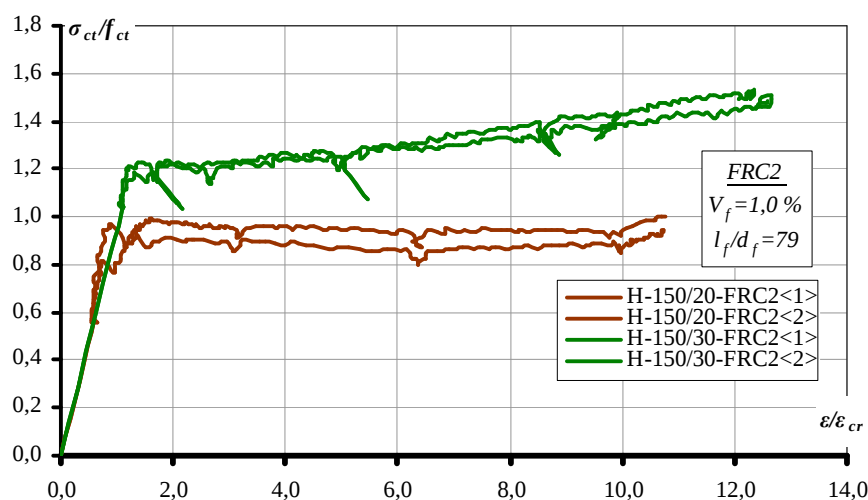
D.15 pav. H-200/30 bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės, kai l_f/d_f kinta nuo 48 iki 79



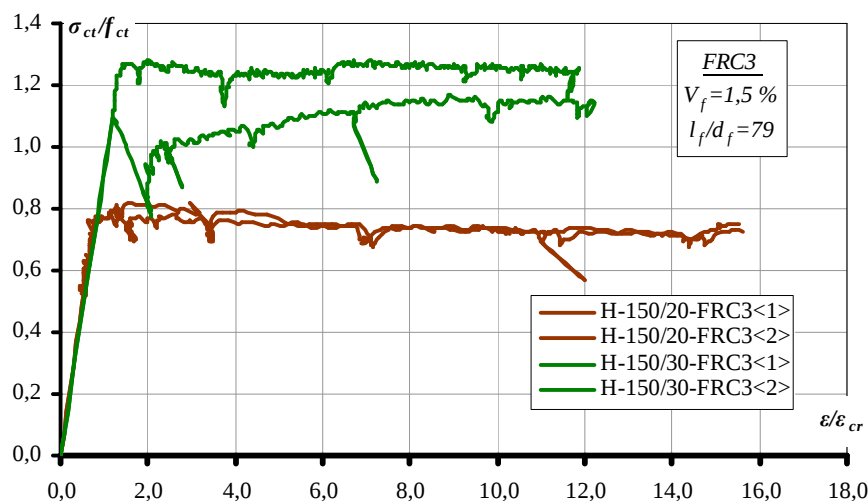
D.16 pav. PC betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33$ %) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12$ %) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



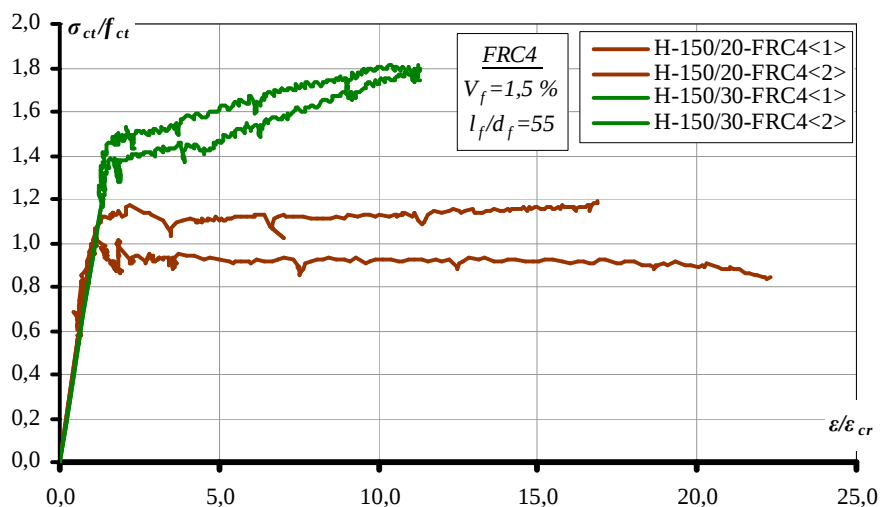
D.17 pav. FRC1 betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33$ %) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12$ %) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



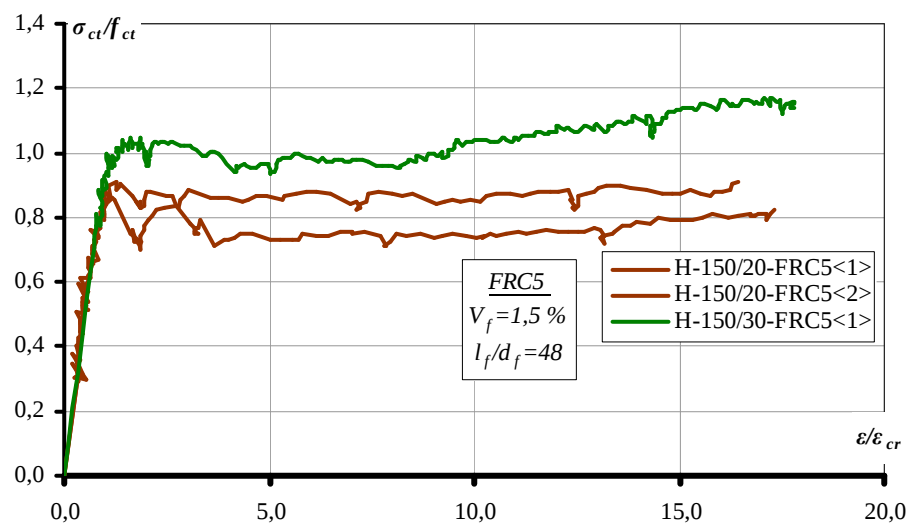
D.18 pav. FRC2 betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



D.19 pav. FRC3 betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



D.20 pav. FRC4 betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės



D.21 pav. FRC5 betono mišinio H-150/20 ($\rho_f=1,33\%$) ir H-150/30 ($\rho_f=3,12\%$) bandinių
normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijos priklausomybės