



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Paulius Eigertas

**MEDIENOS JUNGČIŲ, NAUDOJANT MEDSRAIGČIUS, ELGSENOS
TYRIMAS IR ANALIZĖ BEM**

**BEHAVIOUR AND FEM ANALYSIS OF TIMBER TO TIMBER JOINTS
USING SCREWS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2020-06-12

(Data)

Paulius Eigertas

**MEDIENOS JUNGČIŲ, NAUDOJANT MEDSRAIGČIUS, ELGSENOS
TYRIMAS IR ANALIZĖ BEM**

**BEHAVIOUR AND FEM ANALYSIS OF TIMBER TO TIMBER JOINTS
USING SCREWS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerija 02T studijų kryptis

Vadovas

doc. Tomas Gečys

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

(Parašas)

2020-06-11

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Lina Rutkienė

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

(Parašas)

(Data)

BD darbas peržiūrėtas lietuvių kalbos konsultantės
L. Rutkienės. Sigita Gribniak

(Parašas)

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2020-05-05

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2020 01 08...Nr. 001

Vilnius

Studentui (ei)Pauliui Eigertui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:Medienos jungčių, panaudojant medsraigčius, elgsenos tyrimas ir analizė BEM“.....

patvirtinta 2020 m. balandžio 24 d. dekanu potvarkiu Nr. 109st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2020 m. birželio 11 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

.....Atlikti ankstesnių tyrimų apžvalgą, kuriuose analizuojamos medienos jungtys panaudojant medsraigčius. Išanalizavus eksperimentinius tyrimus, naudojant baigtinių elementų programinį paketą sumodeliuoti medienos ir medsraigčio jungtį, atitinkančią eksperimentinę elgseną. Paanalizuoti skirtingus trinties modelius, leidžiančius įvertinti laikomosios galios pavidalą dėl medsraigčio ištraukiamosios laikomosios galios. Darbo pabaigoje suformuluoti išvadas.....

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: -

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

Vadovas
(Parašas)

.....dr. Tomas Gečys.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau
(Parašas)
Paulius Eigertas
(Vardas, pavardė)
2020-05-05
(Data)

SUTIKIMAS DĖL ASMENS DUOMENŲ NAUDOJIMO

2020-06-10

(Data)

Šiuo sutikimu aš, Paulius Eigertas (toliau – Duomenų subjektas) sutinku, kad Vilniaus Gedimino technikos universitetas, juridinio asmens kodas 111950243, adresas Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius (toliau – Duomenų valdytojas), tvarkytų mano asmens duomenis kitų studentų mokymosi tikslu. T. y. tvarkytų (*pažymėkite tinkamą*):

- ☐ vardą, pavardę, bakalauro baigiamąjį darbą;
- ☐ bakalauro baigiamąjį darbą, nenurodant vardo, pavardės;
- ☐ vardą, pavardę, magistro baigiamąjį darbą;
- ☒ magistro baigiamąjį darbą nenurodant vardo, pavardės.

Šiuo tikslu tvarkomų asmens duomenų Duomenų valdytojas neperduos jokiems tretiesiems asmenims, studentams su baigiamaisiais darbais bus leidžiama susipažinti vidinėje informacinėje sistemoje. Duomenų subjekto asmens duomenys šiuo tikslu bus naudojami ne ilgiau nei 5 metai.

Šiuo sutikimu Duomenų subjektas patvirtina, kad yra supažindintas su šiomis teisėmis:

- Susipažinti su savo duomenimis ir kaip jie yra tvarkomi (teisė susipažinti);
- Reikalauti ištaisyti arba, atsižvelgiant į asmens duomenų tvarkymo tikslus papildyti asmens neišsamius asmens duomenis (teisė ištaisyti);
- Savo duomenis sunaikinti arba sustabdyti savo duomenų tvarkymo veiksmus (išskyrus saugojimą) (teisė sunaikinti ir teisė „būti pamirštam“);
- Reikalauti, kad asmens duomenų valdytojas apribotų asmens duomenų tvarkymą (teisė apriboti);
- Teise į duomenų perkėlimą (teisė perkelti);
- Nesutikti, kad būtų tvarkomi asmens duomenys, kai šie duomenys tvarkomi ar ketinami tvarkyti kitais tikslais;
- Pateikti skundą Valstybinei duomenų apsaugos inspekcijai;

Duomenų subjektas turi teisę bet kuriuo metu atšaukti savo sutikimą.

Paulius Eigertas

[Duomenų subjekto vardas, ~~pavardė~~, parašas]

Duomenų valdytojo rekvizitai:
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Juridinio asmens kodas: 111950243
Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Tel. (8 5) 274 5030
Faks. (8 5) 270 0112
El. paštas: vgtu@vgtu.lt
PVM mokėtojo kodas: LT119502413
Duomenų apsaugos pareigūno tel. (8 5) 251 2191, el. paštas: dap@vgtu.lt

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius Eigertas, 20146737

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, LŠKfm-18

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

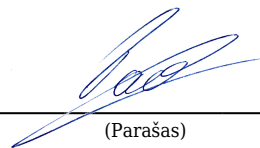
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2020 m. birželio 08 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Medienos jungčių, naudojant medsraigčius elgsenos tyrimas ir analizė BEM“ patvirtintas 2020 m. balandžio 24 d. dekanų potvarkiu Nr. 109st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas daktaras Tomas Gečys.

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



(Parašas)

Paulius Eigertas
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Medienos jungčių, naudojant medsraigčius elgsenos tyrimas ir analizė BEM
Autorius	Paulius Eigertas
Vadovas	Tomas Gečys
Kalba: lietuvių	
Anotacija Medinių jungčių naudojant sraigtus laikomosios galios skaičiavimai, kol kas, nėra plačiai išvystyti, atlikta nedaug tyrimų nagrinėjant šias jungtis, todėl šiame darbe analizuojami šio tipo jungčių teoriniai skaičiavimai bei pasitelkiama analizė baigtiniais elementais. Išanalizuota mokslinė literatūra, mokslininkų atlikti laboratoriniai tyrimai, siekiant nustatyti tiriamojo objekto elgseną, laikomąją galią, pagrindinius komponentus jungtyje. Apžvelgtos medinių konstrukcijų 3D modeliavimo galimybės, pasitelkiant baigtinius elementus. Apibendrinti jungties irties būdai, nustatyti laboratoriniais tyrimais. Tiriamojoje dalyje išnagrinėta laikomosios galios ir standumo skaičiavimo metodika, pateikta Eurokode 5 bei apžvelgiama Trento universiteto mokslininkų pasiūlyta skaičiavimo metodika šioms jungtims. Eksperimentinėje dalyje, pasirinkus vieną iš laboratoriniuose tyrimuose aprašytų jungčių, atliktas modeliavimas 3D baigtiniais elementais. Siekiant kuo tiksliau atkartoti tikrąją jungties elgseną, detalai aprašant programinio paketo galimybes, pritaikomas prielaidas bei supaprastinimus. BEM modelio ir teorinių skaičiavimų rezultatai palyginti su laboratorinių tyrimų rezultatais. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, ankstesnių laboratorinių tyrimų analizė, teoriniai skaičiavimai, tiramoji dalis, rezultatų palyginimas, baigiamosios išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 65 p. teksto, 52 paveikslai, 7 lentelės, 21 bibliografinis šaltinis.	
Prasminiai žodžiai: medinė jungtis, medsraigčiai, baigtinių elementų modelis, teoriniai skaičiavimai.	

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Steel and Composite Structures

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

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

Title	Behaviour and Fem Analysis of Timber to Timber Joints Using Screws
-------	---

Author	Paulius Eigertas
--------	-------------------------

Academic supervisor **Tomas Gečys**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

Calculations of load-bearing capacity of wooden joints using screws have not been widely developed so far, little research has been done on these joints, therefore this work analyses the theoretical calculations of this type of joints and uses finite element method. The scientific literature, laboratory tests performed by scientists were researched in order to understand the behaviour, load bearing capacity, main components of the joint. Deep look was taken on 3D modelling of wooden structures using finite elements method. The failure types of joint determined by laboratory tests are summarized. The research part examines the calculation methodology of bearing capacity and stiffness, presented in Eurocode 5, and reviews the calculation methodology proposed by the researchers of the University of Trent for these joints. In the experimental part, modelling with 3D finite elements was performed by selecting one of the connections described in the laboratory studies. In order to simulate the actual connection behaviour as accurately as possible, the assumptions and simplifications are applied in a detailed description of the software package's capabilities. The results of the FEM model and theoretical calculations are compared with the results of laboratory tests.

Structure: introduction, analysis of previous research, theoretical calculations, research part, comparison of results, conclusion, literature list.

Thesis consist of: 65 p. text, 52 pictures, 7 tables, 21 bibliographical entries

Keywords: timber joint, wood screw, finite element analysis, theoretical calculations.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
ĮVADAS.....	12
1. ANKSTESNIŲ LABORATORINIŲ, SKAITINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ	14
1.1.1. Medinėse konstrukcijose naudojami mazgai	14
1.1.2. Mazgų standumas.....	15
1.1.3. Sraigtinių jungčių tyrimų aktualumas	17
1.2. Laboratoriniai jungčių tyrimai	17
1.2.1. Bandymas Nr. 1.....	17
1.2.2. Bandymas Nr. 2.....	24
1.2.3. Bandymas Nr. 3.....	28
1.3. 3D analizė naudojant baigtinius elementus.....	31
1.4. Pirmojo skyriaus išvados.....	33
2. MEDINĖS JUNGTIES TEORINIAI SKAIČIAVIMAI.....	34
2.1. Skaičiavimai remiantis Euro kodu 5	34
2.2. Alternatyvi jungties skaičiavimo metodika.....	37
2.3. Antrojo skyriaus išvados	41
3. JUNGTIES MODELIAVIMAS 3D BAIGTINIAIS ELEMENTAIS	42
3.1. Modeliuojamų bandinių geometrija	42
3.2. Medžiagų modeliai.....	42
3.3. Plieninis medisraigtis, medžiagos charakteristikos.....	43
3.4. Mediniai elementai, medžiagos charakteristikos	44
3.5. Baigtinių elementų tinklelis	46
3.6. Simetrijos sąlygos	49
3.7. Apkrova bei įtvirtinimas	50
3.8. Kontaktų aprašymas.....	51
3.9. Analizės parametrai.....	53
3.10 Analizės rezultatai.....	53
3.11 Trečiojo skyriaus išvados.....	58
4. TIRIAMOSIOS JUNGTIES ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ BEI MODELIAVIMO PALYGINIMAS SU LABORATORINIAIS REZULTATAIS	59
4.1. Jungties elgsenos palyginimas tarp laboratoriniais tyrimais tirtosios ir BEM gautosios	59
4.2. Laikomosios galios palyginimas	62
IŠVADOS IR SIŪLYMAI.....	63
LITERATŪROS SĄRAŠAS	64

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Plieniniai tvirtikliai (Valentinavičius ir Valiūnas, 2000).....	14
2 pav. Elementų jungtys naudojant medsraigčius („Rothoblaas“,2020)	15
3 pav. Tvirtinimo elementai: a) sraigtai, b) vinys (Gečys, Bader, Olsson ir Kajėnas, 2019).....	18
4 pav. Charakteristinio ašinio stiprio bei takumo lekiamojo momento bandymai (Gečys et al., 2019)	20
5 pav. Bandymuose naudotos jungtys, tvirtinimo elementų sriegimo pozicijos, bandymų eiga (Gečys et al., 2019)	21
6 pav. Charakteristinis ašinis stipris, takumo momentas (Gečys et al., 2019)	22
7 pav. Vidutinės jungties jėgos - poslinkio kreivės (Gečys et al., 2019).....	22
8 pav. Vidutinės jungties jėgos - poslinkio kreivės, vienam varžtui (Gečys et al., 2019).....	23
9 pav. Bandinių skerspjūviai po jungties irties (Gečys et al., 2019)	23
10 pav. Bandymų schema (Tomasi et al., 2010)	24
11 pav. Bandymuose naudoti varžtai (Tomasi et al. 2010)	25
12 pav. Bandymų variacijos schema (Tomasi et al., 2010).....	26
13 pav. Bandinių grupės (Tomasi et al., 2010).....	26
14 pav. Tvirtinimo elementų išdėstymo reikalavimai EC5 (Tomasi et al., 2010).....	27
15 pav. Bandymo rezultatai F-v kreivė 1, 2 grupė (Tomasi et al., 2010).....	28
16 pav. Bandymo rezultatai F-v kreivė 3, 4 grupė (Tomasi et al., 2010).....	28
17 pav. Bandyme naudotos medienos charakteristikos (Schiro et al., 2010)	29
18 pav. Tvirtinimo elementų tipai, panaudoti bandymo metu (Schiro et al., 2010).....	29
19 pav. Tyrime naudotų varžtų geometrija ir charakteristikos (Schiro et al., 2010).....	29
20 pav. Bandinių geometrija ir laboratorijos įranga (Schiro et al., 2010)	30
21 pav. Bandymo rezultatai, kairėje naudojant dvigubą sriegio sraigtus, dešinėje viengubą sriegio sraigtus (Schiro et al., 2010)	30
22 pav. Modeliuojama jungtis: 1 – klijuotos medienos elementas; 2 – plieninė detalė; 3 – jungiamieji varžtai tempiamoje zonoje; 4 – varžtai įrengiami montavimo metu; 5 – užpildas tarp plieno ir medienos (Gečys et al., 2015)	31
23 pav. 3D modelis (Gečys et al., 2015)	32
24 pav. Veikiančių jėgų schema (Tomasi et al., 2010).....	34
25 pav. Poslinkių schema (Tomasi et al., 2010).....	39
26 pav. Poveikiai jungtyje (Tomasi et al., 2010).....	39
27 pav. Modeliuojamos jungties S geometrija	42
29 pav. Plieno įtempių ir deformacijų kreivė	44

29 pav. Elemento ortotropinių charakteristinių savybių ašys.....	46
30 pav. Linijinis baigtinis elementas (Dassault Systemes, 2020).....	46
31 pav. Parabolinis baigtinis elementas (Dassault Systemes, 2020)	47
32 pav. Detalus 3D medsraigčio modelis	47
33 pav. Supaprastintas medsraigčio modelis.....	47
34 pav. Medsraigčio baigtinių elementų tinklelis.....	48
35 pav. Medinis elementas, tinklelis	48
36 pav. Jungties BEM tinklelis, pjūvis per sraigtų plokštumą	49
37 pav. Simetrijos sąlygos	50
38 pav. Bandinio įtvirtinimas. Kairėje standus apačios įtvirtinimas, dešinėje viršuje pridėtas poslinkis	51
39 pav. Bandinio kontaktai.....	52
40 pav. S5 jungties deformacijos.....	53
42 pav. S6 jungties deformacijos.....	54
42 pav. S4 jungties deformacijos.....	54
43 pav. S5 Sy normaliniai įtempiai	55
44 pav. S6 Sy normaliniai įtempiai	55
45 pav. S4 Sy normaliniai įtempiai	55
46 pav. BEM modelio apkrovos ir poslinkio kreivės	56
47 pav. Tvirtinimo elementas S4, vonMises įtempiai MPa.....	57
48 pav. Kairėje BEM modelio Sy įtempiai.....	57
49 pav. 3D modelio Sy įtempiai mediniame elemente.....	59
50 pav. Kairėje BEM modelio Sy įtempiai, mėlyna spalva – gniuždomoji zona, raudona spalva tempiamoji zona. Dešinėje pavaizduota viena iš galimų irties formų (Tomasi et al., 2010).....	60
51 pav. Varžto deformacijos palyginimas su realia elgsena (Tomasi et al., 2010)	60
52 pav. Modeliuojamos jungties apkrovos ir deformacijų kreivių palyginimas su laboratorinių tyrimų rezultatais (Tomasi et al., 2010)	61

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Mazgų grupės pagal standumo sąlygas (Gečys, 2011)	16
2 lentelė. Mazgų grupės pagal stiprumo sąlygą (Gečys, 2011)	16
3 lentelė. Eurokode 5 pateikiamos standumo reikšmės (LST EN 1995-1-1:2005)	37
4 lentelė. Tvirtinimo elementų charakteristikos	43
5 lentelė. Medinių elementų charakteristikos	45
6 lentelė. BEM analizės variacijos	53
7 lentelė. Laikomoji galia, nustatyta skirtingais metodais	62

IVADAS

Pastaruoju metu Europoje vis labiau pradedama rūpintis aplinkos tarša, todėl ir statybos sektoriuje stengiamasi naudoti ekologiškas, mažai aplinkai kenksmingas medžiagas. Dėl šios priežasties dažnai pasirenkamos medinės konstrukcijos, jų panaudojimo galimybės taip pat išaugo. Projektuojami sudėtingi daugiaaukščiai pastatai, didelių tarpatramių rėmai, unikalūs tiltai. Galima teigti, kad medinių konstrukcijų analizė ir tolesnis jų elgsenos supratimas yra aktualūs.

Mazgų charakteristikų skaičiavimas yra viena sudedamųjų medinių rėminių konstrukcijų projektavimo dalių. Siekiant gauti tikslesnius rėminių konstrukcijų elgsenos rezultatus ir suprojektuoti efektyvesnes konstrukcijas, statiniuose skaičiavimuose turi būti įvertintos tikrosios mazgų charakteristikos. Tik įvertinę tikrąją mazgų elgseną galime gauti tikslesnius konstrukcijos elgsenos rezultatus, t. y. galime tiksliau suskaičiuoti rėminės konstrukcijos poslinkius ir rėminės konstrukcijos elementuose susidarančias įrašas. Šiuo metu projektuotojai jau naudoja kompiuterines skaičiavimo programas, kuriomis galima įvertinti mazgų pasidudamumą. Šiose programose pasidudantis mazgas gali būti aprašomas pasisukamuoju ar ašiniu standumu. Skaičiuojant rėminių konstrukcijų mazgų, kuriuose atsiranda reikšmingo dydžio ašinės jėgos, charakteristikas, būtina įvertinti ne tik lenkiamojo momento, bet ir ašinės jėgos poveikį. Tai yra nelengvas uždavinys, nes rėminės konstrukcijos elementų skerspjuviai priklauso nuo mazgų charakteristikų, o mazgų charakteristikos – nuo elementų skerspjuvių ir paties mazgo geometrijos bei medžiagos savybių. Parenkant rėminės konstrukcijos elementų skerspjuvius ir mazgus, skaičiavimus reikia atlikti priartėjimo būdu. Vienas dažniausiai sutinkamų tvirtinimo būdų, tai meddraigtinės jungtys, kurių populiarumą lemia nesudėtingas įrengimas statybvietyje ar gamykloje. Auganti paklausa daro įtaką ir gamintojams, kurie nuolatos rinkai pristato naujus gaminius, kai pavyzdžiui dvigubo sriegio meddraigčiai. Populiarėjančios naujo tipo konstrukcijos, kaip klijuotosios medienos plokštės, taip pat, reikalauja naujų tvirtinimo sprendinių. Kalbant apie pastatų renovaciją, meddraigčiai dažnai naudojami konstrukcijų stiprinime. Taigi, atsirandantys nauji sprendiniai ir produktai, sukuria iššūkius projektavimui, nes ne visos atsirandančios naujos situacijos yra iš karto aptariamose projektavimo normose ar techniniuose liudijimuose, norint išsiskirti rinkoje būtina ieškoti patikimų projektavimo būdų, kaip pavyzdžiui realią elgseną atkartojantys skaitiniai modeliai.

Šiame darbe tyrimų objektu pasirinkta medinio mazgo konstrukcija. Darbe nagrinėsime, kaip baigtinių elementų metodu modeliuojamo mazgo elgsena atitinka laboratoriniai tyrimais nustatytą mazgo elgseną standumas lemia jo elgseną bei įrašų pasiskirstymą. Aptarsime skirtingus įtempių aprašymo modelius.

Darbo tikslas – atlikti pasirinktos jungties modeliavimą 3D aplinkoje, pasitelkiant baigtinių elementų metodą, ir palyginti su realios jungties bandymų rezultatais.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti ankstesnių tyrimų, susijusių su darbo tema, apžvalgą.
- Apskaičiuoti pasirinktosios jungties teorinę laikomąją galią bei standumą.
- Remiantis atliktais laboratoriniais tyrimais, parengti pasirinktos jungties 3D modelį analizei baigtiniais elementais.
- Išanalizuoti gautus rezultatus iš laboratorinių tyrimų, teorinių skaičiavimų bei BEM analizės.

Darbo praktinė vertė.

- Palyginta teorinių skaičiavimų metodiką su laboratoriniais tyrimais leidžia nustatyti atsargos dydį jungčiai.
- Atlikus modeliavimą baigtiniais elementais ir sukalibravus jo elgseną, artimą laboratoriniams tyrimams, galima modelį panaudoti kitoms jungčių variacijoms analizuoti neatliekant papildomų realių bandymų.

1. ANKSTESNIŲ LABORATORINIŲ, SKAITINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ

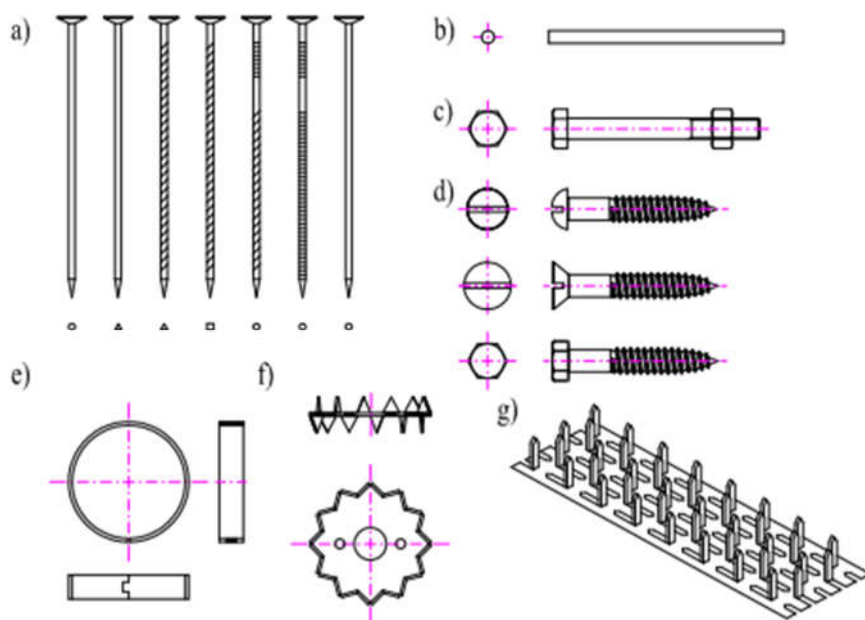
1.1.1. Medinėse konstrukcijose naudojami mazgai

Medinių konstrukcijų laikomoji galia ir ilgaamžiškumas daugiausiai priklauso nuo naudojamų jungčių. Jungtis galime pirmiausia suskirstyti į dvi grupes, tai dailidžių jungtys, nenaudojant papildomų įdėtinių detalių ir mechaninės jungtys, kurios gali būti komponuojamos iš kelių tipų tvirtinimo elementų (Valentinavičius ir Valiūnas, 2000).

Jungties tipas parenkamas pagal veikiančias įrašas:

- glemžimui ir skėlimui – jungtys įkirčiu, spraustu, išpjova;
- lenkimui – visos virbalinės jungtys;
- ištraukimui – vinys, medsraigčiai, įklijuoti strypai;
- šlyčiai ir lenkimui – klijuotinės jungtys.

Mechaninėse jungtyse naudojami elementai pavaizduoti 1 pav. a) vinys, b) kaiščiai, c) varžtai, d) sraigčiai, e) žiediniai sprausteliai, f) dantytieji sprausteliai, g) dygiuotos plokštelės



1 pav. Plieniniai tvirtikliai (Valentinavičius ir Valiūnas, 2000)

Medsraigčiai neatsiliejava medinių konstrukcijų dalis. Jie naudojami ir paprastų, nelaikančių, konstrukcijų jungtyse, ir konstruktiškai svarbiose jungtyse jas armuojant ar stiprinant.

Darbe detaliau nagrinėjami šio tipo tvirtinimo elementai. Nagrinėjant šais jungtis labiausiai atsižvelgiama į du veiksnius: šlytį bei sraigto lenkimą (Loss, Hossain ir Tannert, 2018).



2 pav. Elementų jungtys naudojant medsraigčius („Rothoblaas“,2020)

1.1.2. Mazgų standumas

Jungčių laikomoji galia bei standumas turi būti nustatomas atliekant bandymus pagal standartus EN 1075, EN 1380, EN 1381, EN 26891, EN 28970. Šie standartai, aprašo bandymų metodikas - tempimui, gniuždymui ir laikomosios galios nustatymui (Kuklik, 2008)

Mazgų charakteristikų skaičiavimas yra viena sudedamųjų medinių konstrukcijų projektavimo dalių. Siekiant gauti tikslesnius konstrukcijų elgsenos rezultatus ir suprojektuoti efektyvesnes konstrukcijas, statiniuose skaičiavimuose turi būti įvertintos tikrosios mazgų charakteristikos. Tik įvertinę tikrąją mazgų elgseną, galime gauti tikslesnius konstrukcijos elgsenos rezultatus, t. y. galime tiksliau suskaičiuoti konstrukcijos poslinkius ir elementuose veikiančias įrašas (Kuklik, 2008).

Pagal anksčiau minėtus parametrus, projektavimo normose EC5 mazgai pagal jokiais charakteristikas skirstomi nėra, nors tai ir daro didelę įtaką konstrukcijai. Moksliniuose darbuose yra siūloma mazgus klasifikuoti pagal standumą ir stiprumą 1,2 lentelėse pateikiamas pavyzdys, kaip būtų galima suskirstyti mazgus (Gečys, 2011).

1 lentelė. Mazgų grupės pagal standumo sąlygas (Gečys, 2011)

Mazgas	Sąlyga
Standus	$S_{j,mi} \geq 12EI/L$
Pusiaus	$0,5EI/L < S_{j,mi} < 12EI/L$
Lankstinis	$S_{j,mi} \leq 0,5EI/L$

2 lentelė. Mazgų grupės pagal stiprumo sąlygą (Gečys, 2011)

Mazgas	Sąlyga
Pilno stiprumo	$M_{j,Rd} \geq 0,85M_{full-strength}$
Dalinio stiprumo	$0,25M_{full-strength} < M_{j,Rd} < 0,85M_{full-strength}$
Lankstinis	$M_{j,Rd} \leq 0,25M_{full-strength}$

Šiuo metu projektuotojai jau naudoja kompiuterines skaičiavimo programas, kuriomis galima įvertinti mazgų dalinį standumą. Šiose programose, pasiduodantis mazgas, aprašomas pasisukamuoju standumu. Skaičiuojant konstrukcijų mazgus, kuriuose atsiranda reikšmingo dydžio ašinės jėgos, charakteristikas, būtina įvertinti ne tik lenkiamojo momento, bet ir ašinės jėgos poveikį. Tai yra nelengvas uždavinys, nes rėminės konstrukcijos elementų skerspjūviai priklauso nuo mazgų charakteristikų, o mazgų charakteristikos – nuo elementų skerspjūvių ir paties mazgo geometrijos bei medžiagos savybių. Parenkant konstrukcijos elementų skerspjūvius ir mazgus, skaičiavimus reikia atlikti priartėjimo būdu (Gečys, Daniūnas, Gurkšnys ir Rasiulis, 2012).

Su pasirinktu mazgų pasisukamuoju standumu atliekami konstrukcijos statiniai skaičiavimai. Naudojant statiniais skaičiavimais gautas įrašas (ašinės jėgas ir lenkiamuosius momentus), suskaičiuojamas mazgų pasisukamasis standumas. Tada vėl atliekami rėminės konstrukcijos statiniai skaičiavimai, bet jau naudojant perskaičiuotas mazgų pasisukamųjų standumų reikšmes. Skaičiavimai priartėjat turi būti atliekami tol, kol įrašų pokytis tarp dviejų iteracijų skaičiavimų tampa nykstamai mažas ir perskaičiuavus mazgų pasisukamąjį standumą jis nepasikeičia. Skaičiuojant konstrukcijas su pasiduodančiais mazgais, kai ašinė jėga yra nedidelė ir mazgų standumo pastebimai neveikia, skaičiavimai atliekami įvertinant tik lenkiamojo momento poveikį. Šiuo atveju skaičiavimų priartėjimo būdu nereikia. Mazgų charakteristikos nustatomos iš karto. Naudojant gautas mazgų charakteristikas, atliekami konstrukcijos statiniai skaičiavimai (Gečys, Daniūnas, Gurkšnys ir Rasiulis, 2012).

1.1.3. Sraiginių jungčių tyrimų aktualumas

Dėl pastaruoju metu padidėjusios medinių konstrukcijų paklausos bei panaudojimo galimybių, padaugėjo aukštybinių bei plataus profilio medinių konstrukcijų. Didinant medinių konstrukcijų dydį, jungčių elgsena tampa lemiamą, nes dažniausiai naudojamos kaiščių tipo jungtys daro didelę įtaką deformacijų elgsenai. Kaiščių tipo jungčių svarbą mediniuose pastatuose pabrėžia ne tik šio tipo jungčių panaudojimas šiuolaikinėse masyviosiose medinėse konstrukcijose, bet taip pat didelis medinių konstrukcijų gedimų skaičius dėl netinkamo tipo kaištinių jungčių projekto. Šie faktai parodo būtinybę giliau nagrinėti šio tipo jungtis, suprasti jų elgseną, tikslinti analitinius skaičiavimus (Gečys, Bader, Olsson ir Kajėnas, 2019).

1.2. Laboratoriniai jungčių tyrimai

Tiksliausias būdas nustatyti mazgo charakteristiką, yra atlikti laboratorinius eksperimentus. Šiame skyriuje panagrinėsime skirtingų autorių atliktus medžio – plieno jungčių laboratorinius tyrimus.

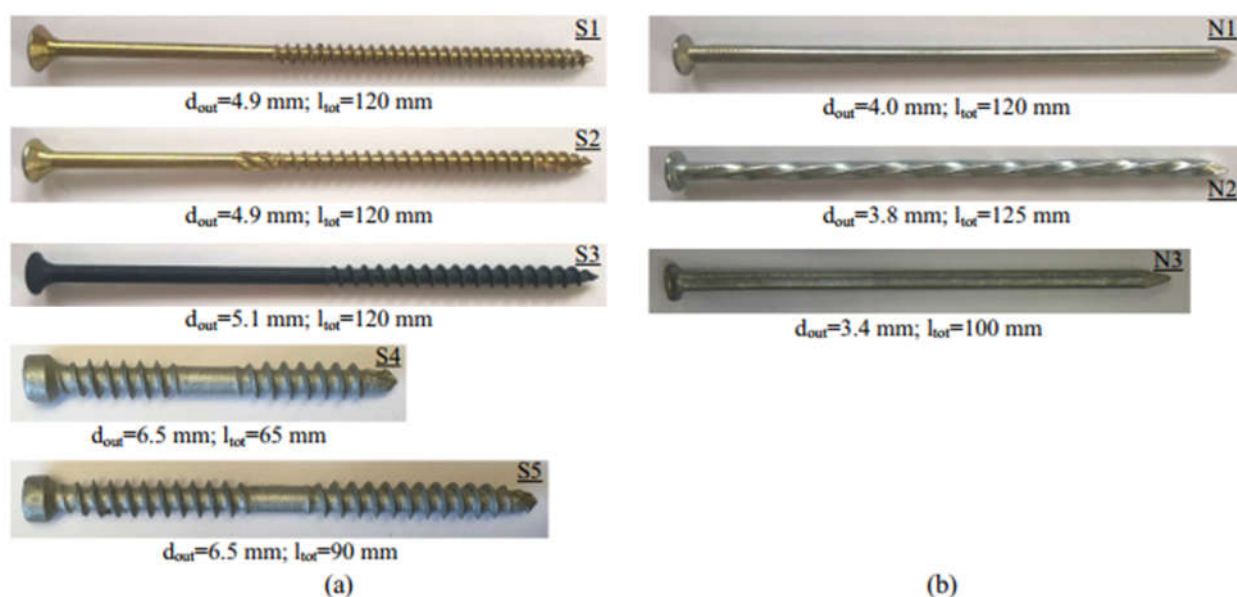
1.2.1. Bandymas Nr. 1

Pradėsime nuo lietuvių ir švedų mokslininkų atlikto tyrimo. Autorių tikslas išsiaiškinti ir ištirti įvairias medienos jungtis su įvairių tipų varžtais bei vinimis, siekiant nustatyti jų ašinių pasipriešinimą praslydimui, bei įvertinti „virvės“ efekto įtaką, jungties deformacijoms ir laikomajai galiai (Gečys, Bader, Olsson ir Kajėnas, 2019).

Eksperimentiniuose tyrimuose buvo naudojami penki skirtingų tipų varžtai ir trijų tipų vynos. Jungtys komponuotos su viena ir dviem šlyties plokštumomis. Papildomai bandymo metu buvo nustatomos ir medžiagų charakteristikos.

Viena iš labiausiai aprašomų tyrimo problemų – tai lyno efektas. Apie tai iki šios nėra atlikta daug tyrimų, o projektavimo normose, pavyzdžiui Eurokode 5, pateiktas tik tiesinis elastinis standumo vertinimas, nėra aiškiai atsižvelgiama į ašinės, tvirtinimo elementų, jėgas, praslydimo modulį, nes šie parametrai išreiškiami per medienos tankį bei tvirtinimo elemento skersmenį. Taip gali būti dėl to, kad trūksta eksperimentinių duomenų apie jungčių slydimą ir jų sąveiką su kitais komponentais bei sistemos savybėmis (Gečys, Bader, Olsson ir Kajėnas, 2019). Šiame tyrime aktuali informacija tolimesniam darbui, tai skirtingų tipų medsraigčių elgseną bei kokią įtaką jungties elgsenai daro skirtingų tipų sriegiai. Aptartos skirtingos jungčių irtytis, padės aiškiau suprasti bei vertinti skaitinio modelio rezultatus.

Pirmiausia aptarsime bandymuose naudotas varžtus bei vinius. Eksperimento metu buvo naudojami penki skirtingų tipų varžtai S1-S5 ir trys vinių tipai N1-N3, tvirtinimo elementai pavaizduoti 3 pav. S1-S3 nepilnai sriegti varžtai, 120 mm ilgio, varžtas padengtas geltonu dichromato pasyvalu ant cinko dangos, išorinio skersmuo 4,9 mm, sriegtos dalies ilgis lygus 68 mm. S2 sraigto padegimas bei skersmuo identiškas S1, tačiau šis varžtas turi ilgesnį sriegį, kuris siekia 70 mm bei šio tipo varžtai turi griovelį, tarp srieginės dalies ir veleno, kad palengvintų gręžimą ir sumažintų medienos skilimo tikimybę. S3 sraigtas - 5,1 mm diametro, sriegtos dalies ilgis 60 mm. Šio tipo varžtuose, ašinė jėga atsiranda dėl medienos suspaudimo įtempių, po varžto galva ir medienos šlyties įtempių, išilgai srieginės dalies. S4 ir S5 tipo varžtai turi dvigubą sriegį, varžtų bendras ilgis atitinkamai 65 mm ir 90 mm. Šiuo atveju ašinės apkrovos sukeliamos per medienos šlyties įtempius išilgai abiejų sriegtų dalių. Sriegių kampai atskirose dalyse yra nevienodi. Skirtingi sriegio kampai kiekvienoje sriegio pusėje suteikia efektą, kai sujungus medienos dalis, jos yra prispaudžiamos viena prie kitos, taigi net prieš šoninės apkrovos atsiradimą jungtyje yra vidinių įtempių (Gečys, Bader, Olsson ir Kajėnas, 2019).



3 pav. Tvirtinimo elementai: a) sraigtai, b) vinius (Gečys, Bader, Olsson ir Kajėnas, 2019)

Eksperimento metu naudota C24 klasės konstrukcinė mediena, tenkinanti EN338:2016 reikalavimus (European Committee for Standardization, 2016). Prieš bandymą bandiniai buvo laikomi esant 20° C ir 65% santykinei oro drėgmei, šiomis sąlygomis laikomos medienos drėgnis turėtų siekti 12%. Papildomais tyrimais nustatytas medienos tankis gautas 459 kg/m³.

Šiame darbe mokslininkai atskirai atliko ir varžtų ištraukimo bandymus, kurių duomenys reikalingi nustatyti charakteristinius tvirtikio parametrus. Bandymai buvo atliekami vadovaujantis

EN1382:2016 standartu (CEN, 2016). Atliekant bandymus (žr. 4 pav.), varžtai sriegiami statmenai medienos sluoksnių, įsriegimo gylis pasirinktas 45mm, bandymas pavaizduotas 5 pav. Ištraukimo metu fiksuojama jėga iki kol gaunama didžiausia $F_{ax,max}$. Turint šiuos duomenis pagal EN1382:2016 pateiktas formules galima nustatyti charakteristinį ašinį ištraukimo stiprį.

$$f_{ax} = \frac{F_{ax,max}}{d_{out} \cdot t_{pen}}; \quad (1)$$

čia:

f_{ax} – charakteristinis ašinis stipris;

$F_{ax,max}$ – maksimali ašinė jėga, nustatyta bandymo metu;

d_{out} – išorinis tvirtinimo elemento skersmuo;

t_{pen} – tvirtinimo elemento įsukimo į medį gylis.

Kiti papildomi bandymai, atlikti takumo momentui M_y nustatyti, vadovaujantis EN409:2009 standartu (CEN, 2016) atliekant keturių taškų lenkimo bandymą. Vienas svarbiausių bandymo parametrų – tai lenkimo kampo φ parinkimas, vinims naudotas 45° , sraigams parenkamas pagal išraišką $110/d_{out}$.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2u_1}{l_1}\right); \quad (2)$$

čia:

u_1 – vertikalus fiksuojamas poslinkis;

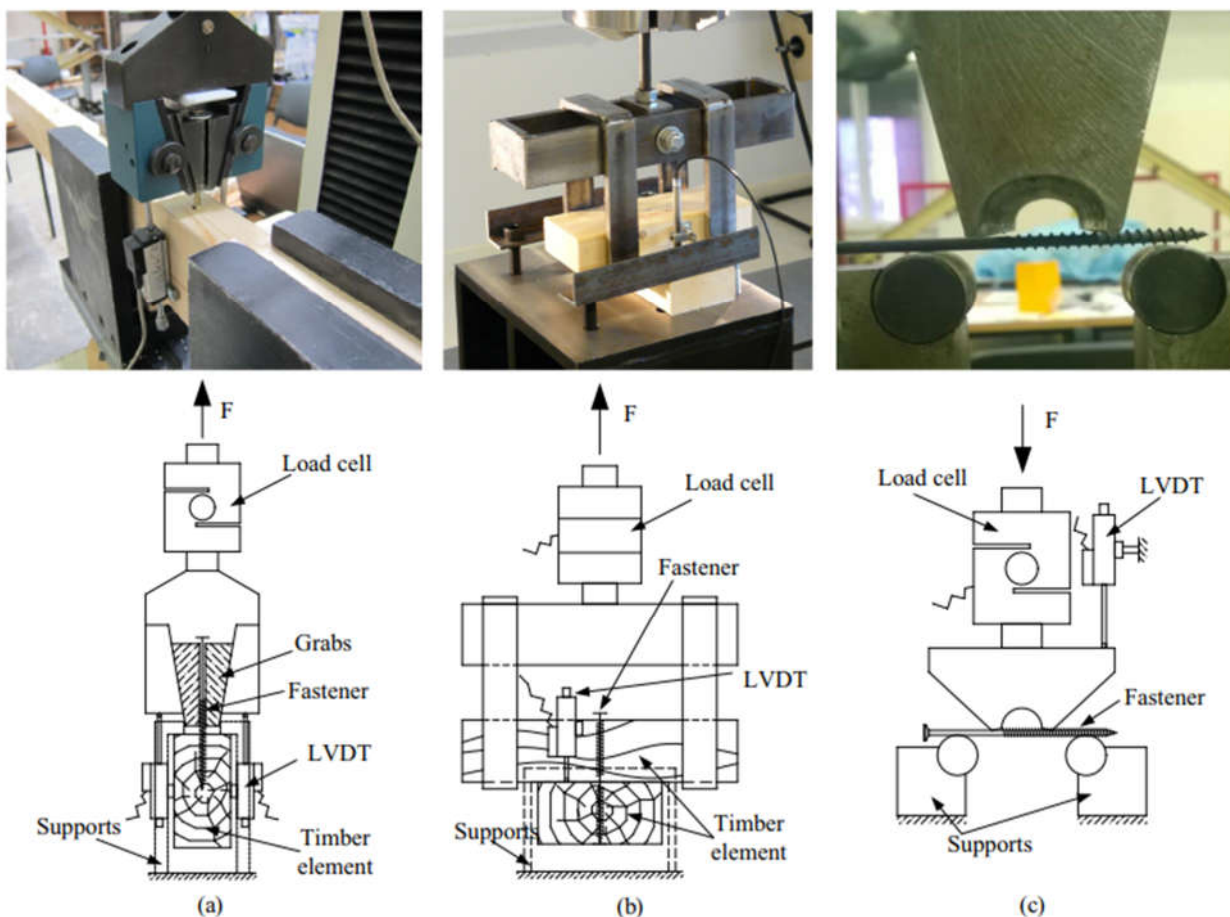
l_1 – atstumas nuo atramos centro iki jėgos pridėties taško.

Tvirtinimo elemento takumo momentas gaunamas pagal sekančią išraišką:

$$M_y = \left(\frac{F_y}{2}\right) l_1; \quad (3)$$

čia:

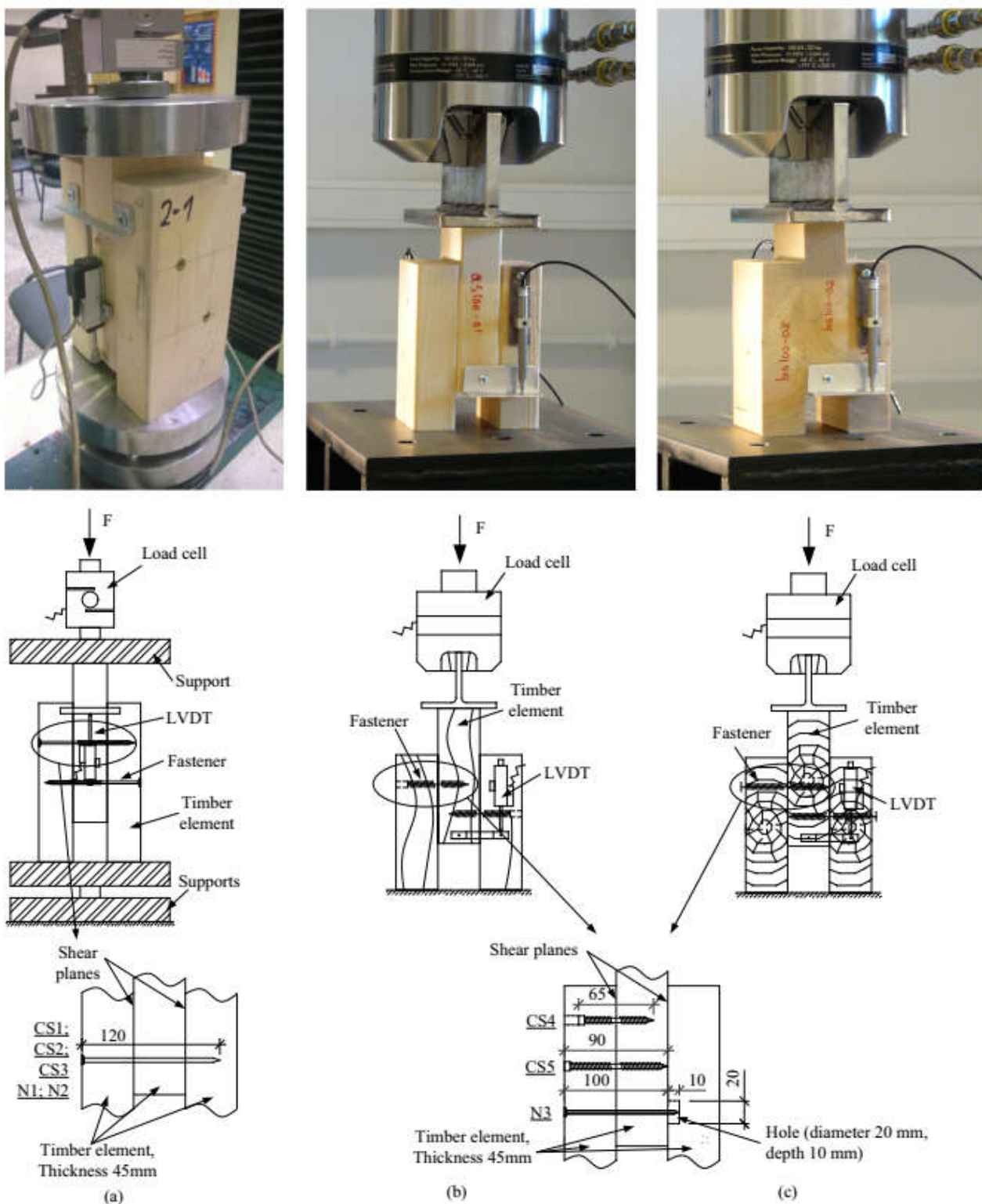
F_y – maksimali jėga esant lenkimo kampui φ .



4 pav. Charakteristinio ašinio stiprio bei takumo lekiamojo momento bandymai (Gečys et al., 2019)

Toliau nagrinėjami pagrindiniai jungčių bandymai. Testinės jungtys buvo suprojektuotos taip, kad turėtų dvi šlyties plokštumas, tam panaudoti trys 45 mm storio elementai, kad jungtyje neatsirastų asimetrija pridėjus apkrovą tvirtinimo elementai buvo sukami iš abiejų pusių. Jungtyse, kuriose buvo naudojami dvigubo sriegio tvirtikliai, stengiamasi, kad centrinė varžto dalis būtų ties šlyties plokštuma. Bandymo įranga ir bandinių komponavimas pavaizduotas 5 pav.

Bandymai vykdyti vadovaujantis EN26891:1991 (CEM, 1999), taigi stipris nustatinėjamas pagal maksimalią apkrovą $F_{\max}$ iki kol pasiekimas maksimalus 15 mm poslinkis.



5 pav. Bandymuose naudotos jungtys, tvirtinimo elementų sriegimo pozicijos, bandymų eiga (Gečys et al., 2019)

Prieš analizuojant pagrindinius tyrimų rezultatus, pirmiausia aptarsime papildomus bandymus, kuriais buvo nustatomas charakteristinis ašinis stipris bei varžtų takumo momentas. 6

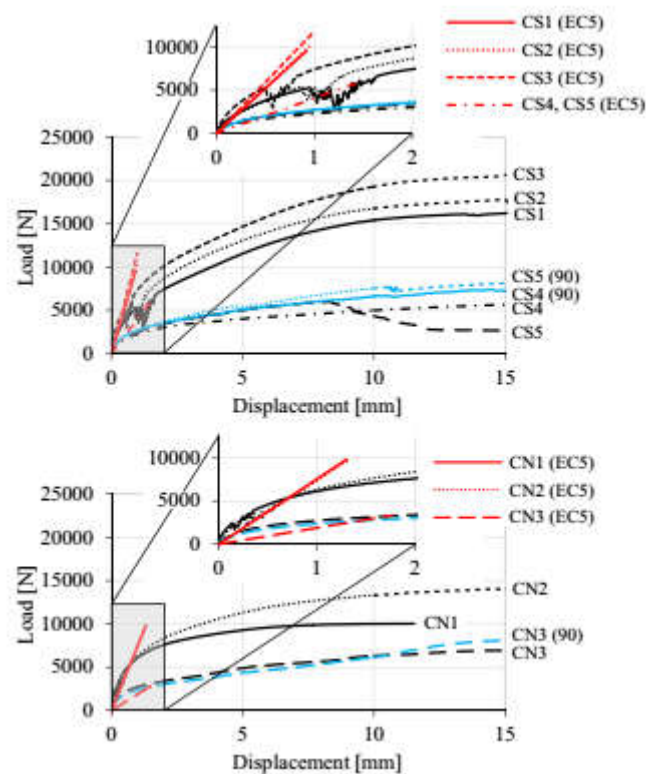
pav. pateikiama rezultatų suvestinė, kurioje galime matyti, kad bandymais gauti rezultatai daugeliu atvejų sutampa su reikšmėmis, gautomis vadovaujantis EC5 pateikta metodika.

Table 2
Experimentally determined values of yield moment and withdrawal parameter.

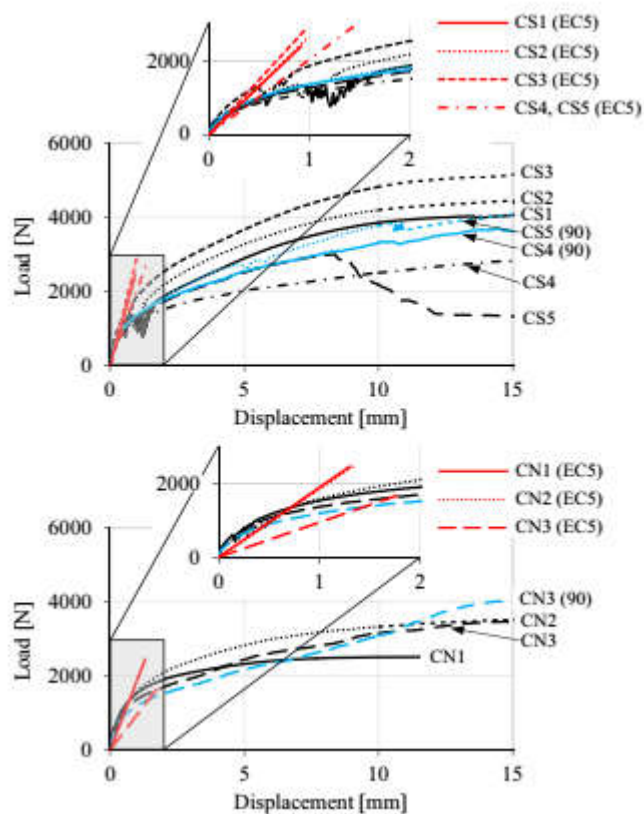
Connector type	Mean value and COV of withdrawal parameter f_{ax} [N/mm ²]	Withdrawal strength according to EC5 [N/mm ²]	Mean value and COV of yield moment M_y [Nmm]	Rotation angle at yield moment, M_y [°]	Mean value and COV of estimated ultimate steel strength, f_u [N/mm ²]
S1	23.64 (±6.56%, n = 5)	21.54	4725 (±6.48%, n = 4)	33.3	789 (±6.48%, n = 4)
S2	23.67 (±6.71%, n = 5)	21.81	5486 (±4.98%, n = 4)	33.3	916 (±4.98%, n = 4)
S3	23.36 (±5.48%, n = 5)	21.65	8138 (±4.85%, n = 4)	33.3	1021 (±4.85%, n = 4)
S4	15.85 (±15.9%, n = 3)	20.51	15276 (±1.58%, n = 4)	22.2	1076 (±1.58%, n = 4)
S5	21.39 (±21.4%, n = 3)	19.79	15433 (±2.25%, n = 4)	22.2	1087 (±2.25%, n = 4)
N1	1.71 (±3.60%, n = 5)	4.03	7343 (±1.34%, n = 4)	45	743 (±1.34%, n = 4)
N2	2.25 (±3.27%, n = 5)	4.12	7118 (±4.00%, n = 4)	45	843 (±4.00%, n = 4)
N3	8.61 (±14.7%, n = 3)	4.67	9553 (±2.90%, n = 7)	45	789 (±2.90%, n = 7)

6 pav. Charakteristinis ašinis stipris, takumo momentas (Gečys et al., 2019)

Jungčių bandymo rezultatai su dviem ar keturias tvirtinimo elementais, pasižymėjo labai netiesine apkrovos – poslinkio elgsena (Gečys et al., 2019), kreivės pavaizduotos 7 pav. Tačiau šiuos rezultatus sunku vertinti, dėl to, kad jungtyse panaudotas nevienodas skaičius tvirtinimo elementų 8 pav. pateikti rezultatai parodo vieno tvirtinimo elemento elgseną. Kalbant bendrai dauguma jungčių pasiekia savo ribinį stiprį esant 15 mm deformacijai.

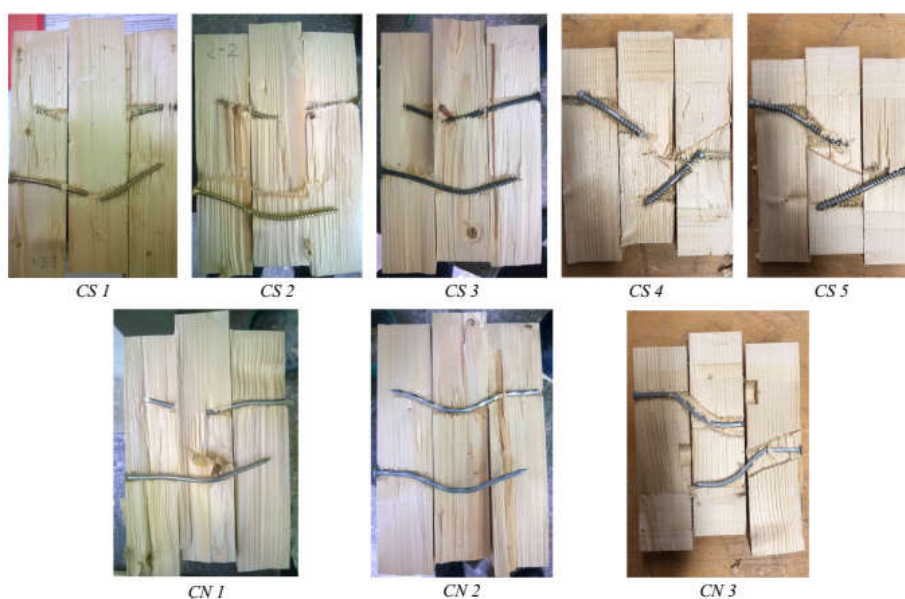


7 pav. Vidutinės jungties jėgos - poslinkio kreivės (Gečys et al., 2019)



8 pav. Vidutinės jungties jėgos - poslinkio kreivės, vienam varžtui (Gečys et al., 2019)

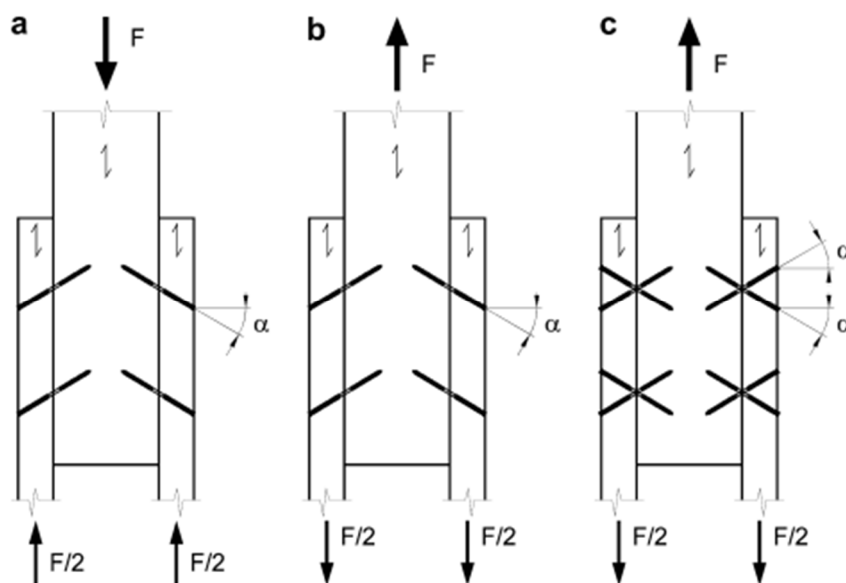
Svarbu aptarti jungčių irties būdus, šie rezultatai ypač aktualūs mūsų tolesniam tyrimui. Netiesiškumas kreivėse atsiranda nuo deformacinio jungties elementų elgesio. Atlikus bandymus ir 9 pav. matant negrįžtamąją tvirtinimo elemento deformaciją, galima teigti, kad ši prielaida teisinga.



9 pav. Bandinių skerspjūviai po jungties irties (Gečys et al., 2019)

1.2.2. Bandymas Nr. 2

Trento universiteto mokslininkai R. Tomasi, A. Crosatti, M. Piazza atliko laboratorinius tyrimus medinei jungčiai su 45 laipsnių kapu sriegtais sraigtais. Bandymų imtis 64 bandiniai (Tomasi, Crosatti and Piazza, 2010). Šiuose tyrimuose svarbi informacija, kurią būtina išsiaiškinti, tai kaip kinta jungties elgsena, keičiant medsraigčio sriegimo kampą į medieną.



10 pav. Bandymų schema (Tomasi et al., 2010)

Bandiniai buvo gaminami iš homogeninės eglės (*Picea abies* Karst.), klijuotos laminuotos medienos, kurios atsparumo klasė GL24h pagal EN 1194, laminatas komplektuotas iš C24 klasės medžio masyvo lentų, bandymo metu medienos drėgmės kiekis buvo 12% (CEN, 1991)

Medienos tankis nustatytas vadovaujantis EN 28970:

$$\rho_m = 426 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_k = 402 \text{ kg/m}^3;$$

ρ_m – vidutinis tankis;

ρ_k – charakteristinis tankis.

Bandyme buvo naudojami dviejų skirtingų ilgių, savaime įsisukantys, dvigubo sriegio varžtai $L=190$ ir $L=220$ mm, plieno klasė 10.9 ($f_u, k = 1000$ MPa). Šie varžtai yra su dviem skirtingais sriegiais, kurių ilgis yra vienodas: vienas skirtas skverbimui, o kitas – priveržimui, taip jungtyje gaunami išankstiniai įtempiai (Tomasi et al., 2010).

Varžtų tempimo bandymai buvo atlikti vadovaujantis EN 10002/1:

$$f_{u,m} = 940,3 \text{ N/mm}^2;$$

$$f_{u,k} = 934,3 \text{ N/mm}^2;$$

$f_{u,m}$ – vidutinis varžtų tempiamasis stipris;

$f_{u,k}$ – charakteristinis varžtų tempiamasis stipris.

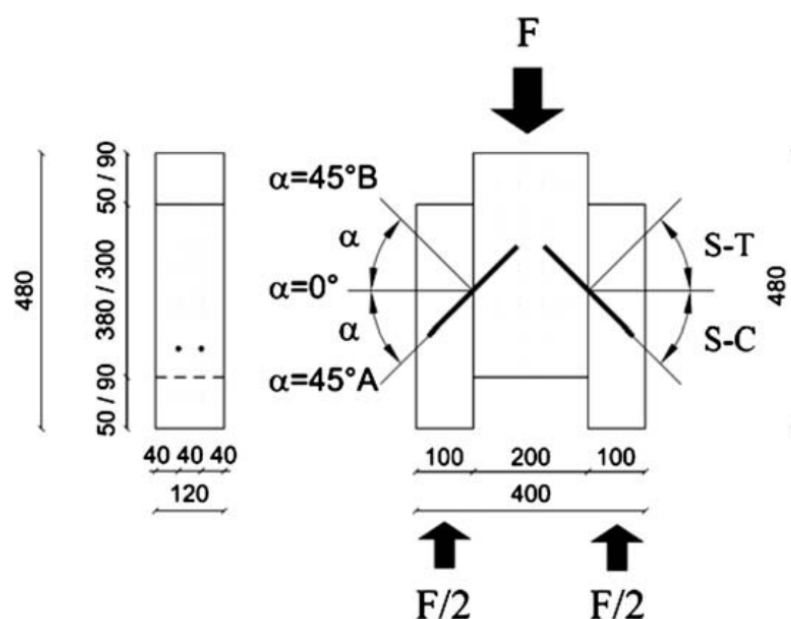
Pagal nustatytas stiprio reikšmes varžtai tenkina 10.9 klasę.

Type	L (mm)	$S_1 = S_3$ (mm)	S_2 (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	D_3 (mm)	D_N (mm)	D_H (mm)
D1-8.2 × L-190	190	80	30	8.2	6.3	8.9	5.4	10
D1-8.2 × L-220	220	95	30	8.2	6.3	8.9	5.4	10

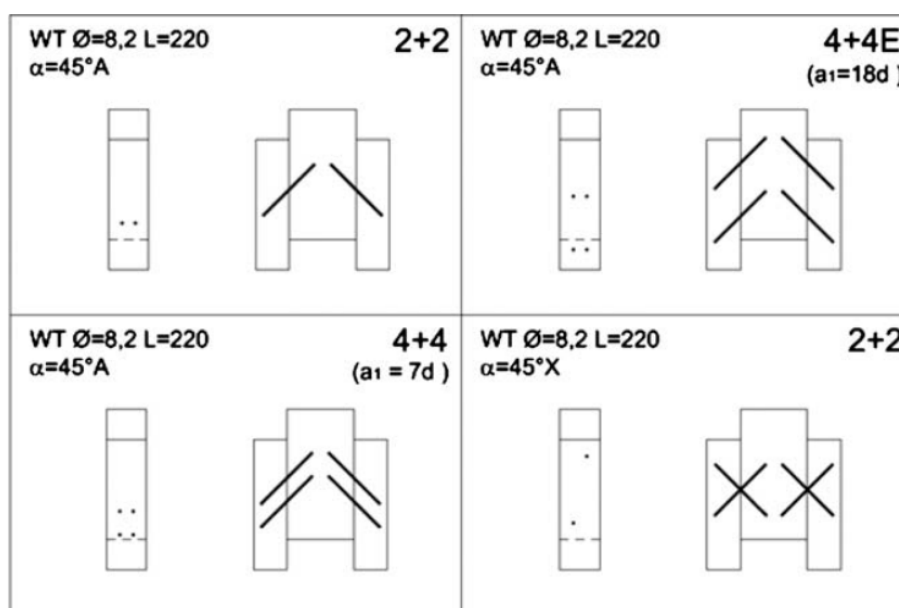
11 pav. Bandymuose naudoti varžtai (Tomasi et al. 2010)

Bandyme naudojami bandiniai (žr. 10 pav.) yra įprastiniai, kurie dažniausiai naudojami stūmimo bandymuose, jie susideda iš dviejų šoninių medienos elementų ir centrinio tašo, jungties principinis brėžinys pavaizduotas 1 pav. . Standartizacijos tikslais, įvairiuose bandiniuose tvirtinimo elementai buvo įtvirtinti 15 laipsnių skirtumu. Rezultatas - varžtai, sriegiami pasvirę 0, 15, 30 arba 45 statmenai šlyties plokštumai. Varžtų išdėstymas atsižvelgiant į išorinės apkrovos kryptį ir pusę buvo pasirinktas taip, kad būtų gautas:

- vienkrypčiai įstrižiniai varžtai, veikiami kirpimo-gniuždymo poveikis;
- vienkrypčiai įstrižai varžtai, veikiami kirpimo-tempimo poveikis;
- X padėtyje esantys varžtai, juos veikia kirpimo-gniuždymo bei kirpimo-tempimo poveikiai.



12 pav. Bandymų variacijos schema (Tomasi et al., 2010)



13 pav. Bandinių grupės (Tomasi et al., 2010)

Jungtims su 0 ir 15 laipsnių sriegimu buvo naudojami 190 mm ilgio varžtai; 30 ir 45 laipsnių atveju, naudojami 220 mm ilgio varžtai. Visais atvejais sraigtinis tvirtinimas buvo atliktas taip, kad tvirtinimo elemento lygiosios dalies, vidurio taškas, sutaptų su jungties plokštumomis. Tvirtinimo vietos gylis atitiko minimalią 6 d vertę, kaip ir rekomenduojama, kad jungtis veiktų efektyviai (Tomasi et al., 2010).

Konstruojant bandinius buvo vadovaujamasi Eurokodu 5, buvo laikomasi minimalių atstumų (žr. 14 pav.):

a_1	5· d (7· d as for [10])	45 mm (62 mm)
a_2	4· d	36 mm
$a_{3,t}$	Max (7· d ; 80 mm)	80 mm
$a_{3,c}$	4· d (80 mm as for [9])	27 mm (80 mm)
$a_{4,t}$	4· d	36 mm
$a_{4,c}$	3· d	27 mm

14 pav. Tvirtinimo elementų išdėstymo reikalavimai EC5 (Tomasi et al., 2010)

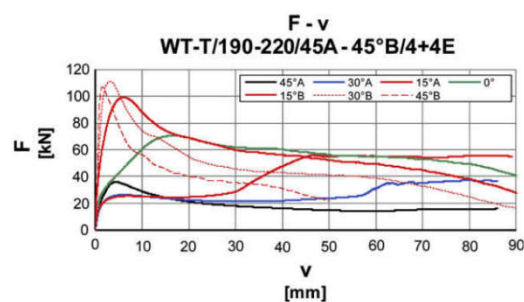
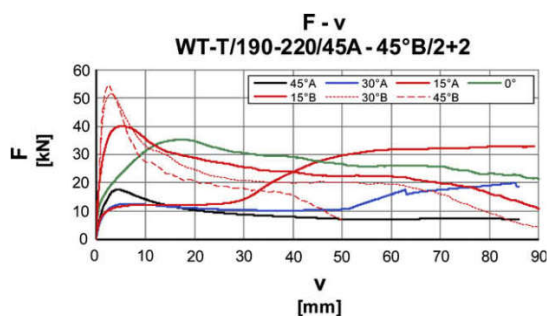
Europos standartas EN 12512 (CEN, 2001) nurodo bandymo metodą, skirtą nustatyti mechaninių tvirtinimo detalių, veikiamų cikline apkrova, lankstumą, stiprumo sumažėjimą ir energijos išsklaidymo charakteristikas. Standartas apibrėžia lankstumą, kaip jungties gebėjimą atlaikyti didelius poslinkius plastikiniame lauke, nesumažinant stiprumo. Jo matavimas atliekamas pagal šį santykį:

$$D = \frac{v_u}{v_y}. \quad (4)$$

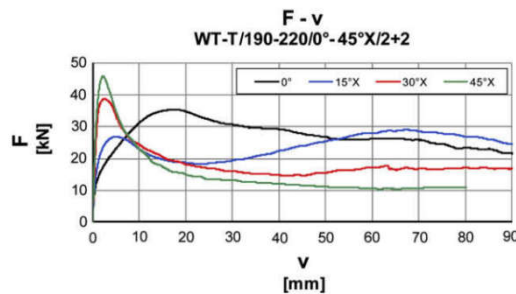
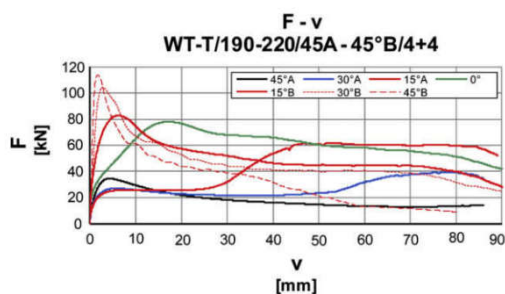
Takumo apkrova „ F_y “ - tai apkrovos vertė, patekanti į plastinę zoną, todėl ji atitinka atskyrimo tašką tarp elastinės zonos ir jėgos prieš slydimą, $F - v$ kreivės plastinės zonos. Dėl šios priežasties ji paprastai nurodoma kaip „takumo riba“. CEN standartas nustato du F_y nustatymo metodus pagal $F - v$ kreivės formą:

a) dvikryptės elgsenos atveju abi progresijos yra artimos dviem tiesiomis linijomis, kurių susikirtimo taškas nurodo takumo ribą;

(b) esant neaiškiai elgsenai, elastinis segmentas yra artimas tiesiai linijai, einančiai per du taškus $0.1 F_u$ ir $0.4 F_u$, kur F_u yra didžiausia leistina apkrova, o plastinė zona yra artima tiesiai linijai, kurios nuolydis lygus $1/6$ pirmosios tiesios linijos polinkio.



15 pav. Bandymo rezultatai F-v kreivė 1, 2 grupė (Tomasi et al., 2010)



16 pav. Bandymo rezultatai F-v kreivė 3, 4 grupė (Tomasi et al., 2010)

1.2.3. Bandymas Nr. 3

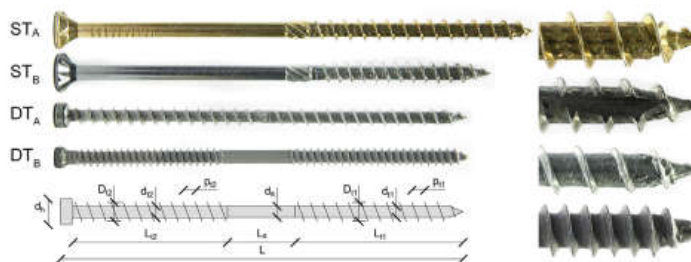
Panašius tyrimus atliko ir Trento universiteto mokslininkai (Schiro, Giongo, Sebastian, Riccadonna and Piazza, 2018). Darbe nagrinėjamos sraigtinės jungtys, naudojant skirtingas tvirtinimo detales, tvirtinimo elementai sriegiami 45° ir 90° laipsnių kampais, medienos pluošto krypties atžvilgiu. Tyrimams buvo panaudota kietoji ir minkštoji mediena – pjautinė mediena, klijuotoji mediena, kryžmai laminuota mediena, laminuota lukšto mediena, iš viso penkiasdešimt aštuoni bandiniai. Bandymo rezultatai apima jungčių stiprio, standumo nustatymą ir jų palyginimą atsižvelgiant į konfigūracijas. Šiame bandyme aiškiai atsiskleidžia skirtumas tarp viengubo ir dvigubo sriegio medsraigčių ir kuriais atvejais pasireiškia netiesinė jungties elgsena.

Eksperimento metu buvo naudojami skirtingi medienos produktai, centriniams komponentams parinkta eglės masyvo C24 klasės (CEN, 2009) mediena ir buko sluoksniuotosios faneros medieną, kuri atitinka GL70 klasę. Šoniniai elementai buvo komponuojami iš trijų eilių, kryžmai sluoksniuotos medienos bei sluoksniuotos buko faneros. Visų naudotų medienos charakteristikos pateiktos 17 pav..

Element type and grading			Beech LVL GL70 [18]	Spruce Solid wood C24 [19]	Beech LVL panel [20]	Spruce CLT panel [21]
Bending:	$f_{m,k}$	[MPa]	70	24	80	24
Tension:	$f_{t0,k}$	[MPa]	55	19.2	60	14
	$f_{t90,k}$	[MPa]	0.6	0.5	1.5	0.12
Compression:	$f_{c0,k}$	[MPa]	59.4	24	57.5	21
	$f_{c90,k}$	[MPa]	10.2	2.5	14	2.5
Shear:	$f_{v,k}$	[MPa]	4	3.5	8	3.3
Mean modulus:	$E_{0,mean}$	[MPa]	16700	11500	16800	12000
Density:	ρ_{mean}	[kg/m ³]	≥740	420	800	450–500
Density (experimental):	$\rho_{experim.}$	[kg/m ³]	796	460	846	465
	CoV		0.7%	2.7%	0.5%	1.2%

17 pav. Bandyne naudotos medienos charakteristikos (Schiro et al., 2010)

Šiame tyrime pasitelkti įvairių tipų sraigtai, tačiau juos galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes (žr. 18 pav.), tai sraigtai su viengubu sriegiu (ST_A, ST_B) ir sraigtai su dvigubu sriegiu (DT_A, DT_B). Varžtų geometriją (žr. 19 pav.). stengiasi parinkti kuo panašesnę, kad rezultatus būtų galima palyginti.

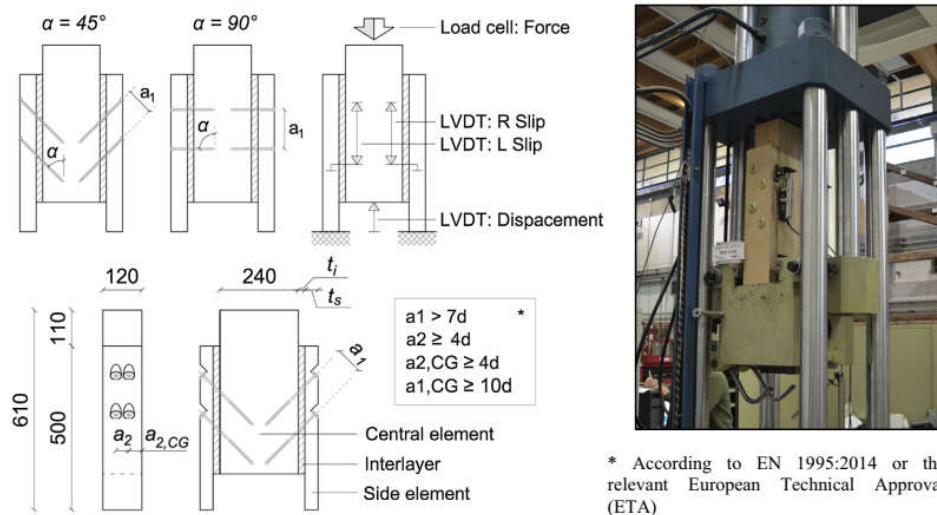


18 pav. Tvirtinimo elementų tipai, panaudoti bandymo metu (Schiro et al., 2010)

Connector:		ST _A		ST _B		DT _A		DT _B	
L	[mm]	220	160	200	190	150	190		
L _{t1}	[mm]	100	100	80	90	70	80		
d _{t1}	[mm]	6.3	6.3	6.4	5.3	5.3	5.4		
D _{t1}	[mm]	10	10	10	8	8	8.2		
P _{t1}	[mm]	6.6	6.6	5.4	6	6	3.2		
L _s	[mm]	120	60	120	5	5	30		
d _s	[mm]	7.2	7.2	7	5.6	5.6	6.3		
L _{t2}	[mm]	–	–	–	90	70	80		
d _{t2}	[mm]	–	–	–	5.025	5.025	5.4		
D _{t2}	[mm]	–	–	–	8.5	8.5	8.9		
P _{t2}	[mm]	–	–	–	5.68	5.6	3		
d _h	[mm]	18.5	18.5	18.25	12	12	10		
M _{y,k}	[Nm]	36	36	36	20	20	19.5		
f _{y,k}	[Mpa]	600	600	600	900	900	870		
R _{tens,k}	[kN]	26	26	31.4	18	18	28.6		
f _{tor,k}	[Nm]	45	45	40	23	23	25.9		

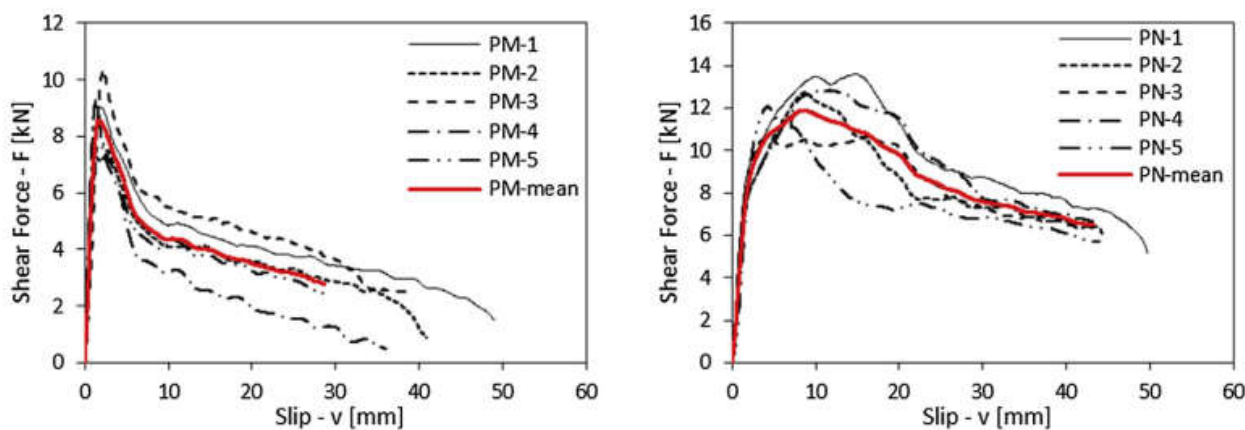
19 pav. Tyrime naudotų varžtų geometrija ir charakteristikos (Schiro et al., 2010)

Bandymai atlikti vadovaujantis EN 12512 standarto reikalavimų, pastovus poslinkio greitis buvo priimtas 0,05mm/s, o maksimali poslinkio vertė 100 mm. Nors pagal tyrimų metodiką (CEN, 2001) laikoma, kad galutinė sąlyga yra 30 mm, tačiau bandymą tęsiant ilgiau, pagal gaunamus tolesnius duomenis galima nustatyti likutinę laikomąją galią po irties.



20 pav. Bandinių geometrija ir laboratorijos įranga (Schiro et al., 2010)

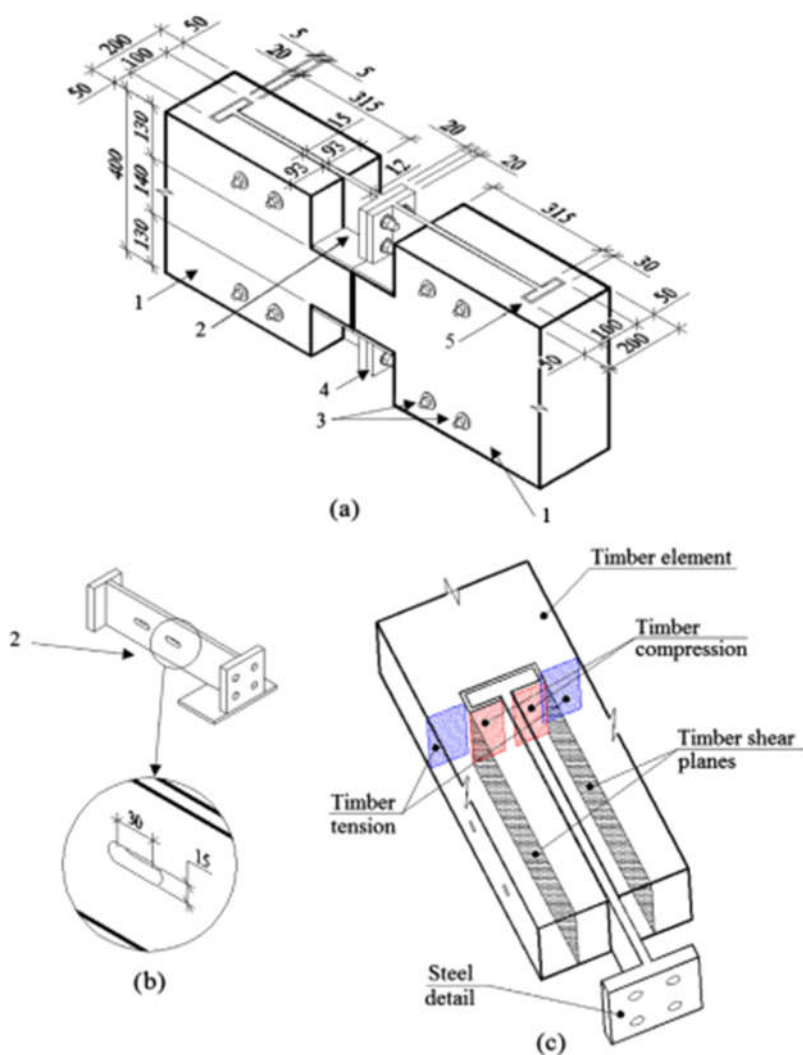
Bandymo rezultatai buvo pateikiami jėgos – poslinkio kreivėmis. Išnagrinėjus rezultatus, pirmiausia galima pastebėti jungčių standumo skirtumą, naudojant viengubo sriegio ir dvigubo sriegio sraigtus. Jungtys, kuriose buvo naudojamos dvigubo sriegio sraigčiai, gaunamos didesnio standumo, kreivė didžiąją dalį kinta beveik tiesiškai (žr. 21 pav.). Iš pateikto pavyzdžio galima matyti, kad ribinė irties jėga didesnė jungtyje, naudojant viengubo sriegio sraigčius, tačiau šiuo atveju lyginti negalima, nes sraigtų diametras skiriasi, todėl lyginame tik jungties principinę elgseną (Schiro et al., 2010).



21 pav. Bandymo rezultatai, kairėje naudojat dvigubo sriegio sraigčius, dešinėje viengubo sriegio sraigčius (Schiro et al., 2010)

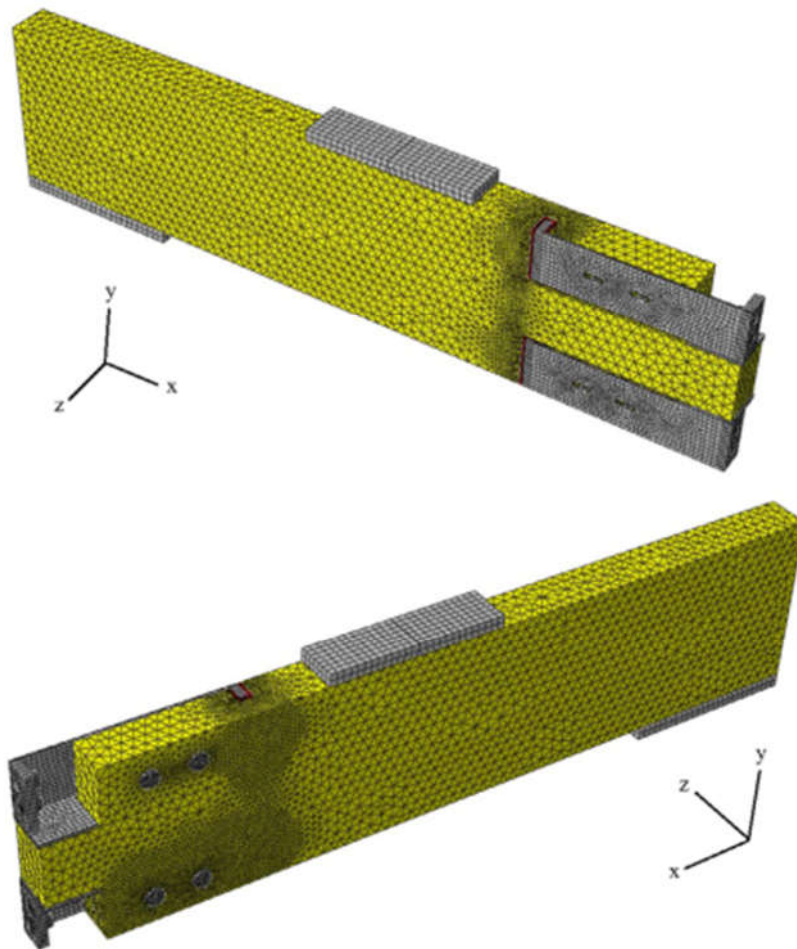
1.3. 3D analizė naudojant baigtinius elementus

Šiame skyriuje panagrinėsime baigtinių elementų metodo taikymą medienos – plieno jungtims. Nagrinėsime Vilniaus Gedimino technikos universitete atliktos sijų iš klijuotosios medienos jungties, naudojant metalines plokšteles suveržtas varžtais, kompiuterinę analizę. Tyrimo tikslas – nustatyti jungties standumą ir laikomąją galią (Gečys, Daniūnas, Bader, Wagner ir Eberhardstreiner, 2015).



22 pav. Modeliuojama jungtis: 1 – klijuotos medienos elementas; 2 – plieninė detalė; 3 – jungiamieji varžtai tempiamoje zonoje; 4 – varžtai įrengiami montavimo metu; 5 – užpildas tarp plieno ir medienos (Gečys et al., 2015)

Modeliavimui buvo naudojama komercinė baigtinių elementų programinė įranga. BEM modelis su ašimis pavaizduotas 23 pav., modelis yra simetriškas y – z ir x – y plokštumų atžvilgiu. Tai buvo atlikta norint sumažinti BEM elementų skaičių ir sutaupyti skaičiavimo laiko. Mediena dalinama naudojant keturių mazgų linijinius tetraedrinus elementus pritaikant tobulai elastingą-plastinį ortotropinį medžiagos modelį. Plieninės plokštelės ir plieniniai varžtai dalinami naudojant aštuonių mazgų linijinius kvadratinus elementus pritaikant elastingą- plastinį izotropinį medžiagos modelį. Apkrovos pridėjimo vietoje ir atramoms buvo naudojamos papildomos metalinės plokštelės slėgiui paskirstyti.



23 pav. 3D modelis (Gečys et al., 2015)

Kaip jau buvo minėta ankstesniuose skyriuose, medienos savybės skirtingomis kryptimis yra nevienodos. BEM modelyje taip pat buvo parinktas ortotropinis medžiagos modelis. Medienos savybės galima nustatyti bandymais arba naudoti žiniaraščiais. Šiame darbe bandymais nustatytas tamprumo modulis $E_L = 11587 \text{ N/mm}^2$ ir panaudota modelyje, kiti elastiniai medienos parametrai buvo parinkti iš žiniaraščių (Gečys et al., 2015).

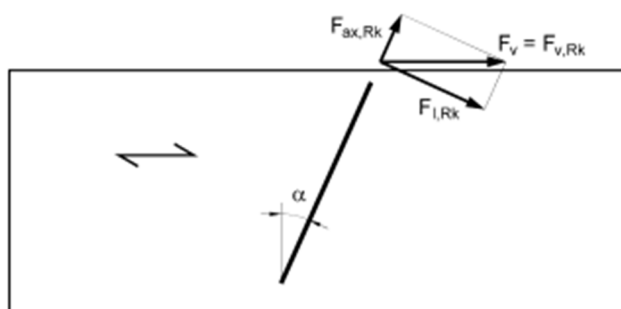
1.4. Pirmojo skyriaus išvados

1. Komponentai, lemiantys meddraigtinės jungties laikomąją galią, tai tvirtinimo elemento ištraukimas iš medienos, tvirtinimo elemento lenkimas, medienos zonų sugniuždymas arba medienos skilimas. Jungties eksperimentinis irties pobūdis priklauso nuo: tvirtinimo elemento tipo, medienos sluoksnių bei jos savybių, jungties konfigūracijos. Plastiška jungties elgsena pasireiškia, kai meddraigtyje pasiekiami takumo įtempiai ir medienoje vietinis glemžimas. Staigi irtis dažniausiai būna susijusi su medienos šlytimi ar tempimu skersai medienos pluoštui.
2. Daugiausiai tyrimų atliekama norint įvertinti projektavimo metodiką, kuri pateikiama norminiuose dokumentuose. Kol kas šio tipo jungčių skaičiavimai stipriai paremti įvairiomis prielaidomis, kurios mažina skaičiavimų tikslumą. Apžvelgus tyrimus pastebėta, kad didžiausią įtaką jungties elgsenai daro tvirtinimo elemento sriegio tipas, kuris analitiniuose skaičiavimuose detalai nevertinamas.
3. Naudojant 3D modeliavimo bei analizės programinę įrangą galima pakankamai tiksliai atkartoti laboratoriniais tyrimais gautus rezultatus, jungties elgseną. Dėl medienos savybių anizotropiškumo, modeliavime naudojami specifiniai irties modeliai, Tsai – Wu, Tsai – Hill ir kt.

2. MEDINĖS JUNGTIES TEORINIAI SKAIČIAVIMAI

2.1. Skaičiavimai remiantis Eurokodu 5

Šiame skyriuje pateikiama teorinių skaičiavimų metodika bei prielaidos remiantis šiuo metu Lietuvoje galiojančiu norminiu dokumentu Eurokodu 5 „Medinių konstrukcijų projektavimas“, kurio lietuviškos versijos žymuo yra LST EN 1995 – 1 – 2005+AC:2006.



24 pav. Veikiančių jėgų schema (Tomasi et al., 2010)

Šiame darbe nagrinėjama jungtis, kurią kartu veikia ašinė ir skersinė apkrova, turi tenkinti pateiktą (5) išraišką.

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{l,Ed}}{F_{l,Rd}}\right)^2 \leq 1; \quad (5)$$

čia $F_{ax,Rd}$ ir $F_{v,Rd}$ yra jungties atitinkamai aprautos ašine arba skersine apkrova, skaičiuotinė laikomoji galia.

Charakteristinė $F_{ax,Rk}$ ištraukiamosios galios skaičiavimai pateikiami EC5 (8.7.2) skyrelyje. Vertinant jungčių su ašine kryptimi apkrautais medsraigčiais laikomąją galią, turėtų būti įvertinami šie irties būdai:

- srieginės medsraigčio dalies ištraukiamoji galia;
- medsraigčių, naudojamų kartu su plieninėmis plokštelėmis, galvutės nuplėšiamoji galia turėtų būti didesnė už medsraigčio tempiamąją galią;
- ištraukiamoji gali įtraukiant medsraigčio galvutę;
- medsraigčio tempiamoji galia;
- su plieninėmis plokštelėmis naudojamų medsraigčių irtis medsraigčių grupės perimetru.

Jungties su ašine kryptimi apkrautais medsraigčiais charakteristinė ištraukiamoji galia skaičiuojama pagal EC5 (8.38) išraišką.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \left(\frac{8d}{l_{ef}} \right)^{0,2} f_{ax,\alpha,k} d l_{ef}; \quad (6)$$

čia:

$F_{ax,\alpha,Rk}$ – jungties charakteristinė ištraukiamoji galia kampu α į pluoštą;

n_{ef} – efektyvusis varžtų skaičius, $n_{ef} = n^{0,9}$;

d – srieginės dalies išorinis skersmuo;

$f_{ax,\alpha,k}$ – charakteristinis ašinis ištraukiamasis stipris kampu α į pluoštą, kuris apskaičiuojamas EC5 8.39 išraiška.

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cos^2 \alpha}; \quad (7)$$

čia:

$f_{ax,k}$ – charakteristinis ašinis ištraukiamasis stipris statmenai pluoštui, turėtų būti nustatomas bandymais pagal EN 1382 ir EN 14358 reiklavimus arba apskaičiuotas taikant šią lygtį:

$$f_{ax,k} = 0,037 \rho_k; \quad (8)$$

čia:

ρ_k – charakteristinis tankis kg/m^3

Vinių, kabių, varžtų ir medsraigčių charakteristinė laikomoji galia, atitinkanti vieno virbalinio tvirtiklio vieną šlyties plokštumą, turėtų būti prilyginama mažiausiai reikšmei, apskaičiuojamai taip:

- vienpusės šlyties veikiamų tvirtiklių atveju naudojama EC5 (8.6) išraišką:

$$F_{l,Rk} = \min \left(\begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ \frac{f_{h,2,k} t_2 d}{f_{h,1,k} t_1 d} \left[\sqrt{2\beta^2 (1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta^2 (1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2 (1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right) \quad (9)$$

čia:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}; \quad (10)$$

$F_{v,Rk}$ – vieno virbalinio tvirtiklio vieną šlyties plokštumą atitinkanti charakteristinė laikomoji galia;

t_i – medienos arba plokštės atoris arba virbalinio tvirtiklio įsmigimo gylis;

$f_{h,i,k}$ – medinio elemento i charakteristinis vietinis stipris.

d – tvirtiklio skersmuo;

$M_{y,Rk}$ – charakteristinis tvirtiklio takumo momentas;

β – santykis tarp elementų vietinių stiprių;

$F_{ax,Rk}$ – charakteristinė tvirtiklio ašinė jėga

Pirmasis dėmuo EC 5 (8.6) formulių dešinėje yra laikomoji galia pagal Johanseno takumo teoriją, o antrasis – $F_{ax,Rk}/4$ – lyno efekto indėlis, kuris įvertina trinties jėgą tarp elementų. Medsraigčių atveju lyno efekto indėlis laikomajai galiai turi būti ne didesnis kaip 100% Johanseno dalies.

Kadangi šiame darbe nagrinėjami kampų sriegti medsraigčiai, veikiančią jėgą turime susiprojektuoti į ištraukimo ir kirpimo jėgas pagal 25 pav. (Girhammar, Jacquier ir Kallsner, 2017).

$$F_{ax,Ek} = F_{v,Rk} \cdot \sin \alpha; F_{l,Ek} = F_{v,Rk} \cdot \cos \alpha; \quad (11)$$

Šiomis lygtimis papildę pradinę laikomosios galios lygtį galime gauti maksimalią charakteristinę atlaikomąją galią (Tomasi et al., 2010):

$$F_{v,Rk} = \frac{1}{\left[\left(\frac{\sin \alpha}{F_{ax,Rk}} \right)^2 + \left(\frac{\cos \alpha}{F_{l,Rk}} \right)^2 \right]^{1/2}}; \quad (12)$$

Toliau nagrinėjami jungties poslinkio skaičiavimai remiantis Euro kodu 5.

Kai sandūros sudarytos naudojant virbalinius arba sprausteklinius tvirtiklius, tvirtiklio vienos šlyties plokštumos poslinkio modulis K_{ser} veikiant eksploatacinei apkrovai turėtų būti imamas iš EC5 pateiktos lentelės (LST EN 1995-1-1:2005).

3 lentelė. Eurokode 5 pateikiamos standumo reikšmės (LST EN 1995-1-1:2005)

Tvirtiklio tipas	K_{ser}
Kaiščiai Varžtai su protarpiu arba be jo ^a Medsraigčiai Vinys (kurioms gręžiamos skylės)	$\rho_m^{1,5} d / 23$
Vinys (kurioms negręžiamos skylės)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8} / 30$
Kabės	$\rho_m^{1,5} d^{0,8} / 80$
A tipo pagal EN 912 žiediniai sprausteliai B tipo pagal EN 912 plokšteliniai sprausteliai	$\rho_m d_c / 2$
Dantytieji sprausteliai	
– C1–C9 tipų pagal EN 912	$1,5 \rho_m d_c / 4$
– C10 ir C11 tipų pagal EN 912	$\rho_m d_c / 2$
^a protarpis turėtų būti atskirai pridedamas prie deformacijos.	

2.2. Alternatyvi jungties skaičiavimo metodika

Trento universiteto mokslininkai, kurių laboratoriniai tyrimai jau buvo aptarti 1 skyriuje, remdamiesi savo gautais rezultatais parėmė modifikuotą skaičiavimo metodiką šio tipo jungtims (Tomasi et al., 2010).

Kitos lygtys, išreikštos iš EC5 (8.6) (LST EN 1995-1-1:2005), išraiškos leidžia apskaičiuoti laikomąją galią kiekvienam varžtui per pasirinktą šlyties plokštumą.

$$R_a = R_{ax,k} \cdot \sin \alpha + f_{h,1,k} \cdot s_1 \cdot d \cdot \cos \alpha; \quad (13)$$

$$R_b = R_{ax,k} \cdot \sin \alpha + f_{h,2,k} \cdot s_2 \cdot d \cdot \cos \alpha; \quad (14)$$

$$R_c = R_{ax,k} \cdot (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{f_{h,1,k} \cdot s_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{s_2}{s_1} + \left(\frac{s_2}{s_1}\right)^2\right)} + \beta^3 \cdot \left(\frac{s_2}{s_1}\right)^2 - \beta \cdot \left(1 + \frac{s_2}{s_1}\right) \right]; \quad (15)$$

$$R_d = R_{ax,k} \cdot (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{f_{h,1,k} \cdot s_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \cdot \left[\sqrt{2\beta \cdot (1 + \beta) + \left(\frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot s_1^2}\right)} - \beta \right]; \quad (16)$$

$$R_e = R_{ax,k} \cdot (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{f_{h,1,k} \cdot s_2 \cdot d}{1+2\beta} \cdot (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \cdot \left[\sqrt{2\beta \cdot (1 + \beta) + \left(\frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot s_1^2} \right) - \beta} \right]; \quad (17)$$

$$R_f = R_{ax,k} \cdot (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + (1 - \mu \tan \alpha) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d \cdot \cos^2 \alpha}; \quad (18)$$

Pagal aukščiau parodytas lygtis jėga išskaidoma į du komponentus $F_{v,Rk}$ ir $F_{ax,rk}$

$$F_{ax,Rk} = R_{ax} = \min \left\{ R_{ax,1,k} \right\}; \quad (19)$$

$$F_{v,Rk} = \min \{ R_a; R_b; R_c; R_d; R_e; R_f \}; \quad (20)$$

čia:

s_1 – varžto įgilinimo ilgis pirmajame elemente;

s_2 – varžto įgilinimo ilgis antrajame elemente;

$f_{h,1,k}$ – pirmojo medinio elemento charakteristinis vietinis stipris;

$f_{h,2,k}$ – antrojo medinio elemento charakteristinis vietinis stipris;

$\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k}$ – medinių elemento stiprio santykių koeficientas;

$R_{ax,1,k}$ – charakteristinis ištraukiamasi stipris iš pirmojo elemento;

$R_{ax,2,k}$ – charakteristinis ištraukiamasi stipris iš antrojo elemento;

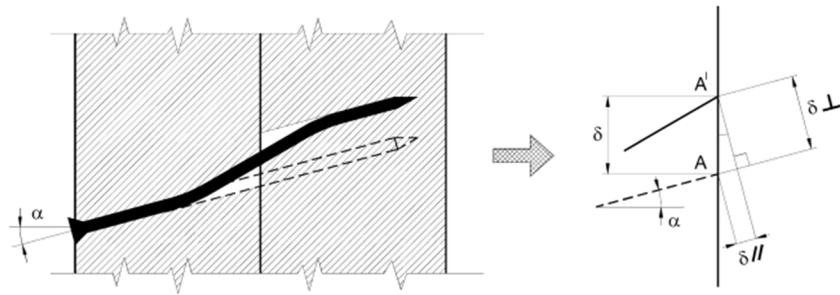
d – efektyvusis varžto diametras;

M_{yk} – charakteristinis varžto takumo momentas;

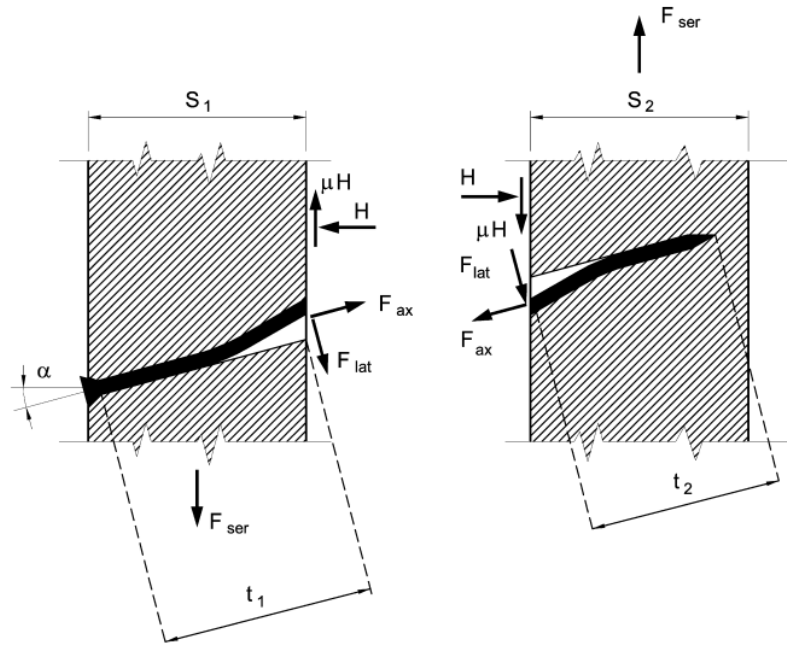
μ – trinties koeficientas tarp medienos ir varžto;

R_i – laikomoji galia.

Siūloma skaičiavimo metodika tinkama bet kokio tipo varžtams bei jungtims su kampu sriegtais tvirtinimo elementais. Toliau autoriai siūlo jungties standumo skaičiavimus šio tipo jungčiai, nes kol kas literatūroje šia tema mažai informacijos, savo skaičiavimų metodika mokslininkai parėmė laboratoriniais tyrimais (Tomasi et al., 2010).



25 pav. Poslinkių schema (Tomasi et al., 2010)



26 pav. Poveikiai jungtyje (Tomasi et al., 2010)

Kadangi varžtai jungtyje yra kampu, deformacijos išskaidomos į dvi deformacijų dedamąsias: lygiagrečiai varžtui ir statmenai varžtui (žr. 25 pav.)

$$\delta_s = \delta \cos \alpha; \quad (21)$$

$$\delta_l = \delta \sin \alpha; \quad (22)$$

čia:

δ – deformacija lygiagrečiai šlyties plokštumos;

δ_s – deformacija statmenai varžto;

δ_l – deformacija lygiagrečiai varžto;

α – varžto įsriegimo kampas.

Darant prielaidą, kad esant tinkamumo ribiniam būviui varžto elgsena yra tiesinė, galima tvirtinimo elementui užrašyti šiais lygtis:

$$F_{lat} = K_s \cdot \delta_s; \quad (23)$$

$$F_{ax} = K_l \cdot \delta_l; \quad (24)$$

čia:

F_{lat} – jėga veikianti statmenai tvirtinimo elemento ašiai;

F_{ax} – jėga veikianti lygiagrečiai tvirtinimo elemento ašiai;

K_s – varžto standumas lenkimui;

K_l – varžto standumas ašinei jėgai.

Atskirai nustatant pusiausvyrą mediniams elementams pav. gaunama išraiška:

$$F_{ser} = F_{lat} \cdot (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + F_{ax} \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha); \quad (25)$$

Iš šią lygtį įstatę lygtis, gauname išraišką:

$$F_{ser} = K_s \cdot \delta \cdot \cos \alpha \cdot (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + K_l \cdot \delta \cdot \sin \alpha \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha); \quad (26)$$

Pertvarkant lygtį ir pritaikant išraišką $K_{ser} = F_{ser} / \delta$ gauname standumo lygtį:

$$K_{ser} = K_s \cdot \cos \alpha \cdot (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + K_l \cdot \sin \alpha \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha); \quad (27)$$

Lygtys, kuriose naudojami K_{ser} , K_s , K_l nariai aprašo vieno varžto, vieno šlyties plokštumos standumą, todėl reikia įvertinti kiek jungtyje yra šlyties plokštumų ir tvirtinimo elementų.

Dydžių K_s ir K_l apibrėžimui naudojamos teorinės ir eksperimentinės išraiškos. K_s dydis gaunamas iš EC5 (7.1) lentelės. K_l dydžiui nustatyti metodikos literatūroje nėra, todėl šis dydis turi būti gaunamas eksperimentiškai.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Apžvelgta teorinių skaičiavimų metodika pateikta EC5. Pastebėta, kad konkrečios skaičiavimų metodikos tokio tipo jungčių laikomajai galiai nustatyti nėra. Pagal EC5 pateikiamas formules ištraukiamoji sraigto galia, tai yra susidarantis lyno efektas, nėra tiksliai įvertinami, ypač jei jungtyje atsiranda kampu įsriegti sraigčiai. Normose įvedamas dydis, kuriuo užduodama trintis ir veikianti ašinė jėga, priimant, kad lyno efekto indėlis laikomajai galiai turi būti ne didesnis kaip nurodo Johanseno procentinės dalys, priklausančios nuo tvirtinimo elemento tipo. Trento universiteto mokslininkų pasiūlytoje metodikoje atsiranda detalesnis varžto ištraukimo įvertinimas.

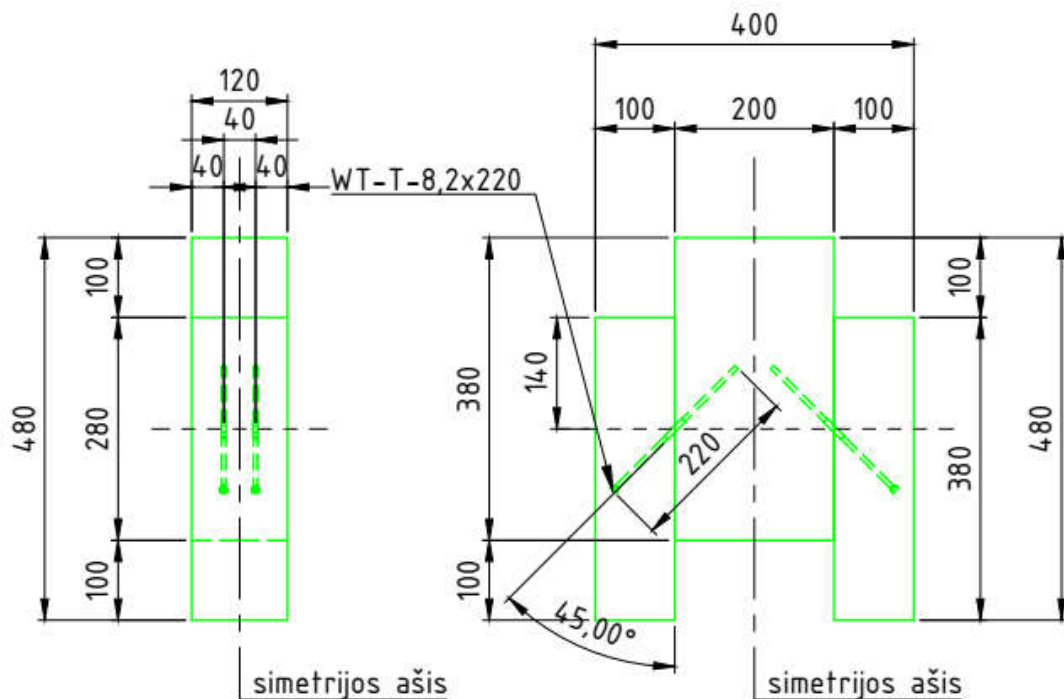
2. EC5 projektavimo normose jungties standumas vertinamas tik skersine linkme ir atsižvelgiant tik į medienos tankį ir varžto skersmenį. Norint tiksliau įvertinti jungties standumą reikia išskaidyti veikiančias jėgas ir analizuoti atskirai, ašinę deformaciją ir skersinę deformaciją, tačiau tam reikalingi papildomi tyrimai tvirtinimo elementui. Dėl šios priežasties, universalios metodikos tiksliau įvertinti jungties standumą kol kas nėra.

3. JUNGTIES MODELIAVIMAS 3D BAIGTINIAIS ELEMENTAIS

Šioje dalyje naudojantis „SolidWorks“ programiniu paketu, sumodeliuoti II-jame skyriuje aptarto laboratorinio darbo bandiniai. Modeliavimui pasitelkta 3D baigtinių elementų simuliacija ir bus bandoma atkartoti rezultatus, gautus atliekant bandymus laboratorijoje.

3.1. Modeliuojamų bandinių geometrija

Kaip jau buvo minėta ankstesniuose skyriuose, pasirinktoji jungtis sudaryta iš medinių elementų, kurie susriegti medsraigčiais (žr. 27 pav.). Modeliavimui baigtiniais elementais pasirinkta jungtis su 2 + 2 sraigtais, sriegtais 45° kampu.



27 pav. Modeliuojamos jungties S geometrija

3.2. Medžiagų modeliai

Modeliavimas atliktas „SolidWorks“ programiniu paketu. Pirmiausia buvo aprašomos fizikinės bei mechaninės mazge naudojamų medžiagų charakteristikos bei parinkti medžiagų elgsenos modeliai. Nagrinėjama jungtis susideda iš medinių elementų GL24h medienos klasės, naudojami plieniniai 10.9 stiprumo klasės medsraigčiai.

Programiniame pakete galimi medžiagų modeliai (Dassault Systemes, 2020):

- tiesinis elastinis isotropinis arba ortotropinis, medžiagos elgsena elastinga, kai jos poslinkis yra tiesiškai proporcingas veikiančiai apkrovai, o pašalinus apkrovą, medžiaga grįžta į nedeformuotą būseną ir medžiagos savybės visomis kryptimis vienodos, isotropinės medžiagos atveju ir skirtingos ortotropinės medžiagos atveju;
- elastoplastinis medžiagos modelis, naudojamas, kai norima apibūdinti medžiagos elgsena, kai įtempiai viršija takumo įtempius. Medžiagos netiesinė elgsena, pasiekus takumo įtempius, išreiškiama įtempių ir deformacijų kreive;
- Hiperelastinis medžiagos modelis naudojamas hiperelastingų medžiagoms aprašyti, kai atsiranda dideli poslinkiai, o medžiagos elgsena yra elastoplastinė, isotropinė ir nesuspaudžiama;
- viskoelastinės medžiagos modelis, parenkamas elastingoms medžiagoms, gebančioms išsklaidyti mechaninę energiją dėl klampumo;
- modžiagos valkšnumo modelis;
- nitinolio medžiagos modelis.

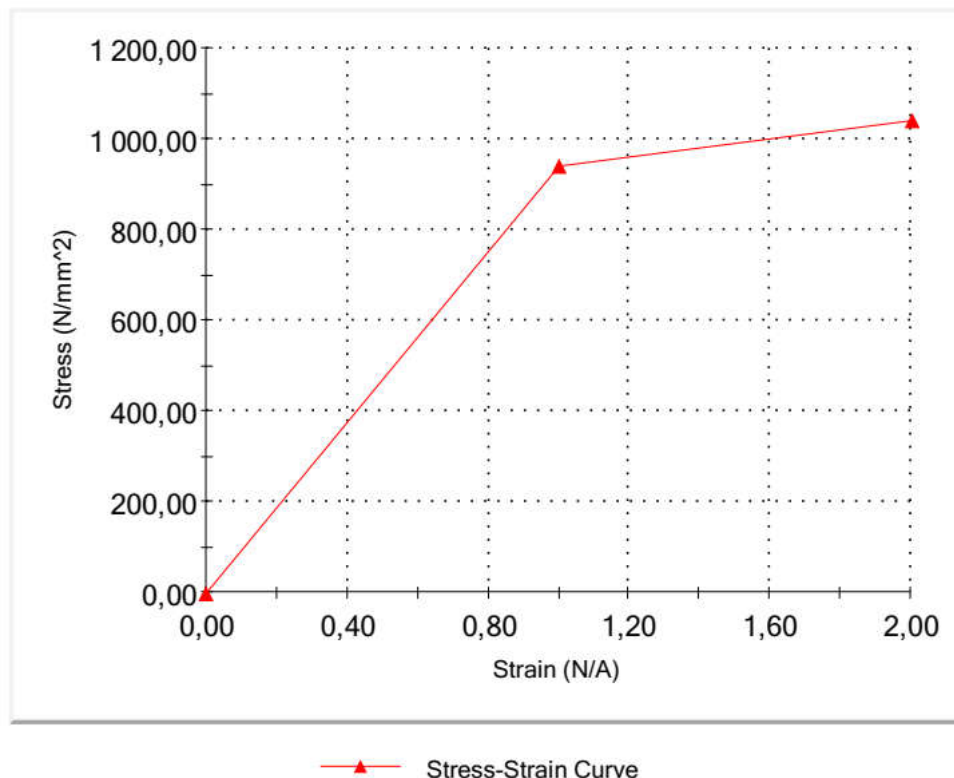
3.3. Plieninis medstraigtis, medžiagos charakteristikos

Šiame darbe plieniniams medstraigčiams panaudotas elastoplastinis medžiagos modelis. Plieno charakteristikos pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Tvirtinimo elementų charakteristikos

Klasė	10.9	-
Tankis	7850	kg/m ³
Tempiamasis stipris	1040	MPa
Takumo įtempiai	940	MPa
Puasono koef.	0.3	-

Įvesta plieno įtempių ir deformacijų kreivė pateikiant 29 pav.



28 pav. Plieno įtempių ir deformacijų kreivė

3.4. Mediniai elementai, medžiagos charakteristikos

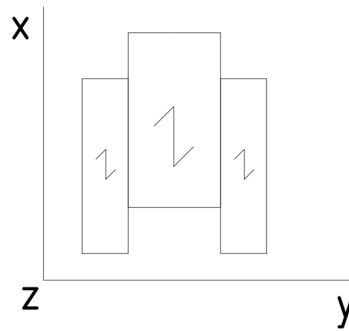
Modeliuojant medinius elementus, medienos elgsenai aprašyti reikalingas medžiagos modelis, kuris leidžia aprašyti skirtingas charakteristikas, skirtingomis kryptimis. *SolidWorks* programiniame pakete, ortotropiškumą galima aprašyti tik naudojant tiesinį elastinį modelį, todėl medienos elementai elgsis tiesiškai, tačiau žinant, kad medienos irties pobūdis trapus, t.y. ribinė deformacija yra maža, įtempių persiskirstymas yra nedidelis.

Šio modelio medienos elementai aprašomi tiesiniu elastiniu ortotropiniu medžiagos modeliu. Medienos fizikinės ir mechaninės charakteristikos parinktos pagal žinyną (Kretschmann, 1995) ir pateiktos 5 lentelėje.

5 lentelė. Medinių elementų charakteristikos

Tamprumo modulis x kryptimi	11600	N/mm ²
Tamprumo modulis y kryptimi	684	N/mm ²
Tamprumo modulis z kryptimi	1485	N/mm ²
Puasono koeficientas xy kryptimi	0,372	-
Puasono koeficientas yz kryptimi	0,467	-
Puasono koeficientas xz kryptimi	0,435	-
Šlyties modulis xy kryptimi	742	N/mm ²
Šlyties modulis yz kryptimi	708	N/mm ²
Šlyties modulis xz kryptimi	34,8	N/mm ²
Tempiamasis stipris x kryptimi (išilgai pluošto)	16,5	N/mm ²
Tempiamasis stipris y kryptimi (statmenai pluošto)	0,5	N/mm ²
Gniuždomasis stipris x kryptimi (išilgai pluošto)	24	N/mm ²
Gniuždomasis stipris y kryptimi (statmenai pluošto)	2,7	N/mm ²
Šlyties stipris xy kryptimi	2,5	N/mm ²
Tankis	380	kg/m ³

Priskiriant elementams ortotropinę medžiagą, svarbu teisingai parinkti ašis, elemento ašys parodytos 29 pav.

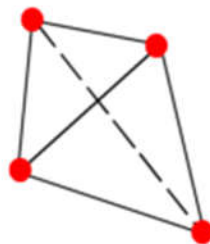


29 pav. Elemento ortotropinių charakteristinių savybių ašys

3.5. Baigtinių elementų tinklelis

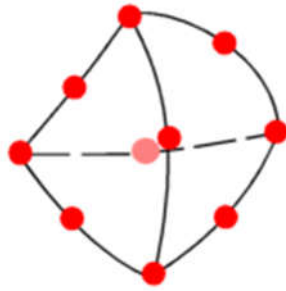
Baigtinių elementų tinklelio sudarymas, yra vienas svarbiausių analizės punktų. Optimaliai parinktas tinklelio dydis, sutaupo kompiuterio skaičiavimo laiką, bei užtikrina rezultatų tikslumą. Kadangi darbe nagrinėjamas mazgas susideda iš skirtingo dydžio elementų, baigtinių elementų dydis taip pat buvo pasirinktas kintamo dydžio.

Naudojamas programinis paketas leidžia pasirinkti žemos kokybės tinklelį, kuris sukuria linijinius tetraedrinius baigtinius elementus (žr. 30 pav.). Tai pirmosios eilės elementai, kuriuos apibūdina keturi kampiniai mazgai, sujungti šešiais tiesiais kraštais (Dassault Systemes, 2020).



30 pav. Linijinis baigtinis elementas (Dassault Systemes, 2020)

Kitas pasirinkimas yra naudoti aukštos kokybės, antrosios eilės, tinklelį, kuris sukuriamas naudojant parabolinius tetraedrinius elementus. Parabolinis tetraedrinis elementas (žr. 31 pav.), apibrėžtas keturiais kampiniais mazgais, šešiais vidurio mazgais ir šešiais kraštais (Dassault Systemes, 2020).



31 pav. Parabolinis baigtinis elementas (Dassault Systemes, 2020)

Esant vienodam elementų skaičiui nustatyta, kad naudojant parabolinius elementus rezultatai geresni, nei naudojant linijinius elementus, nes jie:

- tiksliau parodo kreivas ribas;
- pateikia geresnius apytikslius matematinius duomenis.

Tačiau paraboliniams elementams reikia daugiau skaičiavimo išteklių, nei linijiniams elementams.

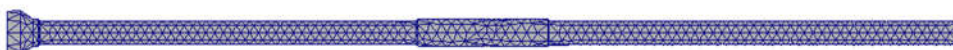
Norint optimaliai išnaudoti kompiuterio resursus, pasirinktas automatinis elementų sudalinimas, nustatant, kad mažiausias elemento dydis 0,1 mm, o didžiausias 5mm. Sudėtingos formos elementų geometrija buvo supaprastinta. Šiame darbe, sudėtingiausia forma yra medsraigčio 32 pav., jo forma buvo supaprastinta - atsisakyta sriegio (žr. 33 pav.), staigių susiaurėjimų, tai leis naudoti pastovesnio dydžio baigtinius elementus, medsraigčio tinklelis pavaizduotas 34 pav.

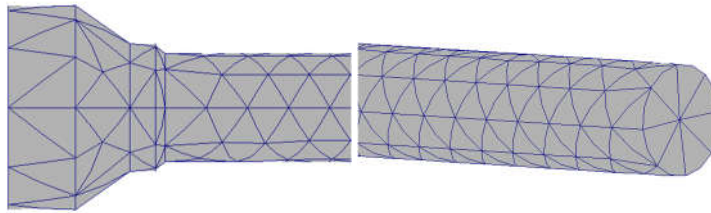


32 pav. Detalus 3D medsraigčio modelis



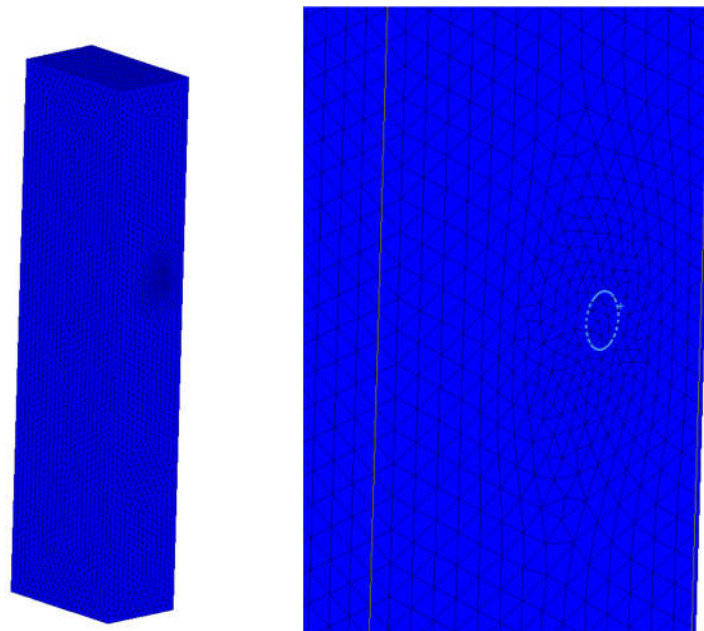
33 pav. Supaprastintas medsraigčio modelis



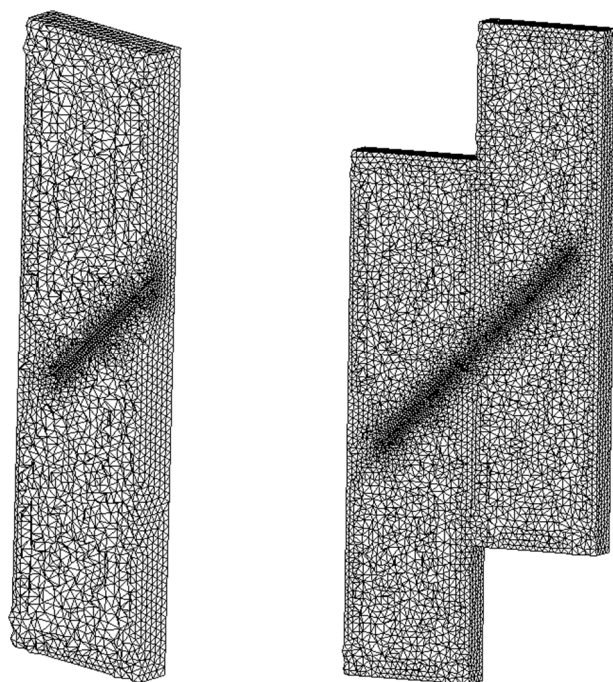


34 pav. Medsraigčio baigtinių elementų tinklelis

Kita elementų grupė – tai mediniai tašai, kadangi jų geometrija nesudėtinga, šių elementų supaprastinti nereikėjo. Norint sukurti tikslesnį ryšį tarp sraigto ir tašo, buvo parinktas sutankinimas ties sąlyčio zonomis. Atlikus galutinį kūno sudalinimą baigtiniais elementais gauti 337 610 elementai ir 478 899 mazgai, tinklelis pavaizduotas 35, 36 pav.



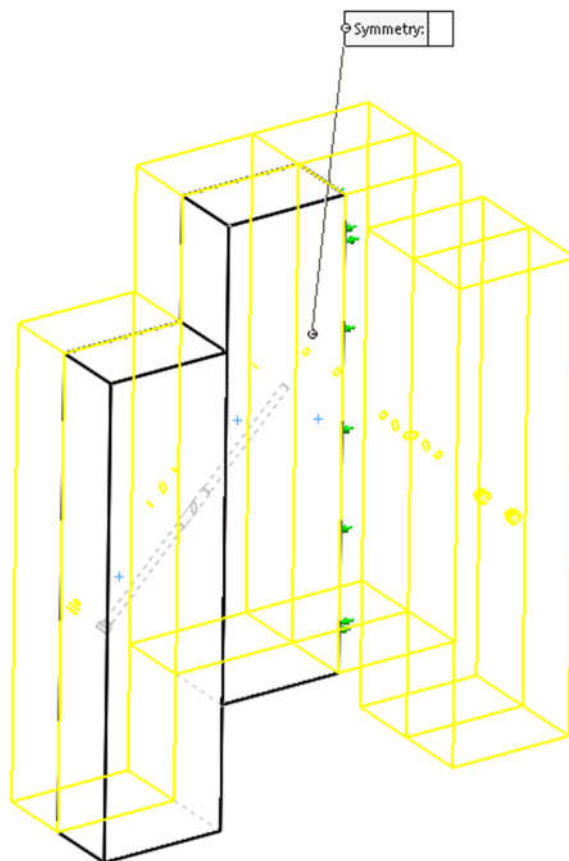
35 pav. Medinis elementas, tinklelis



36 pav. Jungties BEM tinklelis, pjūvis per sraigų plokštumą

3.6. Simetrijos sąlygos

Darbe nagrinėjama jungtis turi dvi simetrijos ašis, todėl buvo galima pritaikyti simetrijos sąlygas (žr. 37 pav.). Vietoje viso nagrinėjamo kūno, modeliuota tik $\frac{1}{4}$ jo, tai kartu, tiek pat sumažino ir baigtinių elementų skaičių, todėl buvo galima naudoti mažesnius baigtinius elementus nedidinant skaičiavimų laiko.

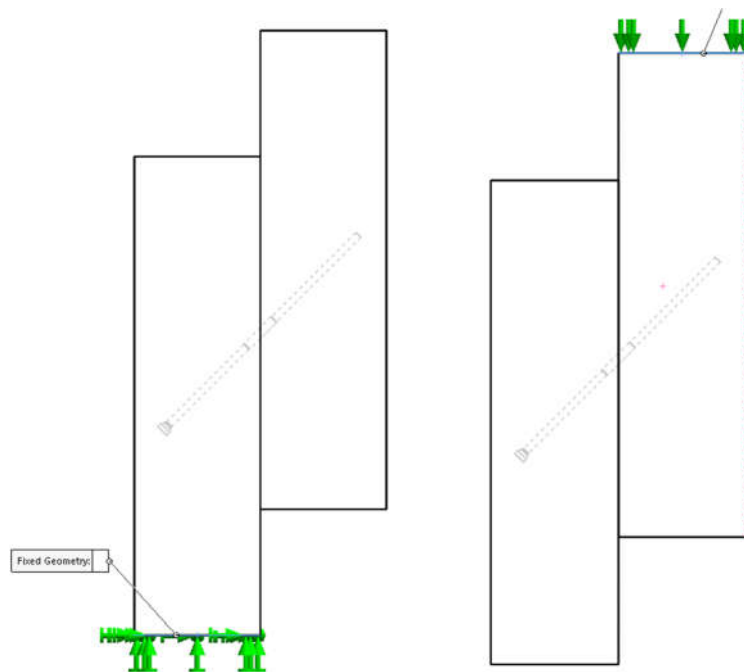


37 pav. Simetrijos sąlygos

3.7. Apkrova bei įtvirtinimas

Bandymo metu, tyrinėjamas kūnas buvo įtvirtintas: apačioje - bandinys įtvirtintas standžiai 40 pav., viršuje - pridėta jėga, per visą bandinio plotą.

Baigtinių elementų programoje šie įtvirtinimai buvo atkartoti. Apačia buvo įvirtinta standžiai, visu atraminiu plotu, kaip pavaizduota 38 pav. Viršuje, kur veikia apkrova, buvo parenkamas poslinkis nurodyta kryptimi, tai leidžia paprasčiau atkartoti bandymo apkrovas.



38 pav. Bandinio įtvirtinimas. Kairėje standus apačios įtvirtinimas, dešinėje viršuje pridėtas poslinkis

3.8. Kontaktų aprašymas

Parenkant globalius kontaktus tyrinėjamam kūnui, galima rinktis iš keleto modelių (Dassault Systemes, 2020):

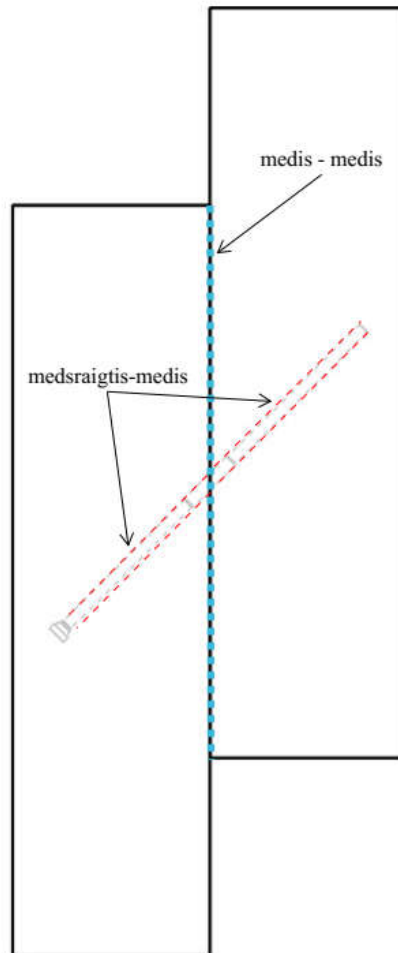
- be įsiskverbimo;
- surištą;
- išpraustinį;
- su įsiskverbimu.

Šiam darbui buvo pritaikytas surištą modelis, jį galima naudoti visų rūšių tyrimams. Programa sujungia pirmą ir antrą rinkinius, objektai gali liestis arba būti nedideliu atstumu vienas nuo kito. Jei atstumas tarp kūnų viršiją leistiną, išmetamas perspėjimas, nes tai gali duoti neteisingus rezultatus.

Toliau patikslinant kontaktus tarp kūnų panaudotas paviršiaus su paviršiumi kontaktas, kiti galimi variantai: taškas su tašku, taškas su paviršiumi.

Kontaktas tarp paviršių buvo pritaikytas medsraigčio sąlyčiui su medžiu bei medžio su medžiu sąlyčiui aprašyti 39 pav. Šį kontakto tipą lengva pritaikyti nes:

- nereikia suvesti daug atskirų taškų;
- nereikalauja suderinamų tinklelių tarp šaltinio ir tikslo;
- daugeliu atvejų gaunami tikslesni rezultatai, tačiau reikalauja daugiau laiko ir išteklių.



39 pav. Bandinio kontaktai

Ankstesniuose skyriuose aptarti baigtiniai elementai ir tinklelio sudarymas, priežastys dėl to buvo supaprastinta medsraigčio geometrija, t.y. atsisakyta sriegio. Todėl šiame žingsnyje aprašant kontaktą tarp elementų, būtina tinkamai aprašyti kontaktą, kad būtų kuo tiksliau atkartotas sriegio ištraukimas iš medžio.

Aprašytą paviršių kontaktą, papildžius trinties koeficientu, galima įvertinti pasipriešinimą ašinei jėgai, keičiant trinties koeficientą atsiranda galimybė šį parametą panaudoti modelio kalibravimui.

3.9. Analizės parametrai

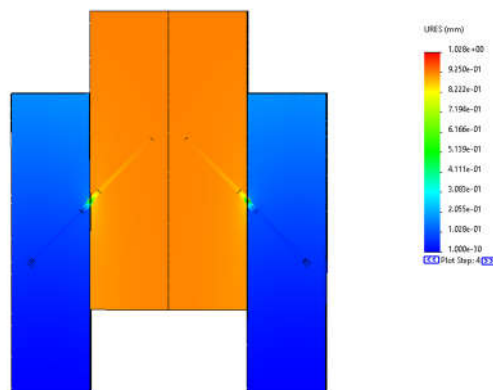
Analizei priskirta naudoti modifikuotą Niutono - Rapsono metodą (Dassault Systemes, 2020), programai automatiškai parenkant žingsnį. Atlikta keletas analizės variacijų, keičiant trinties koeficientą, tarp sraigto ir medžio paviršių.

6 lentelė. BEM analizės variacijos

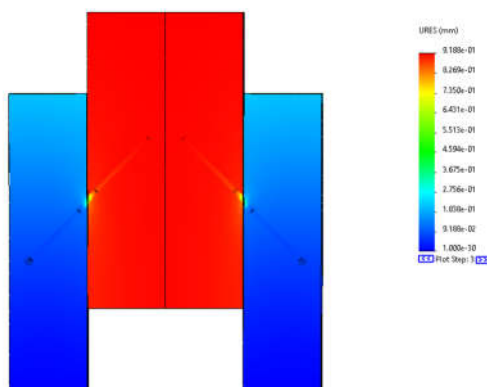
Trinties koeficientas tarp sraigto ir medienos	0,25	0,5	1,0
Analizė S	S5	S6	S4

3.10 Analizės rezultatai

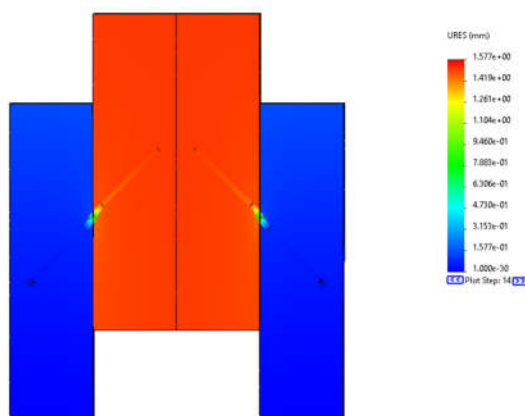
Pirmiausia aptarsime S konfigūracijos skaičiavimuose gautas deformacijas 40-42 pav. galima matyti ribines deformacijų reikšmes bei pobūdį, pateiktą 1:5 masteliu. S5 ir S6 atveju, jungties ribinė deformacija mažesnė, skaičiavimai nutrūksta pasiekiant apie 1,0 mm poslinkį, S4 atveju, kai trinties koeficientas lygus vienetui, ribinė deformacija gaunama lygi apytiksliai 1,5 mm



40 pav. S5 jungties deformacijos



41 pav. S6 jungties deformacijos

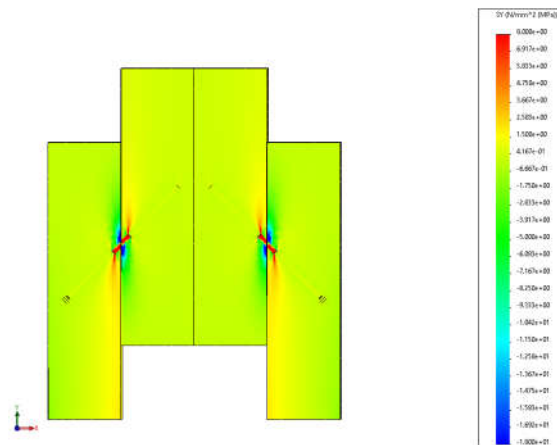


42 pav. S4 jungties deformacijos

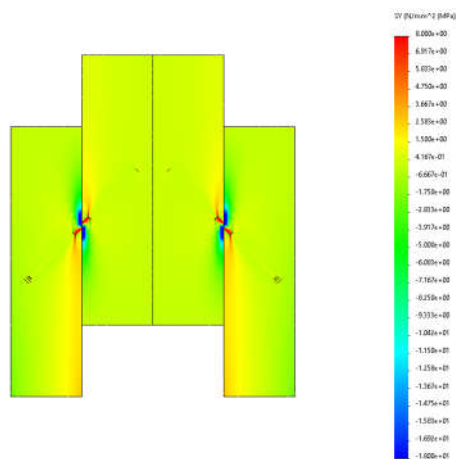
Toliau pateikiami S analizių įtempiai, tačiau SW programiniame pakete, negalima gauti medienos suminių įtempių pagal Tsai-Wu, Tsai-Hill ir ties kriterijus, kurie dažniausiai naudojami analizuojant medieną. Todėl šiame darbe bus nagrinėjami atskiri įtempiai, atskiromis kryptimis.

Šiuo atveju aktualiausi normaliniai įtempiai S_y kryptimi, pagal juos galime pamatyti, kaip pasiskirsto gniuždomos ir tempiamos zonos jungtyje. Kaip žinome šioje jungtyje svarbiausi du komponentai, tai sraigto ištraukimas bei sraigto lenkimas. Pateiktuose 43-45 pav., mėlyna spalva pavaizduoti gniuždomieji įtempiai, kurie viršija charakteristinius medienos gniuždomuosius įtempius 24,0 MPa, kad aiškiau būtų matomos šios zonos mastelis sumažintas iki 18,0 MPa. Tempiamosios zonos atsiranda, dėl sraigto ištraukimo, mažėjant trinties koeficientui, šie įtempiai mažėja. Taip yra dėl to, kad varžtui leidžiami poslinkiai ir mediena perima mažesnes jėgas.

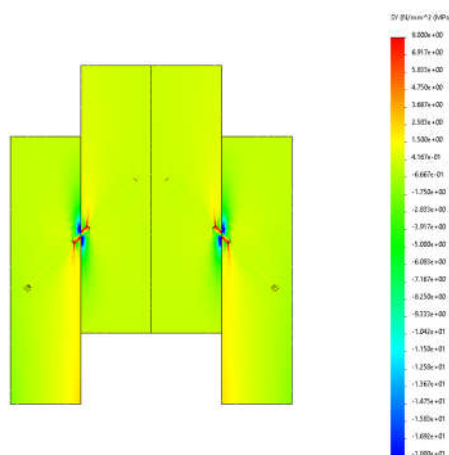
Įtempių veikimo zonos jungtyje gaunamos pakankamai lokalizuotos, tam galimai turi įtakos pasirinktas tiesinis medienos medžiagos modelis, turint netiesinį medžiagos modelį dėl įtempių persiskirstymo įtempiai pasklistų didesniame plote.



43 pav. S5 Sy normaliniai įtempiai



44 pav. S6 Sy normaliniai įtempiai



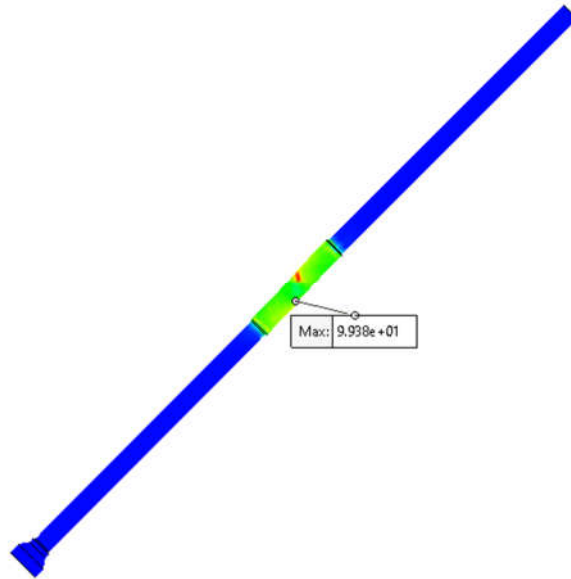
45 pav. S4 Sy normaliniai įtempiai

Gautos apkrovos ir poslinkio reikšmės pateiktos grafike, jos buvo nubraižytos atidedant ribinę apkrovą ir gautą poslinkį ir elgsena priimta, kaip tiesinė, norint patikslinti netiesinę elgseną, reikalinga atlikti papildomas simuliacijas, papildomais poslinkio ar apkrovos žingsniais. Kitas variantas – naudoti silpnesnius sraigtus su mažesniu takumo momentu ir naudoti stipresnę medieną. Simuliacijų kintamuoju buvo priimtas trinties koeficientas, tarp sraigto ir medienos paviršių.



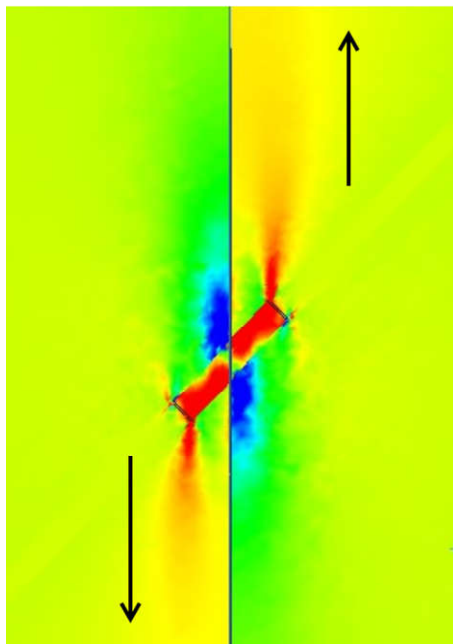
46 pav. BEM modelio apkrovos ir poslinkio kreivės

Dėl atsirandančių didelių poslinkių, skaičiavimo programa simuliacijas nutraukia, todėl ir šiame atveju apibrėžia medienos gniuždomųjų zonų suirimas. Tvirtinimo elemente, maksimalūs vonMises įtempiai gaunami 99 MPa, takumo riba nepasiekiamo (žr. 47 pav.), todėl jungties elgseną gauname tiesinę. Kaip jau buvo minėta ankstesniuose poskyriuose, medienai aprašyti turėjome tik tiesinį medžiagos modelį.



47 pav. Tvirtinimo elementas S4, vonMises įtempiai MPa

Nagrinėjat įtempius (žr. 48 pav.), modelyje matomos gniuždomosios zonos (mėlyna spalva), sekančiame skyriuje šie rezultatai bus palyginti su laboratorinių tyrimų rezultatais, kadangi varžto takumo momentas nepasiekiamas ir neatsiranda liekamosios deformacijos, jungties suirimas įvyksta staigus.



48 pav. Kairėje BEM modelio S_y įtempiai

3.11 Trečiojo skyriaus išvados

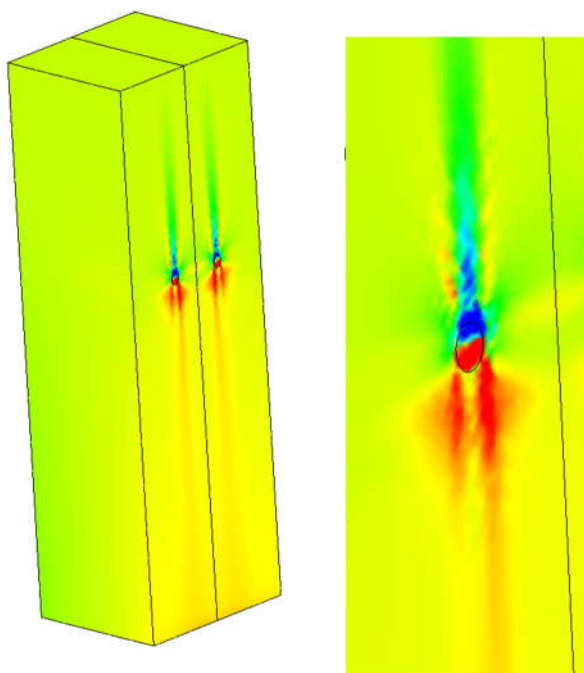
1. Norint sumodeliuoti 3D baigtinių elementų modelį, pirmiausia reikalinga turėti medžiagų fizines bei mechanines charakteristikas, kurios gali būti gaunamos iš žinynų, standartų, arba nustatomos laboratoriniais tyrimais. Norint apsirašyti medinius elementus būtinos charakteristikos skirtingomis kryptimis: tamprumo modulis, Puasono koeficientas, šlyties koeficientas, tempiamasis stipris, gniuždomasis stipris, šlyties stipris ir tankis, aprašant plieną reikalinga žinoti tankį, tempiamąjį stiprį, takumo įtempius, Puasono koeficientą.
2. Baigtinių elementų tinklelis turi būti smulkinamas atsižvelgiant į naudojamų elementų dydį, bei formos sudėtingumą, nes tai daro didžiausią įtaką skaičiavimų laikui, bei rezultatų tikslumui. Taip pat galima supaprastinti skaičiuojamąsias schemas, supaprastinti elementų geometriją, tačiau tai būtina įvertinti naudojant papildomus parametrus, aprašant kontakto taškus.
3. Baigtinių elementų modelyje panaudojus tiesinį - elastinį ortotropinės medžiagos modelį, aprašyti medienai bei netiesinį – elastinį isotropinį modelį, aprašyti plienui. Buvo gautas modelis, kuriame tvirtinimo elementams gali pasireikšti netiesinė elgsena, o mediniai elementų elgsena visada gaunama tiesinė.
4. Rezultatai kurias galime remtis, tai deformacijų ir apkrovos reikšmės. Modelio kintamasis buvo pasirinktas trinties koeficientas (0,25; 0,50; 1,0) tarp tvirtinimo elemento ir medienos paviršių. Didėjant trinties koeficientui, skaičiavimų metu buvo pasiektos didesnės ribinės deformacijos, bei galutinė irties apkrova. Didžiausias sutapimas su eksperimentiniais rezultatais buvo pasiektas koeficientui esant 1,0.

4. TIRIAMOSIOS JUNGTIES ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ BEI MODELIAVIMO PALYGINIMAS SU LABORATORINIAIS REZULTATAIS

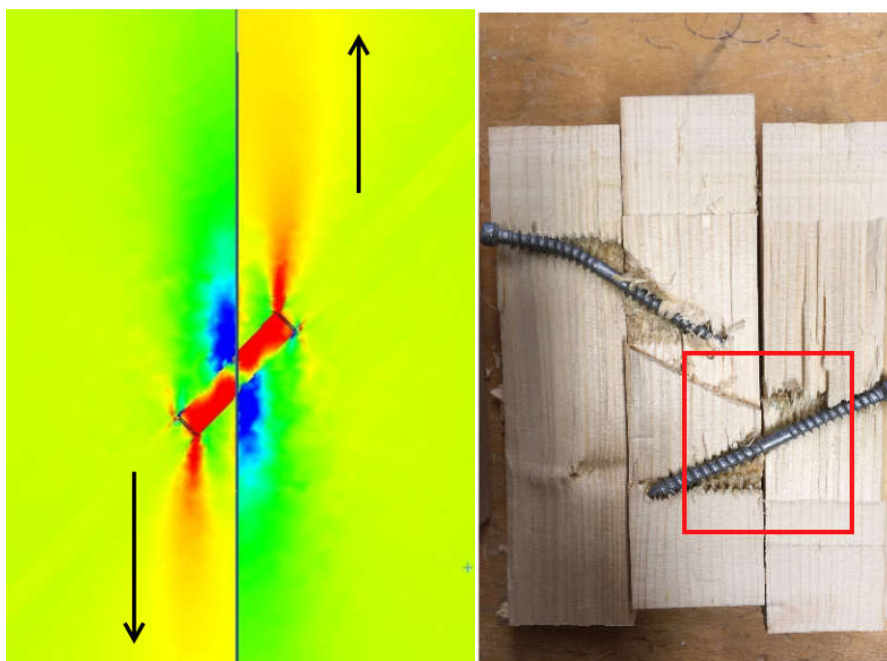
4.1 Jungties elgsenos palyginimas tarp laboratoriniais tyrimais tirtosios ir BEM gautosios

Pirmajame skyriuje aptarti medinių jungčių su kampu sriegtais varžtais laboratoriniai tyrimai. Antrajame skyriuje aprašyta skaičiavimų metodika, paremta Eurokodu 5, kuria remiantis skaičiuojamos tiriamojo tipo jungtys. Trečiajame skyriuje, išsirinkus vieną iš 1 skyriuje tyrinėtų jungčių, sukurtas baigtinių elementų modelis naudojant SOLIDWORKS programinį paketą. Turint šiuos duomenis galima nustatyti, kokią apytikslę atsargą gauname remdamiesi EC5 skaičiavimų metodika bei ar baigtinių elementų modelio elgsena atitinka nustatytąją laboratoriniais tyrimais.

Lyginant 1 skyriuje vieną iš aptartųjų suirimo formų (50 pav.) su gautuoju baigtinių elementų modeliu, galima pastebėti, kad gniuždomosios zonos įtempiai sutampa su bandinio suirimo vaizdu, kur susiglemžia mediena ir jungtis visiškai praranda laikomąją galią. Realioje jungtyje matyti, kad vienas iš tvinimo elementų nepasiekė plieno takumo įtempių ir neturi aiškių liekamųjų deformacijų. Lyginant varžto deformacijas, kurios pavaizduotos 51 pav., galima pastebėti, kad realioje jungtyje varžtas linksta šiek tiek nutolęs nuo šlyties plokštumos, skaitinio modeliu atveju, didžiausios deformacijos fiksuojamos ties šlyties plokštuma.

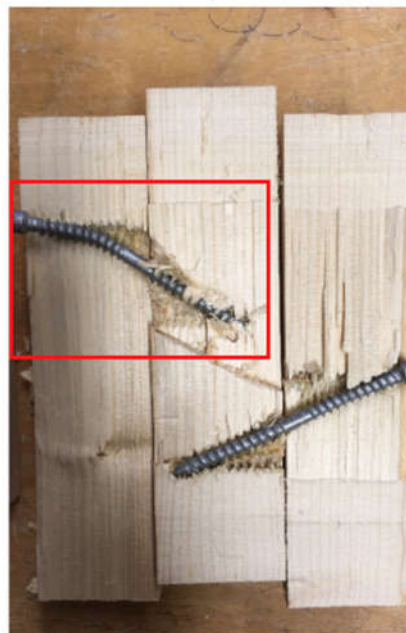
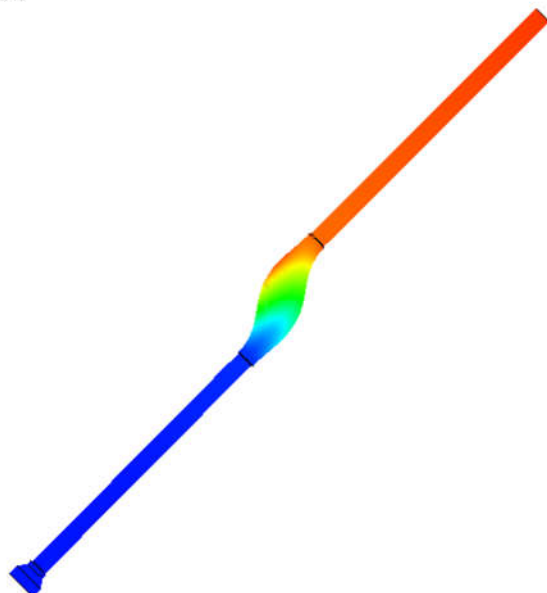


49 pav. 3D modelio S_y įtempiai mediniame elemente



50 pav. Kairėje BEM modelio S_y įtempiai, mėlyna spalva – gniuždomoji zona, raudona spalva tempiamoji zona. Dešinėje pavaizduota viena iš galimų irties formų (Tomasi et al., 2010)

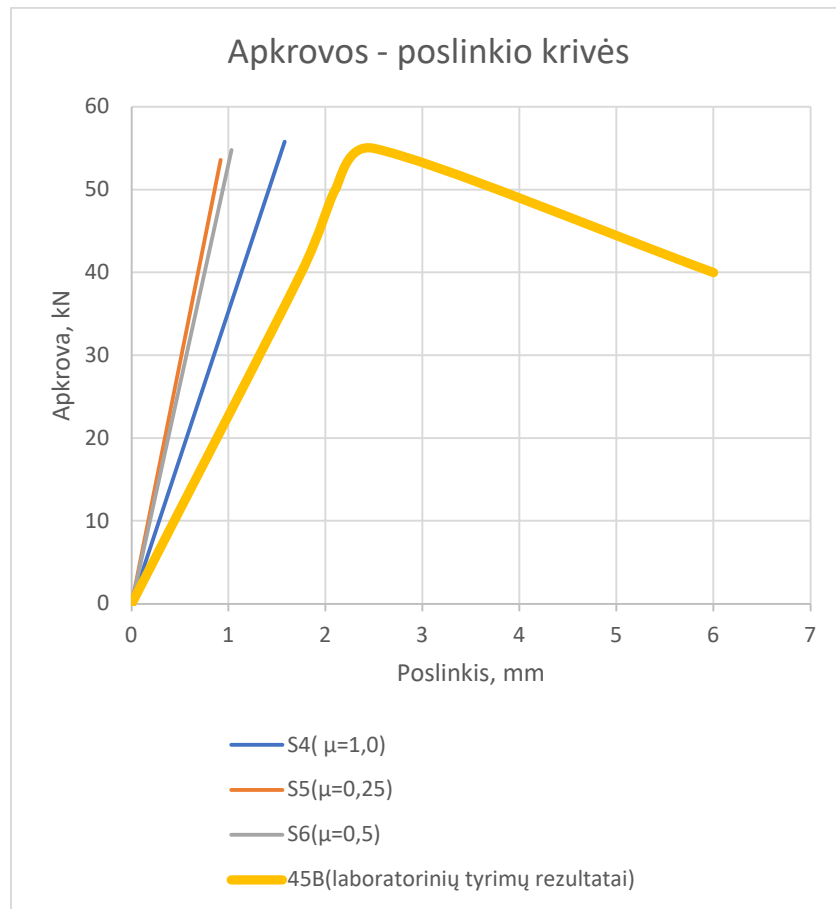
Deformation scale: 10



51 pav. Varžto deformacijos palyginimas su realia elgsena (Tomasi et al., 2010)

Jungtyje esantiems tvirtinimo elementams nepasiekus takumo įtempių ir neatsirandant plastinėms deformacijoms, jungties elgsena ilgą laiką išlieka tiesinė. Modeliavimui pasirinkta jungtis, kur tvirtinimo elementai į medieną įsriegiami 45 laipsnių kampu 52 pav. galime matyti, kad

jungtis suįra staiga, tačiau kai varžtas sriegiamas, kad būtų statmenas šlyties plokštumai, galima pastebėti žymią netiesinę elgseną. BEM analizės metu, skaičiavimai nutrūko pasiekus 1,5 mm poslinkį ir esant 55, 8 kN apkrovai, taigi BEM pakankamai tiksliai atkartoja jungties elgseną, tačiau sumodeliuotas modelis neparodo netiesiškumo ir pasiekiamos mažesnės ribinės deformacijos negu realioje jungtyje.



52 pav. Modeliuojamos jungties apkrovos ir deformacijų kreivių (S4, S5, S6) palyginimas su laboratorinių tyrimų rezultatais (Tomasi et al., 2010)

4.2. Laikomosios galios palyginimas

Toliau 7 lentelėje pateikiama jungties didžiausia laikomoji galia, nustatyta skirtingomis metodikomis. Naudojant EC5 metodiką nagrinėjamos jungties laikomoji galia gauta lygi 30 kN, lyginant su laboratorinių tyrimų rezultatais, kur laikomoji galia nustatyta 55 kN, matome, kad skirtumas lygus beveik du kartus, įvedus atsargos koeficientus, šis skirtumas dar išaugtų. Trento universiteto mokslininkų modifikuota skaičiavimų metodika priartina rezultatą arčiau realios laikomosios galios, tačiau, kaip jau buvo minėta ankstesniuose tyrimuose, naudojant šia metodiką reikalingi papildomi duomenys, kurios reikia nustatyti laboratoriniais tyrimais. Kalbant apie baigtinių elementų modelį, laikomoji galia nustatyta 55,8 kN, rezultatas gaunamas artimas laboratoriniais tyrimais nustatytajam.

7 lentelė. Laikomoji galia, nustatyta skirtingais metodais

Metodas	Laikomoji galia, kN
Laboratoriniai tyrimai	55,0
Skaičiavimai EC5	30,0
Trento universiteto metodika	48,0
BEM modelis	55,8

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

1. Medinių elementų sraigtinėse jungtyse, veikiamose sraigto ištraukimo bei tvirtinimo elemento šlyties jėgų, nėra plačiai išanalizuotos, nėra tikslių metodų apskaičiuoti laikomąją galią, todėl aktualu panagrinėti esamus skaičiavimo modelius, palyginti juos tarpusavyje.
2. Šiame darbe išanalizuoti trys laboratoriniai tyrimai, kuriuose nustatomos tiriamosios jungties charakteristikos. Tyrimų šioms jungtims nėra daug, pagrindiniai tyrimų aspektai – tai sraigto ištraukimo galios nustatymas, tvirtinimo elemento lenkiamoji galia. Rezultatai pateikiami aptariant irties pobūdį, medinių elementų ir sraigtų deformacijas.
3. Darbe aptartas medinių jungčių modeliavimas baigtiniais elementais, kuris leidžia tyrinėti jungtis neatliekant laboratorinių bandymų, nes tai kartais gali būti neįmanoma dėl tiriamojo objekto gabaritų, brangių medžiagų. Svarbiausi faktoriai modeliuojant medinės konstrukcijas – tai tinkamai parinkti medžiagos modeliai, dėl medienos ortotropinių savybių. Kitas svarbus aspektas yra pagal jungties principus tinkamai aprašyti kontaktus tarp atskirų elementų.
4. Antrajame skyriuje išnagrinėtos nagrinėjamos jungties skaičiavimo metodikos. Pagrindinė skaičiavimų problematika yra ištraukiamosios galios įvertinimas skaičiavimuose, kuris išreiškiamas per medienos tankį ir tvirtinimo elemento skersmenį, tačiau kaip buvo aptarta 1 skyriuje, praktikoje naudojami įvairių tipų sraigai su skirtingais sriegimais, dvigubu sriegiu. Dėl šių priežasčių, šio tipo jungtims reikalingi tolimesni tyrimai ir metodikos pildymas.
5. Tiriamojoje dalyje atlikto skaitinio modeliavimo baigtiniais elementais rezultatai rodo, kad imituojant sriegį ir kontaktą aprašant trinties koeficientu, tarp medienos ir plieno, lygiu 1.0, gauname rezultatus artimus laboratoriniams tyrimams. Norint tinkamai sukalibruoti modelį, reikalingi realūs jungties tyrimų rezultatai. Neturint laboratorinių tyrimų duomenų, galima remtis medžiagų charakteristikų žinynais. Modelyje panaudojus tiesinį - elastinį ortotropinės medžiagos modelį, aprašyti medienai bei netiesinį – elastinį isotropinį modelį, aprašyti plienui, gautas modelis, kuriame tvirtinimo elementams gali pasireikšti netiesinė elgsena, o mediniai elementų elgsena visada gaunama tiesinė.



LITERATŪROS SĄRAŠAS

Loss, C., Hossain, A., Tannert, T. (2018). *Simple cross – laminated timber shear connections with spatially arranged screws*. Canada.

European Committee for Standardization. (1991). *Structural timber. Testing of joint made with mechanical fasteners. Requirements for wood density. EN 28970*, CEN, Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization. (1999). *EN 26891:1999. Timber structures. Joints with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics*, CEN, Bruxelles, Belgium.

European Committee for Standardization, (2001). *EN 12512: Timber structures – Test methods – Cyclic testing of Joints made with mechanical fasteners*, CEN, Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization, (2009). *EN 338: Structural timber – Strength classes*, CEN, Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization. (2009). *EN 409:2009, Timber structures - Test methods - Determination of the yield moment of dowel type fasteners*. CEN, Bruxelles, Belgium.

European Committee for Standardization. (2016). *EN 338:2016. Structural timber – Strength Classes*. CEN, Bruxelles, Belgium.

European Committee for Standardization. (2016). *EN 1382:2016, Timber structures – Test methods – Withdrawal capacity of timber fasteners*. (CEN), Bruxelles, Belgium.

Dassault Systemes. (2020). *SolidWorks Web Help*, Waltham, USA.

Gečys, T. (2011). *Pusiau standžių medienos – metalo jungčių klasifikacija ir elgsenos apžvalga*. Vilnius.

Gečys, T. (2019). *Tvari statyba nebe privilegija: pasaulis rodo pavyzdį. Statyba.Architektūra*. Prieiga per internetą: <https://sa.lt/tvari-statyba-nebe-privilegija-pasaulis-rodo-pavyzdi/>

Gečys, T., Bader, T.K.,Olsson, A.,Kajėnas, S.(2019). *Influence of the rope effect on the slip curve of laterally loaded, nailed and screwed timber-to-timber connections*.

Gečys, T., Daniūnas A., Bader, TK., Wagner L., Eberhardsteiner J. (2015). *3D finite element analysis and experimental investigations of a new type of timber beam-to-beam connection*. Vilnius.

Gečys, T., Daniūnas, A., Gurkšnys, K., Rasiulis, K. (2012). *Klijuotosios medienos sijos elementų tarpusavio jungties eksperimentinis tyrimas*. Vilnius.

Girhammar, A. U., Jacquier, N., Kallsner, B. (2017). *Stiffness model for inclined screws in shear – tension mode in timber – to – timber joints*. Sweden.

Kuklik, P. (2008). *Design Of Timber Structures According To Eurocode 5. Handbook 2*. Ostrava.

Kretschmann D. E (1999). *General Technical Report. Mechanical Properties of Wood*.

LST EN 1995–1–1:2005+AC:2006. *Eurokodas 5. Medinių konstrukcijų projektavimas. 1 – 1 dalis. Bendrosios nuostatos. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Lietuvos standartizacijos departamentas.

Rothoblaas. Prieiga per internetą: www.rothoblaas.com/

Schiro, G., Giongo, I., Sebastian, W., Riccadonna, D., Piazza, M. (2018). *Testing of timber-to-timber screw-connections in hybrid configurations*. Trentas, Italija.

Tomasi, R., Crosatti, A., Piazza, M. (2010). *Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws*. Trentas, Italija.

Valentinavičius, A., Valiūnas, B. (2000). *Medinės konstrukcijos: enciklopedija*. Vilnius: Technika.