

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

Fernando Murilo Gontijo Ramos

**CONECTOR DE AÇO PARA LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS DE MADEIRA
LAMINADA COLADA CRUZADA E ENTRE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA
COLADA CRUZADA E LAJE DE CONCRETO PRÉ-FABRICADO**

Belo Horizonte

2023

Fernando Murilo Gontijo Ramos

**CONECTOR DE AÇO PARA LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS DE MADEIRA
LAMINADA COLADA CRUZADA E ENTRE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA
COLADA CRUZADA E LAJE DE CONCRETO PRÉ-FABRICADO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues.

Co-orientador: Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco.

Belo Horizonte

2023

R175c

Ramos, Fernando Murilo Gontijo.

Conector de aço para ligações entre painéis de madeira laminada colada cruzada e entre painéis de madeira laminada colada cruzada e laje de concreto pré-fabricado [recurso eletrônico] / Fernando Murilo Gontijo Ramos. - 2023.

1 recurso online (259 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Francisco Carlos Rodrigues.

Coorientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 236-259.

Bibliografia: f. 230-235.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Construção de madeira - Teses. 3. Construção de concreto - Teses. 4. Edifícios sustentáveis - Teses. 5. Lâminas de madeira - Teses. 6. Lajes de concreto - Teses. 7. Flexão (Engenharia civil) - Teses. I. Rodrigues, Francisco Carlos. II. Carrasco, Edgar Vladimiro Mantilla. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**ATA DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 92 DO ALUNO FERNANDO MURILO GONTIJO RAMOS.**

Às 15:00 horas do dia 30 do mês de junho de 2023, reuniu-se em ambiente virtual, na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em 08 de maio de 2023, para julgar a defesa da Tese de Doutorado intitulada "CONECTOR DE AÇO PARA LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA E ENTRE PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA E LAJE DE CONCRETO PRÉ-FABRICADO", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de DOUTOR EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues - DEES - UFMG (Orientador)
Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco - TAU - ARQUITETURA/UFMG (Coorientador)
Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas - DEES - UFMG
Prof. Dr. Eduardo Chahud - DEMC-UFMG
Prof. Dr. Lourival Marin Mendes - UFLA
Prof. Dr. Eliene Pires Carvalho - CEFET - MG

Após reunião, a Comissão considerou o candidato APROVADO, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 30 de junho de 2023.

Observações:

1. A aprovação do candidato na defesa da Tese de Doutorado não significa que o mesmo tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Estruturas;

2. Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Chahud, Coordenador(a)**, em 30/06/2023, às 18:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2023, às 19:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Carlos Rodrigues, Professor do Magistério Superior**, em 04/07/2023, às 12:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Eliene Pires Carvalho, Usuário Externo**, em 04/07/2023, às 18:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 06/07/2023, às 09:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Lourival Marin Mendes, Usuário Externo**, em 06/07/2023, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Felício Bruzzi Barros, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 08/08/2023, às 14:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2414425** e o código CRC **BEA84F3C**.

Dedico aos meus filhos, Marina e Júlio, pela permanente parceria e pelo vigor que me ensinam, na cobrança ou no sorriso. A eles devo a minha, difícil, mas feliz reeducação.

*À Valéria, pelo incentivo, inspiração e apoio sempre presentes.
À memória do meu pai e da minha querida e resiliente mãe que tanta falta fazem.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus agradecimentos aos professores, Dr. Edgar Mantilha Carrasco e ao Dr. Francisco Carlos Rodrigues, meus orientadores, pelo entusiasmo, ideias e apoio.

Ao professor Dr. Rodrigo Barreto Caldas, muito obrigado pelo suporte no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao professor Élvio Mosci Piancastelli pela atenção, amparo e apoio inestimáveis nessa empreitada.

Aos colegas de doutorado que me apoiaram e, em especial, Silvia Amorim, que não me faltou quando eu mais necessitei.

Muito obrigado aos técnicos de laboratório, Afonso e Geraldo, pelo incansável apoio, alegria e disposição durante todo desenvolvimento da parte prática desse trabalho, ao Heron, Gabriel e Zé, companheiros de labuta.

Às empresas, CROSSLAM, PRECON e CISER, pela fabricação e doação dos elementos estruturais necessários para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos que de forma direta ou indireta participaram e colaboraram para a minha formação acadêmica e pessoal dentro e fora da Universidade.

Sinto-me, eternamente, obrigado.

RESUMO

A madeira ainda está a ser redescoberta como material de construção de excelência no Brasil e, principalmente, como um dos mais ecológicos. No cenário da produção de edificações sustentáveis, o sistema construtivo que utiliza painéis de madeira - largamente utilizado na Europa, Estados Unidos e Canadá - denominado de Madeira Laminada Colada (MLC) e Madeira Laminada Cruzada (CLT), ocupa um lugar de destaque, sobretudo pela possibilidade de emprego de madeiras provenientes de florestas plantadas. Este trabalho desenvolveu um conector de aço, para utilização nas ligações de painéis CLT com painéis CLT e painéis CLT com lajes de concreto pré-fabricadas e, para tanto, fazer uma avaliação de forma experimental, através de ensaios *push-out*, ou seja, cisalhamento direto, simples e duplos, ensaios de flexão e torção, para verificação do comportamento estrutural desses conectores em situações de serviço. Os resultados desses ensaios serão comparados com os resultados obtidos através das equações propostas nas normas de projeto EUROCODE 4 e 5, e na norma de ensaio EN 26891, 1991. Numa primeira etapa foi apresentada a idéia geral do sistema construtivo no qual os conectores se inserem, seus elementos constituintes e suas ligações. Posteriormente, foi avaliado de forma experimental o comportamento desses conectores de aço na ligação de painéis de CLT com painéis CLT e com laje pré-fabricada de concreto. Esses painéis foram fabricados (utilizando-se do *Eucalyptus Grandis*) e analisados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) e Centro Avançado de Pesquisa da Madeira, Móveis e Novos Materiais (CEPAM III), ambos do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Nessa segunda etapa, foram avaliados os resultados do experimento com painéis CLT fabricados industrialmente no país, através de avançada tecnologia de fabricação, utilizando-se a madeira *Pinus Taeda*, foram comparados os resultados experimentais com a metodologia preconizada pelo EUROCODE 5 que revelou-se conservadora e que, em geral, podemos deduzir que as propriedades de resistência das conexões mistas de madeira e concreto devem ser avaliadas por ensaios.

Palavras-chave: Conexões de Madeira e Concreto; Sistema Construtivo Misto; Madeira Laminada Colada Cruzada / Madeira Laminada Colada; Ligação de Madeira Laminada Colada Cruzada e laje de Concreto.

ABSTRACT

The wood is still being rediscovered as an excellent construction material in Brazil, and mainly, as one of the most ecological material. In the production scene of sustainable building scenario, the constructive system that uses wooden panels – widely used in Europe, United States and Canada – called as Glued Laminated Timber (GLT) and Cross Laminated Timber (CLT), occupies a prominent place, especially for the possibility of using the wood from planted forests. This work developed a steel connector, to be used in the connections of CLT panels with CLT panels, and prefabricated concrete slabs with CLT panels and therefore, to make an experimental evaluation, through push-out test evaluation, which means shear testing both single and double shear, torsion and flexion evaluations. All that to assert and verify the structural behavior of these connectors in situations of service. The results of these tests will be compared with the results obtained using the equations proposed in EUROCODE design standards 4 and 5, and in test standard EN 26891, 1991. In a first step, it was introduced the general idea of the constructive system in which the connectors are inserted, its constituent elements and its connections. Afterwards the behavior of steel shear connectors in connection to CLT panels, was evaluated in an experimental way using CLT panels and prefabricated concrete slabs. These panels were fabricated (with Eucalyptus Grandis) and analysed in the Laboratory of Experimental Analysis of Structures (LAES) and Advanced Research Center for Wood, Furniture and New Materials (CEPAM III), both from the Structural Engineering Department of Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. In this second stage, the results of the experiment with CLT panels manufactured industrially in the country were evaluated, through advanced manufacturing technology, using Pinus Taeda wood, the experimental results were compared with the methodology recommended by EUROCODE 5 which proved to be conservative and that, in general, we can deduce that the strength properties of the mixed connections of wood and concrete should be evaluated by tests.

Keywords: Wood and Concrete connections; Mist Constructive System; Cross Laminated Timber/ Glued Laminated Timber; Cross Laminated Timber binding and Concrete Slab.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de Edificação Construída com CLT.....	24
Figura 1.2 - Madeira exposta ao fogo por 30 minutos.....	27
Figura 2.1 - Madeira Laminada Colada (MLC).....	34
Figura 2.2 - Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT).....	34
Figura 2.3 - Edifício construído com CLT.....	35
Figura 2.4 - Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT).....	36
Figura 2.5 - Construção com Painel de CLT.....	38
Figura 2.6 - Construção com Painel de CLT.....	39
Figura 2.7 - Sistema pré-fabricado utilizando-se lajes alveolares de concreto.....	43
Figura 2.9 - Tipos de cantoneiras.....	43
Figura 2.10 - Cantoneiras de teto.....	43
Figura 2.11- Cantoneira de piso.....	43
Figura 2.12 - Conector para vigas.....	44
Figura 2.13 - Conector oculto para viga.....	44
Figura 2.14 - Conector para vigas.....	44
Figura 2.15 - Conector oculto para vigas.....	44
Figura 2.16 - Sistema de Ligação X Rad.....	45
Figura 2.17 - Sistema de Ligação X Rad.....	45
Figura 2.18 - Arranjo de ligação a ser estudado por Duarte (2004).....	46
Figura 2.19 - Modos de ruptura das ligações.....	47
Figura 2.20 - Aplicação de carga.....	49
Figura 2.21 - Características geométricas dos conectores utilizados.....	53
Figura 2.22 - a) Programa de carga.....	54
Figura 2.22 - b) Curva carga-deslocamento esperada.....	54
Figura 2.23 - Arranjos para teste <i>push-out</i> padrão (mm) - EUROCODE 4.....	56
Figura 2.24 - Arranjos para testes <i>push-out</i> de concreto e madeira - centro de concreto e madeira dos lados e centro de madeira e concreto dos lados.....	57
Figura 2.25 - Arranjo para teste <i>push-out</i> de cisalhamento puro.....	58
Figura 2.26 - Armação das lajes de concreto	58
Figura 2.27 - Concretagem das lajes.....	58
Figura 2.28 - Painéis de madeira com o conector colado.....	59
Figura 2.29 - Modelo CWC - Tipo A.....	59
Figura 2.30 - Modelo CWC - Tipo B.....	59
Figura 2.31 - Modelo CWC - Tipo C.....	60
Figura 2.32 - Falha no concreto.....	60
Figura 2.33 - Falha no conector e na madeira.....	60

Figura 2.34 - Comparação de resultados experimentais para o módulo de deslizamento e a previsão do EURODE 5, Turrini (1993) e Ceccotti (1995).....	66
Figura 2.35 - Curva de carga/tempo segundo o EN 26891, 1991.....	67
Figura 2.36 - Procedimento de aplicação de carga no ensaio de cisalhamento.....	68
Figura 3.1 - Painéis CLT - LENO - MetsäWood.....	71
Figura 3.2 - Montagem de Painéis CLT - LENO.....	72
Figura 3.3 - Laje pré-fabricada alveolar, içada na obra.....	73
Figura 3.4 - Possibilidades de arranjos e montagem das lajes.....	73
Figura 3.5 - Sistema de montagem da laje com garras e cabos para içamento.....	74
Figura 3.6 - Estudos para conector.....	75
Figura 3.7 - Estudos para conector.....	76
Figura 3.8 - Estudos para conector.....	77
Figura 3.9 - Estudos para conector em aço sextavado.....	78
Figura 3.10 - Estudos para conector.....	79
Figura 3.11 - Corte transversal da ligação do conector 1 com a base de concreto.....	81
Figura 3.12 - Corte longitudinal da ligação do conector com a base de concreto.....	58
Figura 3.13 - Modelo da ligação dos painéis com a base de concreto.....	83
Figura 3.14 - Corte transversal da ligação dos painéis com a laje de concreto.....	84
Figura 3.15 - Corte longitudinal da ligação dos painéis com a laje de concreto.....	85
Figura 3.16 - Modelo da ligação dos painéis com a laje de concreto.....	86
Figura 3.17- Corte transversal da ligação de painel CLT com painel CLT.....	87
Figura 3.18 - Corte longitudinal da ligação de painel CLT com painel CLT.....	88
Figura 3.19 - Modelo da conexão entre painéis de topo.....	89
Figura 3.20 - Conexão dos painéis em T.....	90
Figura 3.21 - Conexão dos painéis de canto.....	91
Figura 3.22 - Conexão com a laje de cobertura com platibanda.....	93
Figura 3.23 - Conexão com a laje de cobertura sem platibanda.....	94
Figura 3.24 - Conexão com a laje de cobertura sem platibanda.....	94
Figura 4.1 - Lote de "EucaliptusGrandis"	97
Figura 4.2 - Peças nas dimensões finais.....	97
Figura 4.3 - Quadro Suporte (gabarito).....	97
Figura 4.4 - Pré-montagem das peças.....	97
Figura 4.5 - Painel CLT acabado.....	98
Figura 4.6- Painel CLT acabado.....	98
Figura 4.7 – Painel em fase de montagem.....	99
Figura 4.8 – Painel em fase de montagem.....	99
Figura 4.9 - Painel pronto para prensagem.....	99
Figura 4.10 - Colocação da chapa superior.....	99

Figura 4.11 - Prensagem do painel.....	99
Figura 4.12 - Prensagem do painel.....	99
Figura 4.13 - Vista lateral do projeto de furação do painel CLT.....	100
Figura 4.14 - Vista superior do projeto de furação do painel de CLT	100
Figura 4.15 - Projeto da laje de concreto (medidas em mm).....	101
Figura 4.16 - Forma da laje de concreto.....	101
Figura 4.17 – A armação da laje.....	101
Figura 4.18 - Furos e fixação dos pinos.....	102
Figura 4.19 - Colocação da bucha nos pinos.....	102
Figura 4.20 - Buchas na posição final	102
Figura 4.21 - Bucha na posição final	102
Figura 4.22 - Fôrma na posição de concretagem	103
Figura 4.23 - Centro de usinagem CNC.....	103
Figura 4.24 - Centro de Usinagem CNC.....	103
Figura 4.25 - Torno CNC ROMI.....	103
Figura 4.26 - Fresadora vertical TOOS.....	104
Figura 4.27 - Bucha e pino guia.....	104
Figura 4.28 - Conector arruelas, porcas e anel.....	104
Figura 4.29 - Montagem dos extensômetros.....	105
Figura 4.30 - Montagem dos modelos.....	105
Figura 4.31 - Montagem dos extensômetros.....	105
Figura 4.32- Saída cabos dos Extensômetros.....	105
Figura 4.33 - Máquina universal INSTRON	106
Figura 4.34 - Máquina universal INSTRON	106
Figura 4.35 - Figura 4.35 - Posicionamento dos extensômetros.....	106
Figura 4.37 - Aquisição de dados (SAD)	108
Figura 4.38 - Aquisição de dados da MTS.....	108
Figura 4.39 - CP identificados.....	109
Figura 4.40 - Máquina Universal Instron.....	109
Figura 4.41 - Corpos de prova de madeira identificados.....	110
Figura 4.42 - Programa de carregamento dos ensaios 1 e 2	111
Figura 4.43 - Posicionamento das chapas de aço.....	112
Figura 4.44 – Aparelho de interface central.....	112
Figura 4.45 - Força <i>versus</i> deslocamentos relativos entre os painéis de CLT e a laje de concreto.....	115
Figura 4.46 - Força aplicada <i>versus</i> forças de tração nos conectores de cisalhamento	116
Figura 4.47 - Conectores com furo de 3 mm.....	117

Figura 4.48 - Extensômetros externos.....	117
Figura 5.1- Painéis de madeira CLT.....	119
Figura 5.2 - Painéis de madeira CLT.....	119
Figura 5.3 - Laje de concreto pré-fabricada e corpos de prova cilíndricos.....	120
Figura 5.4 - Referência para armação das lajes pré-fabricadas - EUROCODE 4.....	121
Figura 5.5 - Conector de aço da CISER.....	122
Figura 5.6- Conector de aço da CISER.....	122
Figura 5.7 - Arruela e anel de aço especiais.....	123
Figura 5.8 - Modelos montados	123
Figura 5.9 - Montagem dos modelos	123
Figura 5.10 - Detalhe da ligação	124
Figura 5.11 - Corpo de prova para embutimento na madeira.....	125
Figura 5.12 - Corpo de prova para embutimento na madeira	126
Figura 5.13 – CPs para ensaios de compressão	127
Figura 5.14 – CPs para compressão	127
Figura 5.15 - Corpos de prova para resistência ao cisalhamento.....	128
Figura 5.16 - Corpo de prova para resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.....	128
Figura 5.17 - Corpo de prova para ensaio de arrancamento.....	129
Figura 5.18 - Ilustração do corpo de prova de concreto para embutimento.....	130
Figura 5.19- CP para embutimento no concreto	131
Figura 5.20- CP embutimento com graute.....	131
Figura 5.21 - Corpo de Prova para momento de plastificação do conector.....	131
Figura 5.22 - Corpos de prova identificados.....	133
Figura 5.23 - Prensa Hidráulica EMIC – PC 200.....	133
Figura 5.24 - Ensaio de embutimento no concreto.....	134
Figura 5.25 - Corpo de prova para verificação da densidade aparente.....	136
Figura 5.26 – CP para embutimento na madeira.....	136
Figura 5.27 – CP para o ensaio de embutimento.....	136
Figura 5.28 – Ensaio de embutimento na madeira sendo realizado.....	138
Figura 5.29 - Corpos de prova para ensaios de compressão na madeira.....	139
Figura 5.30 – Corpo de prova para ensaios de compressão na madeira.....	139
Figura 5.31- Ensaio de compressão madeira.....	141
Figura 5.32 - Ensaio de compressão madeira.....	141
Figura 5.33 - Ensaio de cisalhamento paralelo.....	142
Figura 5.34 - Ensaio de cisalhamento paralelo.....	142
Figura 5.35 - Ensaio de cisalhamento	143
Figura 5.36 - Cisalhamento na linha de cola.....	143
Figura 5.37- Corpo de prova para arrancamento.....	144
Figura 5.38 - Acessório para o ensaio de arrancamento e transdutores de deslocamento.....	145
Figura 5.39 - Esquema de ensaio de flexão do conector (medidas em mm).....	146

Figura 5.40 - Gráfico força de arrancamento x deslocamento. Determinação da força de arrancamento máxima.....	147
Figura 5.41 - Ensaio para determinação do momento de plastificação do conector.....	147
Figura 5.42 - Valores individuais e intervalo de confiança de cada série, para um nível de confiança de 95%.....	149
Figura 5.43 - Valores individuais e intervalo de confiança de cada série dos módulos de elasticidade e força de arrancamento, para um nível de confiança de 95%.....	149
Figura 5.44 Resposta fornecida pelo software Minitab 19 para a série de valores do embutimento da madeira na direção 2L.....	151
Figura 5.45 - Exemplo de resultado apresentado pelo Minitab 19. Embutimento direção 2L.....	153
Figura 5.46 - Exemplo de resultado apresentado pelo Minitab 19. Embutimento direção 2L.....	146
Figura 6.1 - Aplicação de carga na madeira.....	159
Figura 6.2 - Efeito corda nas conexões com conectores metálicos	161
Figura 6.3 - Modos de falha na madeira segundo Quenneville e Mohammad (2000).....	161
Figura 6.4 - Modos de ruptura das ligações segundo Eurocode 5	164
Figura 6.5 – Modos de ruptura para ligações madeira-concreto.....	166
Figura 6.6 - Modos de ruptura para ligações madeira-aço.....	166
Figura 6.7 – Modelo de Teste padrão de cisalhamento direto (EUROCODE 4).....	169
Figura 6.8 - Seção longitudinal do modelo de teste de cisalhamento de ligação de laje de concreto com painéis de madeira CLT.....	170
Figura 6.9 - Planta do modelo de teste de cisalhamento de ligação de laje de concreto com painéis CLT.....	170
Figura 6.10 - Seção transversal do modelo de teste de cisalhamento de ligação de laje de concreto com painéis de madeira CLT.....	171
Figura 6.11 - Posicionamento dos DTs na laje de concreto.....	172
Figura 6.12 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento.....	172
Figura 6.13 - Sistema de aquisição de dados (SAD).....	173
Figura 6.14 - Sistema de aquisição de dados da MTS.....	174
Figura 6.15 - Diagrama de carregamento para ensaio de acordo com EN 26891.....	176
Figura 6.16 - Programa de aplicação de carga de acordo com a NBR 7190:1997.....	176
Figura 6.17- Montagem para o ensaio experimental.....	179
Figura 6.18 - Dimensões do painel de madeira CLT (dimensões em mm).....	181
Figura 6.19 - Posicionamento e dimensões do conector de aço (vista lateral).....	182
Figura 6.20 - Ensaio de cisalhamento direto.....	183
Figura 6.21 - Detalhe das rótulas plásticas do conector (modo de ruptura IV).....	183
Figura 6.22 - Penetração do anel de aço.....	184
Figura 6.23 - Formação das quatro rótulas plásticas e observação de Dias (2005).....	185

Figura 6.24 - Embutimento e arrancamento no painel de madeira, lado direito e esquerdo.....	185
Figura 6.25 - Detalhe do esmagamento lado direito da peça de madeira paralelo às fibras.....	186
Figura 6.26 - Gráfico força x tempo modelo M1 – CLT/concreto/CLT.....	186
Figura 6.27 - Gráfico força x deslocamento de todos os DTs, modelo M1 – CLT/concreto/CLT.....	187
Figura 6.28 - Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte e sul, modelo M1 – CLT/concreto/CLT.....	187
Figura 6.29 - Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M1 – madeira/concreto.....	188
Figura 6.30 - Rótulas plásticas nos conectores, modelo M2.....	189
Figura 6.31 Figura 6.31- Ensaio sendo realizado.....	190
Figura 6.32 - Penetração do anel de aço.....	190
Figura 6.33 - Formação de rótula plástica e esmagamento da madeira	190
Figura 6.34 - Embutimento e arrancamento no modelo M2 de madeira, lado direito e esquerdo.....	191
Figura 6.35 - Rótulas plásticas nos conectores, modelo M3.....	192
Figura 6.36 - Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira do lado direito e esquerdo da ligação.....	192
Figura 6.37 - Embutimento e arrancamento no modelo M3 de madeira, lado direito e esquerdo.....	193
Figura 6.38 - Rótulas plásticas nos conectores, modelo M4	194
Figura 6.39 - Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira do lado direito e esquerdo da ligação.....	194
Figura 6.40 - Embutimento e arrancamento no modelo M4 de madeira, lado direito e esquerdo.....	195
Figura 6.41 - Rótulas plásticas nos conectores, modelo M5.....	196
Figura 6.42 - Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira.....	196
Figura 6.43 - Embutimento e arrancamento no modelo M5 de madeira, lado direito e esquerdo.....	197
Figura 6.44 - Rótulas plásticas nos conectores, modelo M6.....	198
Figura 6.45 - Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira	199
Figura 6.46 Embutimento e arrancamento no modelo M6 de madeira, lado direito e esquerdo..	199
Figura 6.47 - Dimensões do painel de madeira CLT (dimensões em mm).....	200
Figura 6.48 - Posicionamento e dimensões do conector de aço (vista lateral).....	201
Figura 6.49 - Ensaio de cisalhamento direto modelo madeira/madeira/madeira	202
Figura 6.50 - Embutimento do conector na peça principal.....	203
Figura 6.51 - Embutimento e arrancamento no modelo M1 de madeira, lado direito e esquerdo.....	203
Figura 6.52 - Detalhe das rótulas plásticas do conector e esmagamento no painel central.....	204

Figura 6.53 - Deslocamento do painel.....	205
Figura 6.54 - Embutimento do anel de aço.....	205
Figura 6.55 - Gráfico força x tempo modelo M1 – CLT/CLT/CLT.....	206
Figura 6.56 - Gráfico força x deslocamento de todos os DTs, modelo M1 – CLT/CLT/CLT.....	206
Figura 6.57 - Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte e sul, modelo M1 – CLT/CLT/CLT.....	207
Figura 6.58 - Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M1 – CLT/CLT/CLT.....	207
Figura 6.59 - Rótulas plásticas nos conectores e modos de falha.....	209
Figura 6.60 - Embutimento e arrancamento no modelo M2 de madeira, lado direito e esquerdo.....	209
Figura 6.61 - Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M3 de madeira/madeira.....	211
Figura 6.62 - Embutimento e arrancamento no modelo M3 de madeira/madeira.....	212
Figura 6.63 - Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M4 de madeira/madeira.....	213
Figura 6.64 - Embutimento e arrancamento no modelo M4 de madeira/madeira.....	213
Figura 6.65 - Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M5 de madeira/madeira.....	214
Figura 6.66 - Embutimento e arrancamento no modelo M5 de madeira/madeira.....	215
Figura 6.67 - Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M5 de madeira/madeira.....	215
Figura 6.68 - Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M6 de madeira/madeira.....	216
Figura 6.69 - Embutimento e arrancamento no modelo M6 de madeira/madeira.....	217
Figura 7.1 - Resistência característica da ligação a um corte, experimental e Eurocode 5.....	221
Figura 7.2 - Gráfico com IC do módulo de deslizamento experimental e das equações dos autores, para modelo CLT/CONCRETO/CLT.....	226
Figura 7.3 - Gráfico com IC do módulo de deslizamento experimental e das equações dos autores, para modelo CLT/CLT/CLT.....	226

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Determinação de propriedades das ligações.....	51
Quadro 5.1 - Caracterização do Concreto na Fabricação.....	119
Quadro 6.1- Lista das variáveis utilizadas por Johansen.....	159
Quadro 6.2 - Equações de Johansen com dois planos de corte ligações madeira/madeira.....	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Ensaio de caracterização da madeira.....	113
Tabela 5.1 - Resultados de ensaio de densidade aparente para os painéis de CLT.....	148
Tabela 5.2 – Teste de Grubbs para outliers em todos os resultados experimentais com $\alpha = 0,05$, (MPa).....	152
Tabela 5.3 – Teste de Anderson-Darling para norma resultados experimentais com $\alpha = 0,05$, (MPa).....	154
Tabela 5.4 - Tabela 5.4 – Valores característicos das propriedades dos materiais com nível de confiança de 95%, (MPa).....	156
Tabela 6.1 - Resultado dos ensaios dos modelos – CLT/CONCRETO/CLT.....	218
Tabela 6.2 - Resultado dos ensaios dos modelos – CLT/CLT/CLT.....	218
Tabela 6.3 – Valores estatísticos dos resultados dos ensaios dos modelos.....	219
Tabela 7.1 – Contribuição do efeito corda.....	221
Tabela 7.2 – Valores do módulo de deslizamento preconizados por diversos autores.....	225
Tabela 7.3 – Valor médio do Módulo de Deslizamento (ANOVA).....	227

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBMMG -	Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
CEF -	campanha experimental final
CEPAM -	Centro Avançado de Pesquisa da Madeira, Móveis e Novos Materiais
CLT -	madeira laminada colada cruzada (<i>Cross Laminated Timber</i>)
CSA -	<i>Canadian Standards Association</i>
<i>ETM</i> -	<i>European Yield Model</i>
LAEES -	Laboratório de Análise Experimental de Estruturas
LRFD -	<i>Load and Resistance Factor Design</i>
MEJ -	modelo de escoamento europeu
MLC -	madeira laminada colada
NDS -	<i>National Design Specification</i>
YM -	<i>Yield Theory</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Considerações gerais	23
1.2 Objetivos	25
1.2.1 Objetivo Geral	25
1.2.2 Objetivos Específicos	25
1.3 Justificativa	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 Madeira laminada colada cruzada	33
2.2 Cultura do concreto no Brasil	39
2.3 Conectores no sistema construtivo CLT	42
2.4 Algumas pesquisas realizadas sobre o tema	45
2.4.1 Avaliação do Comportamento de Ligações com Parafusos Auto- Atarraxantes em vigas de MLC. (DUARTE, 2004)	46
2.4.2 Ligações Estruturais de Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT) Utilizando Parafusos Autoperfurantes. (CUNHA, 2012a)	52
2.4.3 Influência do Corpo de Prova na Caracterização experimental de Ligações Mistas de Madeira e Concreto. (CARVALHO, 2010)	55
2.4.4 Análise Experimental de Ligações de Madeira e Concreto Pré-Carregadas Lateralmente. (BRANCO, 2009).....	61
3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA CONSTRUTIVO MISTO CONCRETO E CLT	70
3.1 Elementos constituintes do sistema	70
3.1.1 Conexão com as bases de concreto (fundações)	80
3.1.2 Conexão dos painéis com lajes de concreto armado pré-fabricado	83
3.1.3 Conexão de painéis CLT/CLT	87
3.1.4 Conexão com a laje de cobertura	92
4 CAMPANHA EXPERIMENTAL PRELIMINAR	95
4.1 Materiais e confecção de modelos (protótipos)	95

4.1.1	Fabricação do painel de madeira laminada colada cruzada	96
4.1.1.1	Seleção das peças	96
4.1.1.2	Detalhes de fabricação	97
4.1.2	Fabricação da laje de concreto	100
4.1.3	Projeto e fabricação dos conectores	103
4.1.4	Montagem dos modelos de ensaio.....	104
4.2	Instrumentação e equipamentos	105
4.3	Metodologia ensaios preliminares.....	108
4.3.1	Ensaio de caracterização física e mecânica - materiais	108
4.3.1.1	Concreto	108
4.3.1.2	Madeira.....	109
4.3.2	Ensaio de cisalhamento direto dos modelos preliminares.....	111
4.4	Resultados e discussões.....	112
4.4.1	Madeira e concreto.....	112
4.4.2	Ensaio de cisalhamento direto nos modelos preliminares.....	113
4.5	Conclusões e propostas de modificação dos modelos.....	116
5	CAMPANHA EXPERIMENTAL FINAL	118
5.1	Materiais e confecção de modelos finais	118
5.1.1	Características dos painéis de madeira laminada colada cruzada.....	118
5.1.2	Fabricação das lajes de concreto.....	119
5.1.3	Detalhes dos conectores metálicos.....	121
5.1.4	Montagem dos modelos de ensaio.....	123
5.1.5	Corpos de prova para caracterização de propriedades específicas	124
5.1.5.1	CP para embutimento do CLT	124
5.1.5.2	CP para modulo de elasticidade e resistência à compressão do CLT	126
5.1.5.3	CP para cisalhamento da madeira e da cola do CLT	127
5.1.5.4	CP para arrancamento do conector.....	128
5.1.5.5	CP para embutimento do concreto	129
5.1.5.6	CP para momento de plastificação do conector	131
5.3	Metodologia dos ensaios.....	132

5.3.1 Ensaio de caracterização do concreto.....	132
5.3.1.1 Ensaio de caracterização mecânica do concreto.....	133
5.3.1.2 Embutimento no concreto.....	134
5.3.2 Ensaio de caracterização da madeira	135
5.3.2.1 Densidade aparente	135
5.3.2.2 Embutimento na madeira.....	136
5.3.2.3 Modulo de elasticidade e resistência à compressão.....	138
5.3.2.4 Resistencia ao cisalhamento da madeira e da cola.....	141
5.3.2.5 Resistencia ao arrancamento do conector	143
5.3.2.6 Ensaio para determinação do momento de plastificação	145
5.4 Resultados e discussões da campanha experimental final– materiais.....	148
5.4.1 Apresentação dos resultados de ensaio	148
5.4.2 Verificação de valores outlier de cada série.....	150
5.4.3 Verificação da distribuição normal de cada série	152
5.4.4 Determinação dos valores característicos.....	154
6 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DOS MODELOS	158
6.1 Desenvolvimento da análise teórica – considerações iniciais.....	158
6.1.1 Teoria do escoamento de johansen – teoria europeia de escoamento ...	159
6.1.1.1 Nomenclatura para as equações de Johansen	159
6.1.1.2 Equações de Johansen	160
6.1.1.3 Modo potencial de falha da madeira.....	161
6.1.1.4 Modos de ruptura.....	163
6.2 Ensaio experimental de cisalhamento direto.....	168
6.2.1 Instrumentação	171
6.2.2 Determinação da força máxima (Estimada)	174
6.2.3 Diagrama de carga para ensaio de cisalhamento direto	175
6.2.4 Plano de Ensaio	177
6.2.5 Realização dos ensaios de cisalhamento direto	178
6.3 Apresentação e análise dos resultados	180
6.3.1 Ensaio modelos madeira/concreto/madeira	180
6.3.1.1 Ensaio modelo 1 – CLT/CONCRETO/CLT	181
6.3.1.2 Ensaio Modelo 2 – CLT/CONCRETO/CLT	188

6.3.1.3 Ensaio Modelo 3 – CLT/CONCRETO/CLT	191
6.3.1.4 Ensaio Modelo 4 – CLT/CONCRETO/CLT	193
6.3.1.5 Ensaio modelo 5 – CLT/CONCRETO/CLT	195
6.3.1.6 Ensaio modelo 6 – CLT/CONCRETO/CLT	197
6.3.2 Ensaios modelos madeira/madeira/madeira	199
6.3.2.1 Ensaio modelo 1 – CLT/CLT/CLT	200
6.3.2.2 Ensaio modelo 2 – CLT/CLT/CLT	208
6.3.2.3 Ensaio modelo 3 (CLT/CLT/CLT)	210
6.3.2.4 Ensaio modelo 4 (CLT/CLT/CLT)	212
6.3.2.5 Ensaio modelo 5 (CLT/CLT/CLT)	214
6.3.2.6 Ensaio modelo 6 (CLT/CLT/CLT)	216
6.4 Força máxima e módulo de deslizamento dos ensaios de cisalhamento	
direto	217
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS FINAIS.....	220
7.1 Resistência característica dos resultados experimentais e as equações de	
Johansen.....	220
7.2 Resultados de ensaio do módulo de deslizamento e as diversas equações	
empíricas.....	223
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	228
REFERÊNCIAS.....	230
APÊNDICE A1	236
APÊNDICE A2	248

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O Brasil, com seu imenso território continental cultivável, possui um enorme potencial madeireiro. Suas extensas áreas de florestas tropicais, acrescidas as áreas de reflorestamento existentes e outras em curso, levam a refletir sobre o seu aproveitamento e exploração de forma adequada e responsável. Este poderoso potencial madeireiro aliado às tecnologias de produção de madeira laminada colada desenvolvidas atualmente na Europa, tanto madeira laminada colada (MLC) quanto madeira laminada colada cruzada (CLT), esta desenvolvida mais recentemente, veio viabilizar a sua utilização em larga escala na construção civil. Em 2014, a produção anual global de CLT, atingiu a impressionante marca de 600.000 m^3 (MUSZYNSKI, 2015; PLACKNER, 2015). A expectativa para 2017 era de mais de 1.000.000 m^3 nas operações na Finlândia, Letônia, Japão e Estados Unidos. A diferença entre um e outro processo de fabricação, MLC e CLT, é que na fabricação do painel MLC as fibras das lâminas de madeira são dispostas no mesmo sentido, sendo que no CLT as fibras são cruzadas possibilitando um melhor desempenho estrutural do produto, sobretudo na resistência aos esforços.

Em meio ao aquecimento Global, tema dos mais debatidos em todas as esferas de discussão de políticas ambientais em todo o mundo, tem-se que pensar e colocar em prática proposições que garantam o desenvolvimento do planeta de modo responsável e sustentável.

A madeira, por ser um excelente fixador de carbono (MIOTTO, 2009), além de ser renovável e reaproveitável quando usada de forma correta e responsável, contribui de forma extraordinária para atenuar os impactos ambientais causados pelas edificações. Nesse aspecto, a madeira laminada cruzada, por se tratar de um produto fabricado a partir de madeiras de reflorestamento tratadas, não representam uma ameaça às florestas nativas existentes no país.

Por outro lado, a cultura do concreto armado, quer seja moldado no local ou pré-fabricado, já se encontra consolidada no nosso país, como será mostrado mais adiante neste trabalho. Propor, projetar e estudar um conector adequado ao uso em um sistema construtivo que contemple o uso dos painéis CLT com lajes maciças pré-fabricadas de concreto armado, parece um caminho viável e com enorme potencial de uso no âmbito da construção de edificações no país. Para que um sistema construtivo misto, como este, inovador na medida em que utiliza de lajes pré-fabricadas de concreto conectadas com painéis CLT - diferentemente dos sistemas utilizados na Europa, Estados Unidos, Canadá, que só usam CLT - tenha de fato um desempenho satisfatório, torna-se fundamental o desenvolvimento de projetos de elementos de ligação, ou seja, conectores que possam aliar uma tecnologia já sedimentada no país com outra em desenvolvimento. Pode-se verificar um exemplo de edificação construída com CLT na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Exemplo de Edificação Construída com CLT



Fonte: catálogo KLH (2014).

1.2 Objetivos

Constituem-se objetivos deste trabalho:

1.2.1 Objetivo Geral

Pretende-se nesta pesquisa o desenvolvimento de um conector de aço para utilização em um sistema construtivo híbrido, de concepção simples, ambientalmente sustentável, utilizando-se painéis de CLT - *Cross Laminated Timber* - com lajes pré-fabricadas de concreto, que permita aos arquitetos - respeitadas as relações com o meio ambiente e conceitos de sustentabilidade - uma grande liberdade no projeto de edifícios de andares múltiplos, com montagem rápida e aplicável a tipologias arquitetônicas variáveis tais como: habitações, hotéis, escolas, edifícios comerciais, etc.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Considerando o sistema construtivo misto, projetar elementos de ligação metálicos que permitam a junção de painéis CLT em diversas situações de projeto tais como, CLT e laje de concreto, CLT com CLT, etc.;
- b) Projetar e desenvolver protótipo de conector em aço para ligações de painéis CLT e lajes de concreto maciças pré-fabricadas;
- c) A partir de protótipos dos conectores com dimensões compatíveis, proceder a avaliação do comportamento da estrutura através de ensaios de cisalhamento direto, simples e duplos, ensaios de flexão e torção, com a conseqüente determinação de sua rigidez ao deslizamento, modos e forças de ruptura, para determinação dos parâmetros de uso dos mesmos.

1.3 Justificativa

Nas ligações de CLT é muito importante considerar não apenas as resistências à tração, à compressão, ao cisalhamento, tanto em temperatura ambiente como em temperatura elevada. Também deve-se atender aos requisitos relativos ao isolamento

acústico e à durabilidade. Dessa forma, um elemento de ligação deve ter, entre outros, os seguintes atributos:

- a) Integridade estrutural (conexão adequada entre os painéis para divisão e encaminhamento dos esforços);
- b) Comprovada resistência ao fogo, incluindo estanqueidade e isolamento para não permitir a passagem de chamas;
- c) Isolamento acústico (para reduzir passagem de som).

A escolha e desenvolvimento do sistema de ligação proposto nesta pesquisa vem ao encontro da necessidade de utilização de lajes pré-fabricadas de concreto com os painéis de madeira CLT, satisfazendo a exigências projetuais diversificadas, ou seja, as ligações entre elementos de madeira com madeira e de concreto com madeira devem assegurar resistência e confiabilidade em temperatura ambiente e no caso de incêndio, garantindo ao mesmo tempo, um bom resultado estético.

O que se pretende é evitar a adoção de uma ligação metálica posicionada fora do elemento de madeira, visível e dotada de um grande impacto visual, por outra alternativa embutida no painel, buscando incorporar as ligações aos elementos de madeira obtendo-se, assim, um resultado mais harmonioso.

Além do mais, a ligação metálica, adequadamente protegida e isolada pela madeira, não sofre grande redução de resistência quando submetida a incêndio e mantém intactas as propriedades mecânicas pelo tempo requerido nas instruções e normas técnicas contra incêndio. A fixação será protegida por um tampão de madeira como será mostrado mais adiante. A resistência contra fogo não será objeto de estudo nesse trabalho embora se julgue importante mencionar que a opção por embutir os elementos de ligação certamente potencializará a sua resposta em caso de incêndio.

A madeira é um material combustível que queima lentamente. Em caso de incêndio, verifica-se uma redução da seção resistente, mas a parte não atingida pela carbonização continua a ser eficiente conforme mostrado na Figura 1.2, onde pode-se perceber que a superfície externa da madeira sofreu uma carbonização mais intensa e a parte interna permanece praticamente intacta após a exposição por 30 minutos ao fogo.

Figura 1.2 - Madeira exposta ao fogo por 30 minutos



Fonte RothoBlass (2015).

Por outro lado, considerando-se o estado da arte, num contexto nacional e internacional, sobre o sistema construtivo em painéis de madeira laminada colada cruzada (CLT), serão aqui comentados alguns aspectos relevantes:

- a) Principais vantagens do sistema;
- b) Pesquisas mais recentes realizadas sobre o tema;
- c) Nível de conhecimento sobre o sistema construtivo CLT;
- d) Maiores barreiras para adoção do sistema;
- e) Pesquisas necessárias para o avanço no uso dessa tecnologia;
- f) Normas e/ou orientações técnicas para o projeto de estruturas de CLT.

a) Principais vantagens do sistema

A despeito de no Brasil a utilização do CLT ainda esteja em estágio embrionário, com a madeira maciça ainda em uso no país, suas vantagens com relação à madeira serrada são relevantes, especialmente quanto à possibilidade de se produzir peças praticamente sem limitações dimensionais, com aumentos de resistência e rigidez. Hoje, a escassez cada vez mais acentuada das madeiras nativas é uma forte justificativa para o uso do CLT. Segundo Espinoza Trujillo, Mallo e Buehlmann (2016), o CLT possui inúmeras vantagens como sistema construtivo para

edificações, inclusive de andares múltiplos, lastreado no seu elevado desempenho estrutural e ambiental. A madeira, além de ser renovável e reaproveitável quando usada de forma correta e responsável, contribui de forma extraordinária para atenuar os impactos ambientais causados pelas edificações. Nesse aspecto, a madeira laminada colada cruzada, por se tratar de um produto fabricado a partir de madeiras de reflorestamento tratadas, não representa uma ameaça às florestas nativas existentes no país e em todo o mundo. Os autores Espinoza *et al.* (2016), argumentam sobre uma série de estudos independentes que compararam o desempenho ambiental dos edifícios de andares múltiplos construídos com CLT e com concreto e concluíram, consistentemente, que os edifícios de CLT tiveram baixa energia incorporada comparada com os edifícios de concreto e, mais ainda, desempenho superior em comparação com os de concreto e de aço no que tange à destruição da camada de ozônio, potencial de aquecimento global, dentre outros aspectos. Ainda conforme os autores, uma outra grande vantagem do sistema é a velocidade e a eficiência com que os edifícios podem ser construídos. Na Europa, desde os anos 90, tornou-se um material de construção amplamente utilizado, competindo com o concreto, aço, alvenarias de tijolos, em segmentos de mercado bastante sofisticados como os edifícios multi-familiares. A velocidade de construção que o sistema CLT admite, contribui para uma economia do tempo de execução da obra e minimização do transtorno causado no local e no entorno da obra.

Os painéis de CLT são fabricados com até 12m de comprimento e são transportados para a obra com todos os vãos já preparados, aberturas de portas, janelas e demais aberturas previstas em projeto, permitindo um ganho considerável de tempo de execução da obra. Outra grande vantagem do sistema, é a possibilidade de utilização de grandes vãos sem apoios intermediários. Segundo Espinoza *et al.* (2016), um painel de CLT, com sete camadas e uma espessura total de 22cm, pode ser utilizado para vencer vãos de até 8m. Com a possibilidade de uso dos painéis duplos, pode-se conseguir a cobertura de vãos ainda maiores. Outra vantagem de uso do CLT é a capacidade de suporte de cargas do sistema podendo ser utilizado como um painel auto-portante.

Na resistência contra fogo, como já dito anteriormente, o sistema também apresenta vantagens, embora seja importante mencionar a necessidade de se embutir ou proteger os elementos de ligação, metálicos, o que certamente

potencializará a sua resposta em caso de incêndio. A madeira é um material combustível que queima lentamente. Segundo Blass *et al.* (2015), em caso de incêndio, verifica-se uma redução da secção resistente, mas a parte não atingida pela carbonização continua a ser eficiente. A superfície externa da madeira sofre uma carbonização mais intensa e a parte interna permanece praticamente intacta após a exposição por 30 minutos ao fogo.

Os autores, Espinoza *et al.* (2016), esclarecem que o desempenho sísmico do CLT também tem sido objeto de vários estudos. Citam um experimento em que um edifício de 7 pavimentos foi submetido a movimento sísmicos graves, o equivalente a 7,2 na escala Richter, e o edifício mostrou excelente comportamento, com desvios entre andares de no máximo 3,5cm.

Essas são algumas das muitas vantagens de uso do CLT:

b) Pesquisas mais recentes realizadas sobre o tema.

Embora no Brasil a pesquisa com CLT ainda encontra-se em estado incipiente, com alguns poucos projetos em andamento, na Europa, segundo Espinoza *et al.* (2016), citando Crespell e Gagnon (2011), o desenvolvimento do sistema foi fruto de um esforço conjunto da indústria e das universidades. Esse interesse, com o objetivo de desenvolver novos mercados para os subprodutos da serraria, manifestado pelo governo suíço, teve início na década de 90. O que aconteceu após, foi um interesse notável pelo material resultante das pesquisas. Em 2012, havia mais de 100 projetos com a utilização de CLT na Europa e o desenvolvimento de uma pesquisa considerável em instituições europeias. Em 2015, havia inúmeras pesquisas sendo conduzidas por aproximadamente 16 instituições de pesquisa europeias (ESPINOZA, *et al.* 2016). Ainda conforme os autores, em 2014, a Conferência Mundial conjunta sobre engenharia de madeira e produtos florestais na cidade de Quebec, no Canadá, listou 8 sessões e mais de 56 apresentações sobre pesquisa com CLT, demonstrando interesse global pelo material. Esse dado mostra, de forma inequívoca, como a pesquisa sobre o uso do CLT e seu avanço também está ocorrendo em uma escala global

c) Nível de conhecimento sobre o sistema construtivo CLT.

No Brasil, embora não exista ainda uma base científica que possa balizar com realidade o nível de conhecimento dos profissionais que trabalham na área da engenharia e construção civil sobre o sistema CLT, pode-se afirmar, de forma empírica, que o nível de conhecimento é muito baixo. O número reduzido de pesquisas realizadas no país reflete o grau de desconhecimento da comunidade acadêmica e, sobretudo, dos profissionais envolvidos no setor da construção civil. O público em geral praticamente desconhece o sistema.

Existem alguns poucos exemplos de aplicação de madeira laminada colada, usada de forma estrutural, como vigas e pilares, em edificações esparsas pelo país. Atualmente, existe uma indústria fabricando painéis de CLT em São Paulo. Seus produtos têm sido utilizados na construção de arquiteturas singulares mas com pouca visibilidade no país. Em sentido oposto, impressiona o grau de interesse de instituições, programas e grupos de estudo envolvidos no tema CLT na Europa. Segundo Espinoza *et al.* (2016), na Europa, dentro do programa de Cooperação Européia em Ciência e Tecnologia (COST), programa que apoia a cooperação transnacional entre pesquisadores, engenheiros e estudiosos em toda a Europa, foi montado um grupo de trabalho, dentro do quadro de ação do COST, "Construção de madeira sólida - madeira laminada cruzada", cujo objetivo declarado é "Recolher, discutir, avaliar, harmonizar e condensar o estado da arte fragmentado em relação à CLT com foco em testes e projetos". Entre outras tarefas específicas, este grupo também está trabalhando na incorporação da CLT na norma europeia EUROCODE 5 - Concepção de estruturas de madeira, e no desenvolvimento de uma versão europeia do manual CLT.

Com base nesses dados pode-se perceber o grau de envolvimento das instituições voltadas para a área da construção civil com relação ao desenvolvimento e divulgação da CLT. Ainda assim, segundo pesquisa realizada pelos autores Espinoza *et al.* (2016), num universo representativo de profissionais que trabalham na área da construção civil, ou seja, engenheiros, pesquisadores, educadores, consultores, arquitetos, dentre outros, o quadro representativo de conhecimento sobre o sistema construtivo CLT na Europa não foi muito promissor. De acordo com a pesquisa, o nível de conscientização é baixo para gerentes de construção, para contratados e proprietários. Estes resultados foram surpreendentes, considerando

que o CLT tem sido usado na Europa há mais de 20 anos com ampla cobertura em revistas comerciais e nas notícias (ESPINOZA *et al.*, 2016). Por outro lado, a conscientização dos engenheiros e arquitetos sobre o tema foi considerada alta e muito alta respectivamente. Para o público em geral, também foi considerada muito baixa. A avaliação foi positiva para os pesquisadores, muito alto nível de conscientização, e construtores de estruturas de madeira, alta conscientização.

d) Maiores barreiras para adoção do sistema.

Embora o potencial madeireiro do Brasil seja destaque em todo o mundo com suas extensas áreas de florestas tropicais, somadas às áreas de reflorestamento, sugerindo que esse recurso seja explorado adequadamente, como já foi dito anteriormente, o desenvolvimento de sistemas construtivos que utilizam a madeira como o CLT e o MLC continua em estágio embrionário no país. Não obstante seja um dos mais antigos produtos resultantes da colagem de lâminas, a MLC, assim como a CLT, ainda não são materiais plenamente justificáveis para o emprego nas construções brasileiras, resultado da pequena tradição no seu uso, elevado custo de adesivos e reduzido número de empresas envolvidas em sua fabricação, que provocam um reflexo negativo no preço final do produto e, principalmente, falta de tecnologia avançada para sua fabricação.

Essas são enormes barreiras para o desenvolvimento do produto em nosso país. Além dessas, assim como na Europa e Estados Unidos, existem outros impedimentos a vencer, tais como: verificação das interferências e compatibilidade com os códigos de obra das cidades brasileiras, disponibilidade de informações técnicas suficientes para instrumentar os profissionais da área para o projeto e construção de edifícios, esclarecimento e divulgação para o público em geral das vantagens e segurança de se construir com o material, divulgação do sistema nos meios de comunicação disponíveis e, principalmente, custo.

e) Pesquisas necessárias para o avanço no uso dessa tecnologia.

No Brasil, a norma ABNT NBR 7190:2022 - Projeto de Estruturas de Madeira, trouxe um avanço inequívoco em direção à modernização, mas ainda existe

muito a se fazer, principalmente com relação às estruturas mistas de madeira laminada e concreto, estruturas de madeira laminada cruzada, para as quais esta norma não apresenta nenhuma regulamentação. Portanto, são imprescindíveis as pesquisas que visem o estudo dessas estruturas e que contribuam para o desenvolvimento de critérios para seu dimensionamento. Além dessas, pesquisas que levem a definição de procedimentos para a execução de ensaios de cisalhamento com a utilização de corpos de prova de madeira laminada colada cruzada, principalmente quanto às características do corpo de prova, forma de solicitação e obtenção dos resultados, a importância da determinação do ensaio de cisalhamento padrão para as estruturas mistas de madeira laminada e concreto.

Também é preciso desenvolver pesquisas que busquem alternativas para conectores metálicos para uso na CLT, principalmente aqueles que possam ser embutidos nos painéis evitando os problemas com incêndio, o desempenho dos painéis frente a umidade, desempenho térmico, desempenho acústico e sobretudo possibilidades de revestimento de materiais e sua performance frente a situação de uso em um país tropical.

f) Normas e/ou orientações técnicas para o projeto de estruturas de CLT.

Como já foi mencionado anteriormente, é fundamental que se promova uma atualização da norma ABNT NBR 7190:1997, contemplando os aspectos e critérios técnicos de uso do MLC e CLT, incorporação da CLT nas normas internacionais e no desenvolvimento de uma versão brasileira do manual CLT.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

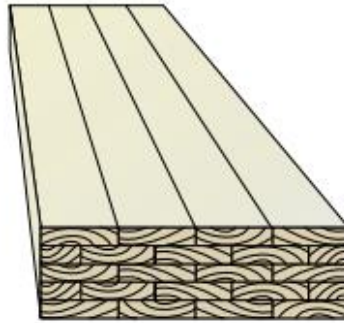
2.1 Madeira laminada colada cruzada

Frente à necessidade de utilização de madeira de reflorestamento na fabricação de artefatos voltados para aplicação na construção civil, acredita-se que, na França, em meados do século XIX, foram fabricadas as primeiras vigas em lâminas (tábuas) de madeira sobrepostas, mantidas unidas por pregos e cintas metálicas.

No entanto, a madeira laminada colada, empregada na fabricação de elementos estruturais a serem utilizados na construção civil, surge, de fato, a partir do século XX (1901) com o desenvolvimento e aplicação de colas de alta resistência, material fundamental para a fabricação do painel de MLC.

Segundo Miotto (2009), o alemão Otto Karl Friedrich Hertzer patenteou, em Wiemar, em 1901, essa técnica de colagem de lâminas de madeira utilizando o adesivo caseína que ficou conhecida inicialmente como *Hertzer System*. No início, boa parte das aplicações de MLC ficou limitada as condições de uso protegidas da umidade. A partir da Segunda Guerra Mundial, a madeira laminada colada evoluiu em paralelo com o desenvolvimento de novos adesivos sintéticos à prova de água e cada vez mais eficientes. Essa técnica encontra-se hoje extremamente desenvolvida em países da América do Norte e Europa. Esse método consiste na fabricação de elementos estruturais a partir da colagem de tábuas dispostas longitudinalmente na direção da fibra, como mostrado na Figura 2.1.

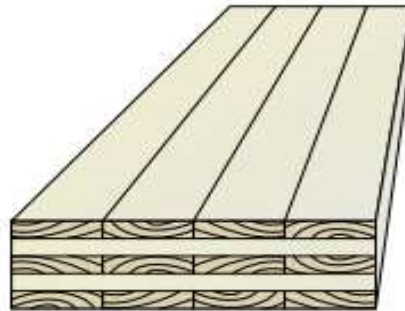
Figura 2.1 - Madeira Laminada Colada (MLC)



Fonte: catálogo CLT - Handbook (2013).

A partir das experiências de fabricação de MLC é que surge, bem mais adiante, o processo CLT, ou seja, madeira laminada colada cruzada. Este sistema construtivo, primeiramente desenvolvido na Áustria e depois na Alemanha no final do século passado, é composto por painéis estruturais elaborados a partir da colagem de tábuas em camadas perpendiculares umas às outras, conforme mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT)



Fonte: catálogo CLT - Handbook (2013).

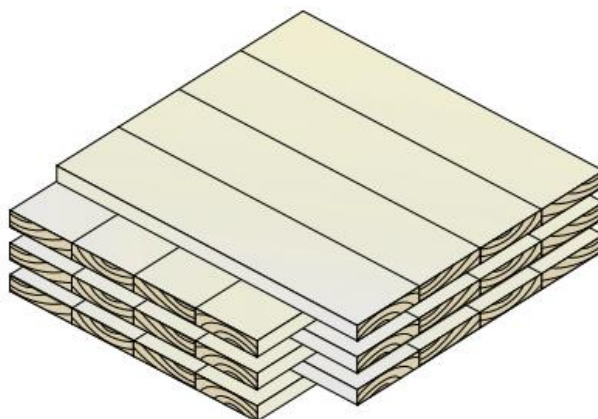
Figura 2.3 - Edifício construído com CLT



Fonte: Catálogo Rothoblaas, (2015).

O conceito de MLC quando comparado com o de CLT, apresenta uma considerável vantagem para o CLT. Além de conferir um melhor desempenho estrutural permite uma maior estabilidade dimensional que se deve ao arranjo transversal cruzado das fibras entre as camadas, conforme podemos verificar na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT)



Fonte: catálogo CLT - Handbook (2013).

A qualidade da madeira também é um fator importante na fabricação de CLT. A madeira, por ser um excelente fixador de carbono, além de ser renovável e reaproveitável quando usada de forma correta e responsável, contribui de forma extraordinária para atenuar os impactos ambientais causados pelas edificações. Nesse aspecto, a madeira laminada colada cruzada, por se tratar de um produto fabricado a partir de madeiras de reflorestamento tratadas, não representam uma ameaça às florestas nativas existentes no país.

A qualidade de uma viga laminada colada (MLC), ou sua capacidade resistente, depende diretamente da qualidade da madeira que a conforma. No entanto, são vários os fatores que influenciam na sua resistência já estudados por muitos pesquisadores e dentre eles, as propriedades da madeira utilizada assumem uma importância fundamental. Segundo Mantilla (1989), os principais fatores que influenciam na resistência da MLC são os seguintes: a resistência da madeira, a espécie de madeira, a quantidade de nós, a direção das fibras, as emendas longitudinais e laterais das lâminas, a espessura e o número de lâminas, a qualidade e posição das lâminas, os módulos de elasticidade (E e G), as dimensões da peça e a distribuição das tensões. Pode-se perceber que, para fabricação da CLT, não só os atributos da madeira são importantes como, também, a qualidade e técnica da fabricação. De um modo geral, deve-se levar em consideração que o grande número de fatores que exercem influência na resistência da madeira maciça estrutural, aplica-se também a MLC. Mantilla (1989), esclarece que, para muitos autores, os nós têm

efeitos mais sérios na distribuição das tensões na MLC do que nas peças de madeira maciça. Continua Mantilla (1989), devido à incorporação de lâminas limpas e com fibras retas, na parte tracionada das vigas de MLC, o módulo de elasticidade (E) e o módulo de ruptura (MR) tem um aumento pronunciado. Cita Bohannan (1964), nas suas experiências com vigas de MLC, que colocou na parte tracionada da viga uma lâmina limpa (isenta de defeitos) de 3,81 cm (1 1/2") de espessura, representando 14% da altura da viga e isto representou um aumento de 32% do MR. Para uma lâmina de 1,42 cm (9/16"), representando 5% da altura da viga, o MR aumentou em 23%. Essas informações indicam um potencial significativo no aumento da resistência à flexão das vigas de MLC, dando, uma especial atenção, a uma pequena porção da viga, isto é, a algumas lâminas tracionadas externas com qualidade superior, sem defeitos, pode-se obter melhores resultados. Percebe-se aqui a importância da qualidade da madeira na produção de vigas de MLC.

Miotto e Dias (2009), comentam que a escassez das madeiras nativas é uma forte justificativa para o uso da MLC, o que também tem incentivado o desenvolvimento de pesquisas e aplicações de madeiras reflorestadas - principalmente dos gêneros eucalipto e pinus - para esse fim. Continuam, citando Moody *et al.* (1999), que praticamente todas as espécies de madeira podem ser utilizadas na fabricação de MLC, contanto que as suas propriedades físicas e mecânicas sejam apropriadas e que aceitem adequadamente o processo de colagem. Mais adiante, afirmam que em síntese, os principais requisitos para a produção de MLC são:

- a) A madeira deve ter densidade entre 0,40 g/cm³ e 0,75 g/cm³;
- b) Não utilizar, na constituição do mesmo elemento estrutural, madeiras com coeficiente de retração muito diferentes nas direções radial e tangencial;
- c) O teor de umidade das lâminas deve situar-se entre 7% e 14%.

Em Moody *et al.* (1999) afirma-se que a máxima diferença no teor de umidade deve ser de 5%, entre lâminas adjacentes, para reduzir os efeitos das variações dimensionais após a fabricação

No Brasil, a primeira indústria de madeira laminada colada foi a "Esmara Estruturas de Madeira Ltda", fundada em 1934 em Curitiba, Paraná. Atualmente,

existem quatro indústrias de MLC e uma de CLT em atividade. De MLC, uma no estado de Goiás, duas em São Paulo e uma no Rio Grande do Sul e de CLT uma em São Paulo. Essas fábricas de MLC produzem juntas, aproximadamente 5.000 metros cúbicos por ano, enquanto na Áustria, apenas uma indústria produz em torno de 170.000 m^3 de madeira laminada colada. A produção de CLT ainda se encontra em fase inicial, incipiente, necessitando de apoio e desenvolvimento tecnológico. A Crosslam iniciou suas atividades com a CLT há pouco mais de três anos e até o momento é a única empresa no Brasil que a produz.

Esse panorama mostra o enorme potencial de crescimento do setor existente no país. São apresentadas algumas aplicações de CLT nas Figuras 2.5 e 2.6 a seguir.

Figura 2.5 - Construção com Painel de CLT



Fonte: KLH, catálogo (2014).

Figura 2.6 - Construção com Painel de CLT



Fonte: Jular Madeiras, catálogo (2012).

2.2 Cultura do concreto no Brasil

A história do concreto armado remonta a Europa em meados do século XIX. O processo construtivo nasceu da construção de um barco na França, por Joseph-Luis Lambot (1814-1887), no qual foi utilizado cimento reforçado com ferros, processo esse que mais tarde passou a se chamar ferro-cimento ou concreto armado. Atualmente, o concreto armado consiste na combinação de uma mistura feita de agregados miúdos e graúdos, cimento, areia e água, com uma armadura interna de aço.

A partir dessa inovação construtiva, a utilização do concreto reforçado com barras de aço passou a ser utilizado para vários outros fins tais como, bacias, caixas d'água, tubos para encanamentos, etc. A facilidade de moldagem do material aliado à sua considerável resistência à compressão, levaram à difusão e expansão de sua técnica de fabricação e aplicação em larga escala por toda a Europa e Estados Unidos.

O concreto armado, juntamente com o aço e o vidro, transformou-se em material suporte para o desenvolvimento da arquitetura moderna que tanto marcou o cenário do mundo modernizado do século XX (BENÉVOLO, 1976).

No Brasil, como em nenhum país desse mundo moderno, essa tecnologia se difundiu de forma absoluta e hegemônica. É, sem sombra de dúvidas, o material estrutural mais utilizado nas construções das cidades brasileiras.

A sociologia da ciência considera que os artefatos humanos são construções individuais e coletivas, ligadas a grupos sociais e determinadas mais pelos interesses e recursos próprios desses grupos do que por forças externas (SANTOS, 2006). Isso significa decisivamente que, na difusão do concreto no país, estiveram em jogo relações sociais mais complexas que, no âmbito deste trabalho, não interessa entrar no mérito dessa discussão. Não serão apresentados aqui aspectos socioculturais envolvidos na difusão do concreto. O que importa é que ele é tido como resultado natural de uma longa evolução: o adobe do período colonial teria sido substituído pela alvenaria de tijolos do século XIX, para se chegar finalmente ao concreto, signo de modernização, progresso e desenvolvimento (SANTOS, 2006). A trajetória da difusão do concreto no Brasil ocorre em sincronia com a ampliação da disponibilidade dos materiais necessários à sua fabricação. A partir desse panorama é que acontece a consolidação e utilização de forma hegemônica do concreto no país.

Embora não se possa precisar a data em que começou a pré-fabricação, sua história está imbricada com a do concreto armado. O próprio nascimento do concreto armado ocorreu com a pré-moldagem de elementos fora do local do seu uso. Assim sendo, pode-se afirmar que a pré-moldagem começou com a invenção do concreto (Vasconcelos, 1985). Ainda de acordo com o autor, o período correspondente ao final do século XIX e início do século XX foi marcado pelo grande incremento do concreto armado na construção civil levando, concomitantemente, ao desenvolvimento da pré-moldagem.

É inegável que o sistema pré-fabricado tem avançado muito no Brasil, havendo, porém, muito terreno a percorrer. Os avanços já obtidos refletem, de certa forma, seu imenso potencial.

Hoje, a construção civil requer agilidade e sistemas em que a rapidez e a confiabilidade nos resultados obtidos na obra sejam fatores determinantes do sucesso em qualquer empreitada. O mercado nacional está carente de produtos e serviços que acelerem e tornem mais confiáveis os métodos construtivos utilizados por empresas em que a alta tecnologia se faz presente.

O sistema construtivo em estruturas pré-fabricadas de concreto traz em seu próprio conceito o desenvolvimento sustentável. Isto se deve, principalmente, à otimização do consumo de materiais pela adoção de tecnologias e equipamentos avançadas, resultando na produção de elementos resistentes e duráveis. Por outro

lado, a organização do canteiro de obras propicia um local favorável à produtividade, redução de desperdícios e utilização de mão de obra qualificada, considerando que os materiais e os componentes podem ser facilmente reutilizados e reciclados. O sistema construtivo pré-fabricado em concreto propicia uma série de vantagens, tais como:

- 1) Maior durabilidade: devido à redução de patologias e dos custos de manutenção;
- 2) Regularidade dimensional: Garantia dimensional, resultando em grandes reduções de custos em outras etapas da obra;
- 3) Versatilidade: Soluções arquitetônicas personalizadas;
- 4) Normatização: O uso de normas técnicas garantindo maior qualidade estrutural e uniformidade;
- 5) Resistência ao fogo: Elevada resistência ao fogo tornando os prêmios de seguro reduzidos em relação a outros sistemas industrializados;
- 6) Soluções e Sistemas: Possibilidade de integração entre os diferentes sistemas construtivos.

Esse último, vem corroborar com a decisão de utilizar o sistema pré-fabricado de concreto com o de madeira laminada colada cruzada. Pode-se verificar exemplos de lajes de concreto pré-fabricado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Sistema pré-fabricado utilizando-se lajes alveolares de concreto



Fonte: Do autor.



Fonte: Cassol, catálogo (2015).

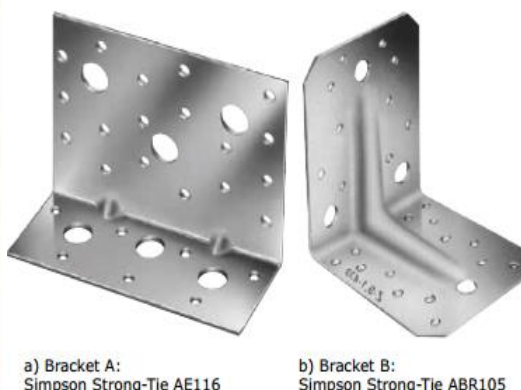
2.3 Conectores no sistema construtivo CLT

As Ligações entre madeira e concreto já foram bastante estudadas na Europa, EUA e Canadá. Autores como, Bathon e Graf (2000) "*A continuous wood-concrete-composit system*" - *World Conference on Timber Engineering (WCTE)* - Canadá, Benitez (2000) "*Development and testing of timber/concrete shear connectors - Project engineer, Faculty of Engineering, Austrália* - WCTE, Canadá, Branco (2003) "*Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira-betão* - Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Portugal, Ceccoti, Fragiacomio e Giordano (2006) "*Long-term and colapse tests on a timber-concrete compositive beam with glued-in connection – materials and Structures*", Clouston, Civjan e Bathon (2004) "*Experimental behavior of a continuous metal connector for wood-concrete composite sistem*" - *Forest Products Journal*, dentre outros, já abordaram o tema nos mais variados aspectos. Os objetivos de tais estudos visam abranger um universo de aplicações, tais como: ligações entre madeiras em variadas configurações, entre madeiras e treliças metálicas, entre madeiras e vigas metálicas de alma cheia, fundações com madeira, enfim, abordando uma grande parte dos sistemas construtivos pré-fabricados existentes na construção civil. Nessas ligações, tanto de madeiras entre si como nas ligações com estruturas metálicas, utilizam-se, na maioria das vezes, cantoneiras com parafusos auto-atarraxantes (madeira), parafusos com porcas (estruturas metálicas) e também, em grande parte, alumínio extrudado e conectores de chapa dobrada de formatos praticamente padronizados. O material mais utilizado é o aço, em cantoneiras com ângulo de 90° com enrijecedor de estampa, conforme mostrado nas Figuras 2.8, 2.9, 2.10, 2.11.

Figura 2.8 - Cantoneira para união de painéis



Figura 2.9 - Tipos de cantoneiras



Fonte: Jular Madeiras (2012)

A desvantagem das ligações nas quais se utilizam essas cantoneiras, é que ficam expostas e necessitam de uma altura entre piso e forro para escondê-las, como mostram as Figuras 2.10 e 2.11 abaixo.

Figura 2.10 - Cantoneiras de teto



Figura 2.11 - Cantoneira de piso



Fonte: Jular Madeiras (2012).

Outros exemplos de dispositivos utilizados no sistema CLT em ligações com vigas podem ser vistos nas Figuras 2.12 a 2.15.

Figura 2.12 - Conector para viga**Figura 2.13 - Conector oculto para viga**

Fonte: Jular Madeiras (2012).

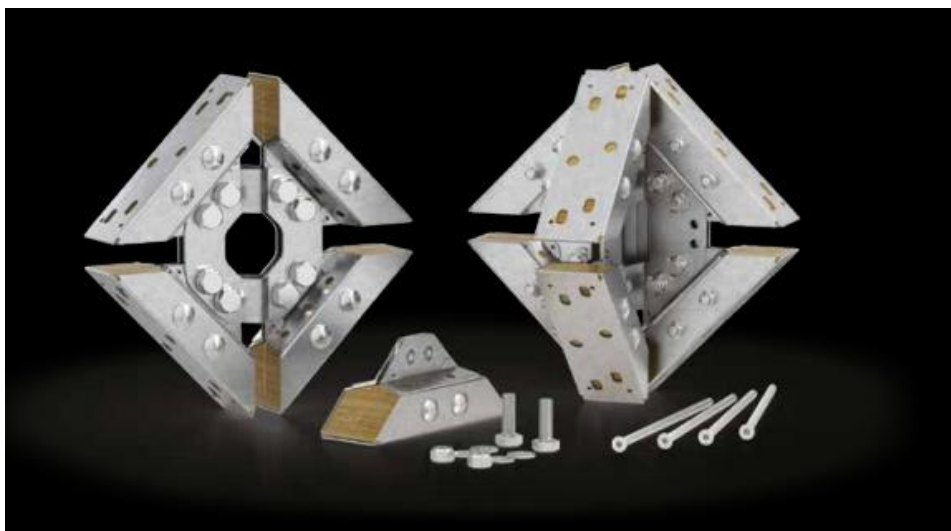
Figura 2.14 - Conector para vigas**Figura 2.15 - Conector oculto para vigas**

Fonte: Jular Madeiras (2012).

Existem conectores mais sofisticados, como o produzido pela RothoBlaas (2015), denominado Sistema de Ligação X-Rad. Esse sistema exige a preparação do painel na fábrica para o implante dos conectores. Sua instalação é relativamente simples com um bom resultado estético apesar de ser externo e aparente, como mostram as Figuras 2.16 e 2.17.

Os conectores em cantoneira de chapa dobrada são muito eficientes nas ligações de madeira com madeira. Porém, nas ligações com concreto armado, apresentam algumas limitações no que tange à fixação com buchas e furação do concreto.

Figura 2.16 - Sistema de Ligação X-Rad



Fonte RothoBlaas (2015).

Figura 2.17 - Sistema de Ligação X-Rad



Fonte RothoBlaas (2015).

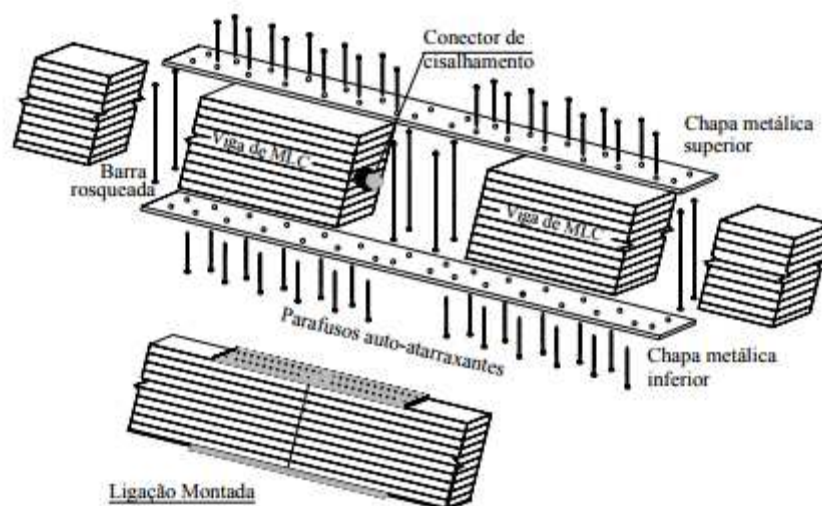
2.4 Algumas pesquisas realizadas sobre o tema

Nesse tópico, são apresentadas algumas pesquisas realizadas em instituições nacionais e estrangeiras, que proporcionam uma visão geral dos conceitos mais importantes pertinentes ao tema, com destaque para alguns pontos significativos que devem ser levados em conta no desenvolvimento dessa pesquisa.

2.4.1 Avaliação do Comportamento de Ligações com Parafusos Auto-Atarraxantes em vigas de MLC. (DUARTE, 2004)

Nesse trabalho, Duarte (2004) apresenta um estudo experimental de ligações rígidas entre vigas de madeira laminada colada (MLC) no qual utiliza parafusos auto-atarraxantes e chapas metálicas, solicitadas a momento fletor e esforço cortante. A madeira utilizada foi a mesma adotada no presente trabalho, *Eucalyptus grandis*. Foram realizados ensaios não destrutivos para caracterização da madeira, tais como, determinação da densidade, do teor de umidade e determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão paralela às fibras. Esses procedimentos iniciais são muito importantes para a montagem da viga de MLC, uma vez que, permitem a disposição seletiva das tábuas na montagem da viga, resultando em um aumento da qualidade, um melhor aproveitamento e, principalmente, uma diminuição nas variações das propriedades da madeira utilizada. Segundo a autora, a escolha do arranjo de ligação e do parafuso auto-atarraxante foi fundamentada em extensa revisão bibliográfica.

Figura 2.18 - Arranjo de ligação a ser estudado por Duarte (2004)

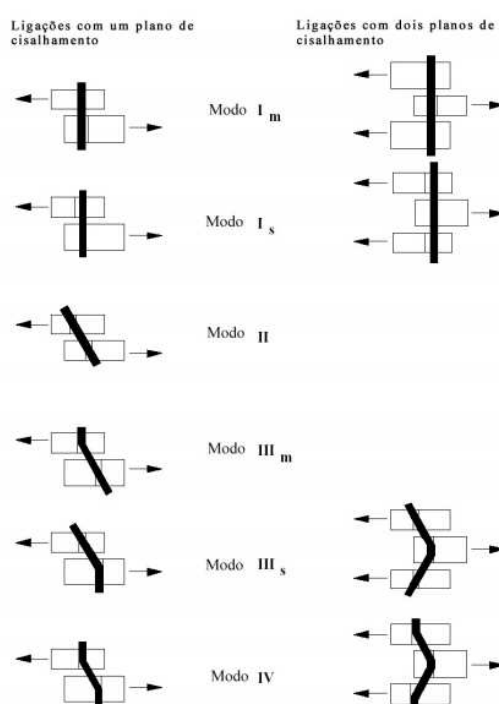


Fonte: Adaptado a partir de Komatsu.

Logo no início do seu trabalho, a autora comenta sobre o modelo de escoamento europeu, *European Yield Model* (EYM), que serve de base para o dimensionamento das ligações com pinos solicitadas a forças laterais em várias normas internacionais de estruturas de madeira, tais como: as *americanas National Design Specification* (NDS) (1991), (1997) e (2001), *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) (1996), a *Europa EUROCODE 5* (1994) e a *canadense CSA - Canadian Standards Association* (1994). Esse modelo é mundialmente conhecido por "teoria do escoamento" (*Yield Theory -YM*) ou "modelo de escoamento europeu" (*European Yield Model* - EYM). Duarte (2004), continua a descrever que o EYM é utilizado para estimar a resistência lateral de uma ligação com um pino, com um e com dois planos de corte.

Soltis, Hubbard e Wilkinson (1986, *apud* DUARTE, 1994), que supõem que o estado-limite da ligação pode ser alcançado devido ao embutimento do pino na madeira ou pela flexão do pino com a formação de uma ou mais rótulas plásticas. Essas suposições fornecem seis modos de ruptura para ligações com um plano de cisalhamento e quatro modos de ruptura para ligações com dois planos de cisalhamento conforme mostrados na Figura 2.19.

Figura 2.19 - Modos de ruptura das ligações



Fonte: Duarte (2004).

Os modos de ruptura I_m e I_s representam o embutimento do pino na peça principal (índice m) e lateral(ais) respectivamente (índice(s) s). O modo de ruptura II representa a rotação do pino sem flexão e o embutimento do pino em ambas as peças. O modo de ruptura III_m representa o embutimento do pino na peça principal e a flexão do pino na(s) peça(s) lateral(ais). O modo de ruptura III_s , representa o embutimento do pino na(s) peça(s) lateral(ais) e a flexão do pino na peça principal. O modo de ruptura IV representa a flexão do pino nas peças principal e lateral(ais). A cada modo de ruptura, está relacionada uma equação para a determinação da resistência lateral da ligação. O modo que resultar na menor resistência é considerado como determinante da resistência lateral teórica da ligação.

Smith e Foliente (2002, *apud* DUARTE, 2004), quando se utilizam equações baseadas no EYM, a resistência da ligação é, normalmente, determinada no estado-limite com deformações residuais de 5% do diâmetro do pino. Desta forma, as propriedades dos materiais que entram nas equações, resistência ao embutimento e momento resistente do pino, também devem ser determinadas nesse mesmo estado limite. Assim, espera-se que as resistências das ligações determinadas pelo EYM sejam maiores que as determinadas a partir do estado-limite de escoamento.

A discussão e os problemas apresentados no capítulo 6 do seu trabalho - Metodologias para Ensaio de Ligações - trazem uma contribuição enorme na estruturação dessa pesquisa. A autora cita Smith e Foliente (2002), que apontam existir uma falha em todas as normas de ensaios de estruturas de madeira. Essa falha se traduz na falta de padronização dos métodos de ensaio para arranjos de ligações mecânicas cujo objetivo é estabelecer suas propriedades e avaliar o seu desempenho, no qual é levado em consideração um pequeno número de ensaios. Talvez aqui resida o maior problema das normas de ensaio pertinentes ao tema. Ainda segundo os mesmos autores, a única referência encontrada para a padronização desses métodos de ensaios é dada em um projeto de norma australiana, *STANDARDS AUSTRALIA/NEW ZELAND - AS BBBB* (1997). Ela aponta, ainda, que segundo Foliente e Leicester (1996, s.p.), os objetivos mais importantes deste projeto de norma são:

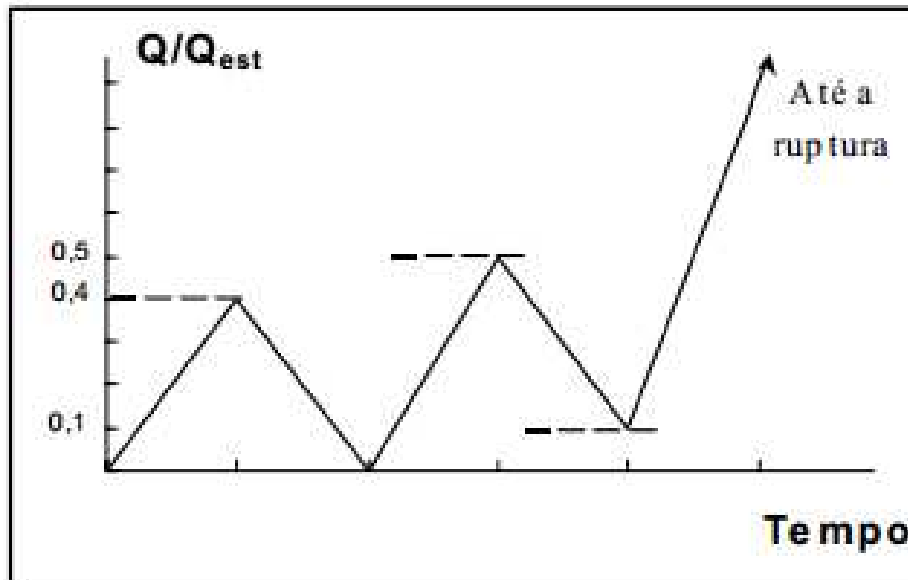
- a) Consideração de uma real configuração nodal em serviço;
- b) Consideração de cargas de serviço realistas...;

- c) Métodos consistentes para a obtenção da resistência característica e outras propriedades de cálculo;
- d) métodos consistentes para aplicação dos fatores de carga.

O projeto de norma australiana, continua Duarte (2004), fornece os métodos de ensaio e métodos para avaliação do desempenho e determinação das propriedades de cálculo de arranjos de ligações mecânicas em estruturas de madeira, submetidos à cargas estáticas, cíclicas de vento ou de terremotos, apontando as principais recomendações para arranjos de ligações submetidos à carga estática. Estas recomendações começam pela fabricação e condicionamento dos corpos de prova. Salientam que as peças não devem ter defeitos que interfiram na resistência do arranjo de ligação e que devem ser condicionadas em um local com temperatura e umidade do ar controladas para que esses fatores não interfiram nos resultados do ensaio.

Uma outra recomendação é relativa à aplicação do carregamento. A carga deve ser aplicada em regime monotônico com um pré-carregamento e com uma velocidade de aplicação que deve variar de $0,2Q_{est}/\text{minuto}$, sendo Q_{est} a força estimada, e $2Q_{est}/\text{minuto}$ ou outra taxa que represente a situação real, Figura 2.19. O carregamento deve começar do zero, ir até 40% da carga estimada, depois descarregar até zero e recomeçar de novo até 50% da carga estimada, descarregar novamente até 10% da carga estimada e carregando em seguida até a ruptura. Observa que, se a carga última tiver uma variação maior que 20% da carga estimada (Q_{est}), o valor da carga estimada deve ser corrigido para os demais ensaios e o valor da rigidez para o ensaio já realizado deve ser determinado com base na nova carga estimada. O gráfico que representa o carregamento aplicado é mostrado na Figura 2.20.

Figura 2.20 - Aplicação de Carga



Fonte: Standards Australia/New Zeland - AS BBBB, (1997).

O projeto de norma australiano recomenda, também, a forma de apresentação dos resultados. Enfatiza que em cada ensaio deve ser determinada a curva carga-deslocamento com medições contínuas da carga e do deslocamento. Se não for possível, deve-se medir a carga e a deformação a cada incremento de $0,1Q_{est}$ na carga. Tanto a carga estimada última ou seu valor corrigido e a deformação limite máxima, devem ser também apresentados. Através da curva carga-deslocamento pode ser determinada a carga última (Q_u), o deslocamento último (δ_u), a rigidez inicial (K_0), deslocamento inicial (δ_0) e a rigidez em serviço (K_s).

Por último, fornece as equações para a determinação das propriedades da ligação. Cita os autores Foliente e Leicester (1996) que determinaram as equações dos valores característicos da rigidez e da resistência das ligações com 75% de confiança. As equações são apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Determinação de Propriedades das Ligações

Propriedade	Equação
Rigidez Característica (M_k)	$M_k = \left[1 - \left(\frac{0,7V}{\sqrt{N}} \right) \right] M_{mean}$ <p>M_{mean} a rigidez média determinada pelos ensaios; V o coeficiente de variação da rigidez; N o número de corpos-de-prova ensaiados.</p>
Resistência Característica (R_k)	<p>Sendo $N < 10$:</p> $R_k = R_{min} (N/27)^{1/3}$ <p>R_{min} o valor mínimo da carga última considerando todos os corpos-de-prova ensaiados; V_e estimativa do coeficiente de variação da carga última.</p> <p>Sendo $N \geq 10$:</p> $R_k = \left[1 - \left(\frac{2,7V}{\sqrt{N}} \right) \right] R_{0,05}$ <p>$R_{0,05}$ é o percentil 5% dos valores da carga; V o coeficiente de variação da carga última calculado.</p>
Resistência nominal ($R_{k,nom}$)	$R_{k,nom} = \frac{1}{\phi} (0,85 - 0,95V) R_k$ <p>ϕ é o fator de segurança para o tipo de elemento de ligação utilizado</p>
Capacidade de carga para tensões de serviço (R_{bws})	$R_{bws} = \frac{1}{1,35k_d} (0,85 - 0,95V) R_k$ <p>k_d é o fator de duração da carga para 50 anos.</p>

Fonte: Elaboração de Duarte (2004) a partir de Foliente e Leicester (1996).

Os resultados dos ensaios de flexão estática na viga com a ligação, mediante a variação do número de parafusos auto-atarraxantes, continua Duarte (2004), permitiram avaliar o comportamento da ligação e, ainda, identificar a influência do número de parafusos na rigidez à flexão da viga. Notou-se que, quando foram utilizados 60 parafusos auto-atarraxantes na ligação, a rigidez à flexão da viga com ligação foi praticamente igual à rigidez da mesma viga ensaiada sem ligação. Com o aumento do número de parafusos na ligação (68, 72 e 84), houve também um aumento na rigidez à flexão da viga, ou seja, a ligação funcionou também como um reforço. Quando foram utilizados menos de 60 parafusos (52, 44, 36, 28 ou 20) a rigidez à flexão da viga com ligação foi sempre inferior à rigidez da mesma viga sem ligação.

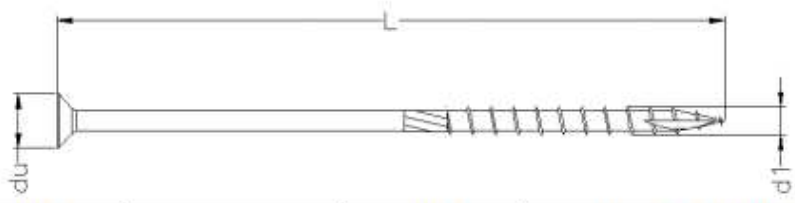
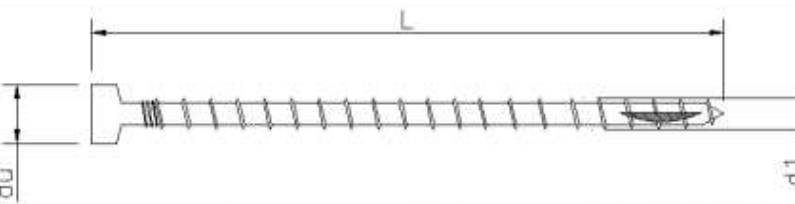
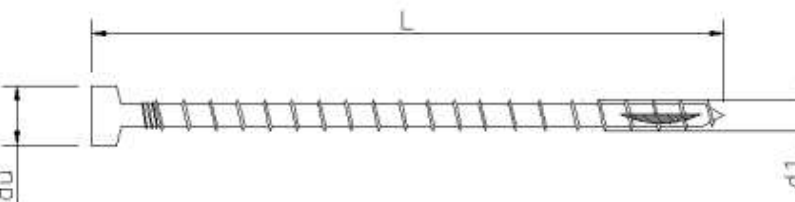
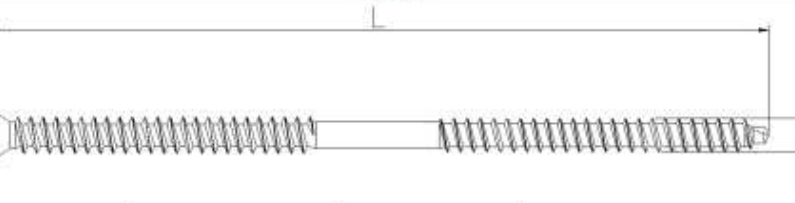
Com base no estudo experimental, pode-se concluir que a ligação estudada tem grande potencial de ser utilizada na prática: é de fácil execução e de garantida eficiência, quando adequadamente dimensionada. Os elementos de ligação possuem elevada resistência aos esforços de cisalhamento ou axiais, quando inseridos em peças de madeira.

2.4.2 Ligações Estruturais de Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT) Utilizando Parafusos Autoperfurantes. (CUNHA, 2012a)

Nesta pesquisa, Cunha (2012a), através de ensaios de cisalhamento direto, ensaia um total de 20 corpos de prova de ligações divididos em 4 grupos de acordo com o tipo de parafuso utilizado:

HBS 8x40, VGZ 7x140, SFS 8.2x190 e VGZ 1x180. O experimento, a determinação da força máxima e o módulo de deslizamento seguiram o prescrito na EN-26891, 1991. Os resultados foram discutidos e comparados com a metodologia de cálculo preconizada pelo EN 1994-1-1:2004 e EN 1995-1-1:2003, principalmente no que se refere à previsão da força máxima, modo de ruptura e módulo de deslizamento. O autor conclui que os sistemas de ligações dispostos com uma inclinação de penetração de 45° apresentam valores de resistência ao corte superiores aos dos sistemas de ligações com inclinação de penetração de 90°. O autor esclarece que a especificação da classe de resistência e a determinação dos valores característicos da madeira, tanto nos painéis CLT quanto nos MLC, seguem as recomendações da Norma Portuguesa EM 1194, 1999. Os parafusos utilizados na pesquisa são mostrados na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Características geométricas dos conectores utilizados

HBS			
			
du	L	d1	Preço /unidade
25 mm	140.0 mm	8.0 mm	€ 0.402
VGZ			
			
du	L	d1	Preço /unidade
9.5 mm	140.0 mm	7.0 mm	€ 0.648
VGZ			
			
du	L	d1	Preço /unidade
9.5 mm	180.0 mm	7.0 mm	€ 0.969
SFS			
			
du	L	d1	Preço /unidade
10 mm	190.0 mm	8.2 mm	€ 2.76

Fonte Cunha: (2012a).

Segundo o autor, o procedimento de ensaio foi preparado com base na Norma Européia EN 26891, 1991, que consiste em seguir um programa de carga definido, obtendo uma curva carga - deslocamento a mais próxima possível da que está apresentada na Figura 2.22-b.

Figura 2.22 - a) Programa de carga

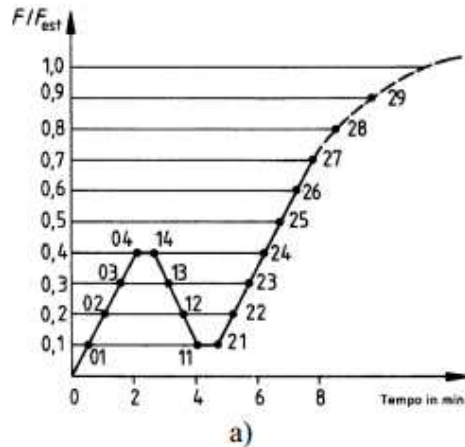
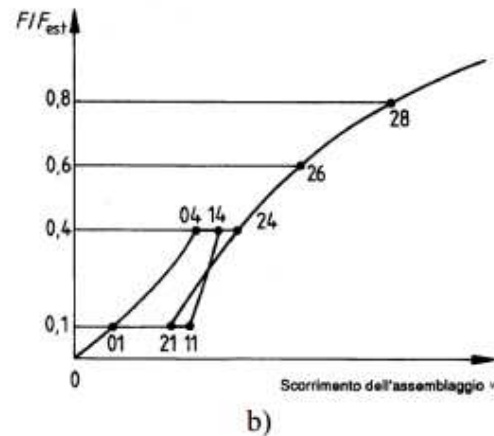


Figura 2.22 - b) Curva carga-deslocamento esperada



Fonte: Cunha (2012a).

O autor esclarece, também, que para obtenção dos gráficos de força-deslocamento, a determinação da força estimada foi feita através do EUROCODE 5, item 8.2.2, utilizando a equação (E2.1). Nesta equação cada expressão representa um modo de ruptura. A equação (E2.1) é mostrada abaixo. O Valor de $F_{V,RK}$ é o mínimo valor encontrado em uma das equações.

- Equação (E2.1) - EUROCODE 5

$$F_{V,RK} = f_{h,1,k} t_1 d$$

$$F_{V,RK} = f_{h,2,k} t_2 d$$

$$F_{V,RK} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \text{E2.1}$$

$$F_{V,RK} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{V,RK} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Fonte: Cunha (2012a).

Onde:

$F_{v,Rk}$ é a força resistente característica por plano de cisalhamento por fixador;

t_i é a espessura da madeira ou profundidade de penetração, com i ou 1 ou 2;

$f_{h,1,k}$ é a resistência característica de embutimento da madeira;

d é o diâmetro do conector;

$M_{y,Rk}$ é o momento característico de escoamento do conector;

β é a razão entre a força de encaixe dos elementos;

$F_{ax,Rk}$ é a capacidade de arrancamento axial característica do conector, ver (*).

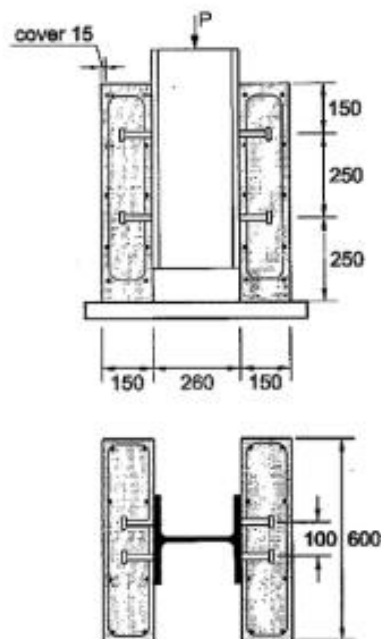
Por fim, o autor conclui que nos ensaios experimentais por ele realizados, os sistemas de ligações dispostos com uma inclinação de 45° apresentam valores de resistência ao corte superiores que os sistemas de ligações com inclinação de penetração de 90°. Conclui, também, que os deslocamentos são menores. Observa, que os módulos de deslizamentos calculados pela metodologia preconizada pelo EC5, revelam-se conservadores quando comparados com os resultados experimentais, apresentando uma diferença de 22% a 30%. Que os tipos de parafusos, quando comparados entre si, constata-se que é mais vantajoso a utilização dos parafusos VGZ a 45°, do que os SFS, por serem estes mais viáveis economicamente e apresentarem uma relação muito próxima em termos de força máxima e deslocamento.

2.4.3 Influência do Corpo de Prova na Caracterização experimental de Ligações Mistas de Madeira e Concreto. (CARVALHO, 2010)

A capacidade de resistência de ligações mistas de madeira e concreto é geralmente avaliada por meio de ensaios de cisalhamento. Nesse artigo, Carvalho (2010), aborda e compara os resultados de ensaios de cisalhamento utilizando duas séries diferentes de arranjos dos corpos de prova que, segundo a autora, são os mais utilizados nesses tipos de ensaios. O tipo *push-out* com centrais de madeira e de concreto nos lados e o *push-out* com centrais de concreto e madeira nos lados. A autora aponta para a falta de normas específicas que possam balizar esses tipos de ensaios que, normalmente, utilizam-se de normas como a EN 26891 e ASTM D 5652 para ensaios de ligações entre peças de madeira, ou EUROCODE 4 para ligações mistas de aço e concreto. Esclarece que para juntas de concreto e aço já existe um

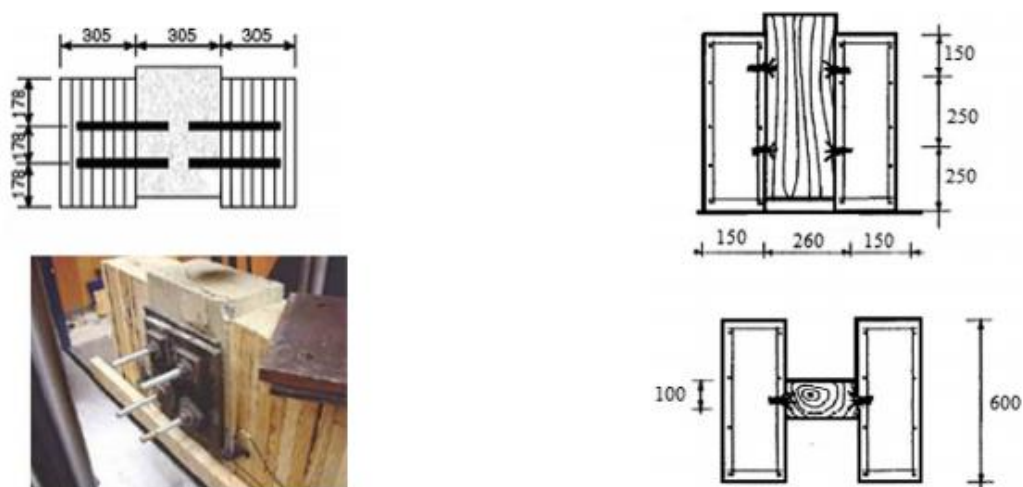
teste padrão de corte descrito por Johnson e Anderson (1993). Esses autores também discutiram as muitas diferenças nos resultados dos ensaios de cisalhamento devido as diferenças nos métodos de ensaio antes da padronização proposta pela EUROCODE 4. A autora apresenta algumas dúvidas sobre a disposição dos corpos de prova para ensaios de cisalhamento em ligações de concreto e madeira e realizou um programa experimental para execução dos ensaios. A madeira utilizada foi o *Eucalyptus Grandis*. Foram utilizados conectores metálicos de aço corrugado com 8, 10 e 12,5mm de diâmetro. Os conectores foram colados na madeira com a utilização de adesivo epoxi bicomponente. Os resultados dos ensaios mostraram que o arranjo do corpo de prova influencia a força e a deformação características de ligações mistas de madeira e concreto. Segundo a autora, os protótipos de melhor resistência ao corte foram os do tipo laterais de concreto com madeira no centro. Os arranjos dos corpos de prova são mostrados nas Figuras 2.23 e 2.24.

Figura 2.23 - Arranjos para teste *push-out* padrão (mm) - EUROCODE 4.



Fonte: Carvalho (2010).

Figura 2.24 - Arranjos para testes *push-out* de concreto e madeira - centro de concreto e madeira dos lados e centro de madeira e concreto dos lados.

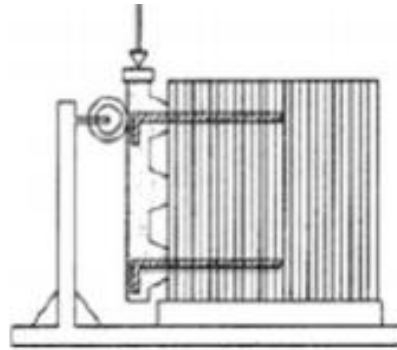


Fonte: Carvalho (2010).

A autora salienta que nas estruturas mistas de madeira e concreto, o concreto pode aumentar a rigidez das estruturas quando disposto de forma correta permitindo proteger a madeira contra os efeitos ambientais. Nas estruturas mistas a resistência e a deformação características são muito importantes nas conexões, a fim de avaliar o comportamento mecânico da estrutura. A confiabilidade do sistema de ligação depende das condições dos conectores, dos materiais envolvidos, do deslizamento inicial e da rigidez à flexão eficaz do sistema.

A rigidez de um sistema de ligação é estimada utilizando o seu módulo de deslizamento, que quantifica a resistência oferecida contra o deslocamento na superfície de contato entre o concreto e a madeira, quando uma carga é aplicada à estrutura. Além da rigidez, continua a autora, a ductibilidade da ligação é também uma característica de segurança importante de uma estrutura mista. São exatamente essas características importantes, resistência, rigidez e ductibilidade que são avaliadas através de ensaios de cisalhamento para verificação da capacidade de suporte de cargas de uma ligação. Esclarece que existem, em geral, três modalidades para testar modelos em ensaios de cisalhamento com estruturas mistas de madeira e concreto: *push-out* com centrais de madeira e concreto dos lados, centrais de concreto e madeira dos lados e cisalhamento puro. As duas primeiras modalidades são mostradas na Figura 2.24. A modalidade de cisalhamento puro pode ser vista na Figura 2.25.

Figura 2.25 - Arranjo para teste *push-out* de cisalhamento puro



Fonte: Carvalho (2010).

A autora cita Capretti, Ceccotti e Senno (1998), que compararam resultados a partir de séries diferentes de arranjos, como os citados anteriormente, e observaram que não há nenhuma discussão sobre acordos de qual teste é mais eficiente que o outro. Os muitos arranjos diferentes encontrados na literatura destacam a falta de um padrão e levantam questões sobre potenciais diferenças nos resultados dos ensaios. Esta questão precisa ser especificamente investigada e, se for necessário, um padrão deve ser criado no futuro, conclui Carvalho (2010). Foram realizados nove série de ensaios de cisalhamento, com quatro repetições para cada série, resultando em 36 testes no total. Como não existe norma específica, a EN 26891 foi utilizada neste caso. No entanto, a resistência da junta foi considerada como a carga máxima atingida no ensaio. A carga foi aplicada com uma máquina universal e registrada com uma célula de carga. Para medir deslizamento e deformação foram utilizados transdutores de precisão. Pode-se verificar a construção dos modelos nas Figuras 2.26, 2.27 e 2.28.

Figura 2.26 - Armação das lajes concreto



Figura 2.27 - Concretagem das lajes



Fonte: Do autor.

Figura 2.28 - Painéis de madeira com o conector colado



Fonte: Carvalho (2010).

Os protótipos ensaiados são mostrados nas Figuras 2.29 a 2.31.

Figura 2.29 - Modelo CWC - tipo A



Figura 2.30 - Modelo CWC - tipo B



Fonte: Do autor.

Figura 2.31 - Modelo WCW - tipo C

Fonte: Carvalho (2010).

Durante os ensaios, foram verificadas trincas no concreto, perto dos conectores, principalmente em amostras do tipo A, Figura 2.32. Espécimes do tipo C também tiveram modo de falha no qual os conectores foram deformados e a madeira esmagada, Figura 2.33.

Concluindo, a autora aponta para a importância do arranjo dos corpos de provas para ensaios de cisalhamento em ligações de estruturas mistas e que os melhores resultados foram os que utilizaram os corpos de prova no arranjo de concreto nas laterais e madeira no centro, que apresentaram o melhor módulo de resistência conjunta e deslizamento e os que mais se aproximaram da configuração padrão de testes para viga mista.

Figura 2.32 - Falha no concreto**Figura 2.33 - Falha no conector e na madeira**

Fonte: Carvalho (2010).

2.4.4 Análise Experimental de Ligações de Madeira e Concreto Pré-Carregadas Lateralmente. (BRANCO, 2009)

Neste trabalho, Branco (2009), avaliou a precisão da metodologia proposta no EUROCODE 5 para conexões pré-carregadas lateralmente de madeira e concreto. Num primeiro momento o autor analisou e discutiu a adequação da metodologia proposta pelo EUROCODE 5 usando madeira de *Pinus Pinaster*. Através de ensaios de *push-out*, com ligações tipo cavilha, utilizando-se pinos quadrados e redondos lisos, em cisalhamento simples e duplo. Num segundo momento, o autor analisou e discutiu os resultados de ensaios nos quais utilizou metodologia semelhante e mesmo tipo de elementos de fixação, para ligações de madeira e concreto. O uso e a influência da concretagem com forma permanente também são investigados.

O autor comentou que o modelo de escoamento europeu (MEJ), originalmente proposto por Johansen (1949), que pode ser encontrado no EUROCODE 5, é geralmente aceito para a determinação da capacidade de suporte de carga lateral utilizando-se elementos de fixação tipo pinos, especialmente para falhas dúcteis. As equações com base nessa teoria prevêm a capacidade de carregamento de um único conector por plano de corte, colocado perpendicular ao seu eixo e dependem das propriedades do material (madeira), dos elementos de fixação e da geometria da ligação. O comportamento de deformação dessas ligações é baseado no módulo de deslizamento de um único conector por plano de corte e os resultados podem ser conseguidos por meio de ensaios de acordo com a EN 26891, 1991, ou calculada usando expressões propostas no EUROCODE 5.

O autor comentou que, outras aplicações muito comuns de elementos de fixação tipo pino podem ser encontradas nas placas de madeira e concreto que, frequentemente, são utilizadas em obras de restauro, em especial quando são necessárias melhorias no suporte de cargas de placas de madeira já envelhecidas. Este sistema misto, consiste em membros de madeira na parte tracionada e uma camada de concreto fina na parte comprimida ligados entre si por meio elementos de fixação ou dispositivos especiais. Saliu que, sistemas de madeira e concreto resultarão não só no fortalecimento do piso de madeira através da adição de uma laje de concreto mas, também, para melhorar o isolamento acústico, inércia térmica e de proteção contra incêndios.

Em comparação com as soluções tradicionais, os sistemas mistos de madeira e concreto resultam em menor peso que os sistemas de concreto armado, um significativo aumento da capacidade de suporte de cargas e rigidez à flexão do que os sistemas de piso de madeira tradicionais e melhor controle da vibração dos pavimentos. A ligação madeira e concreto, que rege o comportamento estrutural de tais sistemas, é frequentemente conseguido por meio de pregos, parafusos ou barras de aço, que podem ser classificados como elementos de ligação do tipo pino. Apesar dos bons resultados obtidos por essa técnica, nenhum método de análise específico é apresentado no EUROCODE 5 para conectores tipo pino em ligações de madeira e concreto. No EC 5, parte 2, presume-se que o módulo de deslizamento nas ligações de madeira e concreto será o dobro em comparação com sistemas semelhantes de ligações madeira e madeira.

Como já foi visto anteriormente, o método de concepção das conexões com pinos para ligações de madeira com madeira proposto pelo EC 5, baseia-se na teoria do escoamento de Johansen (1949), também conhecida como modelo de escoamento europeu (MEJ). Neste modelo, tanto para a madeira quanto para o conector são assumidos um comportamento rígido-plástico. Enquanto esta suposição possibilita uma simplificação considerável da análise, provoca, ao mesmo tempo, um pequeno impacto sobre os resultados finais. O autor citou os modos de falha previstos no EC 5, já vistos anteriormente. Tendo como base a distribuição de tensão mostrada naquelas Figuras e o equilíbrio procurado, é possível quantificar a capacidade de suporte de carga associada a cada modo de falha. Aqui são mostradas as equações para um plano de corte (1) e para dois planos de corte (2), mostradas abaixo, conforme EUROCODE 5.

$$F_{V,RK} = f_{h,1,k} t_1 d \quad (\text{E 2.2})$$

$$F_{V,RK} = f_{h,2,k} t_2 d \quad (\text{E 2.3})$$

$$F_{V,RK} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (\text{E 2.4})$$

$$F_{V,RK} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (\text{E 2.5})$$

$$F_{V,RK} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (\text{E 2.6})$$

$$F_{V,RK} = f_{h,1,k} t_1 d \quad (\text{E 2.7})$$

$$F_{V,RK} = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (\text{E 2.8})$$

$$F_{V,RK} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (\text{E 2.9})$$

$$F_{V,RK} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (\text{E 2.10})$$

(1)

(2)

Onde:

$F_{v,Rk}$ é a força resistente característica por plano de cisalhamento por fixador;

t_i é a espessura da madeira ou profundidade de penetração, com i ou 1 ou 2;

$f_{h,1,k}$ é a resistência característica de embutimento da madeira;

d é o diâmetro do conector;

$M_{y,Rk}$ é o momento característico de escoamento do conector;

β é a razão entre a força de encaixe dos elementos;

$F_{ax,Rk}$ é a capacidade de arrancamento axial característica do conector, ver (*).

O valor característico da capacidade de carga das articulações por plano de cisalhamento e por fixador ($F_{v,Rk}$), vai corresponder ao valor mínimo determinado pelo equilíbrio de tensão e o modo de falha correspondente será aquele que corresponde à menor resistência. Os valores característicos para a resistência ao esmagamento e a capacidade de flexão do conector deve ser determinado de acordo com a EN 383, 1993 e EN 409, 1993 que são padrões de referência, respectivamente. No entanto, a força para o embutimento da madeira, tendo como base um grande número de ensaios de embutimento pode ser expressa em função do diâmetro do conector e da densidade da madeira para cargas aplicadas na direção paralela as fibras e com furos pré-perfurados (Equação (E 2.11))

$$f_{h,k} = 0,082 (1 - 0,01d)\rho_k \quad (\text{E 2.11})$$

onde, ρ_k é a densidade característica da madeira, em kg/m^3 e d é o diâmetro do conector, em mm. O autor comentou que, com base em uma derivação teórica do ângulo de flexão do fixador com um deslocamento da junção de 15 mm, a expressão proposta para a capacidade de flexão dos fixadores, com seção redonda (E 2.12) e quadrada (E 2.13), Blass, Bienhaus e Krämer (2001).

$$M_{y,k} = 0,3f_u d^{2.6} \quad (\text{E 2.12})$$

$$M_{y,k} = 0,45f_u d^{2.6} \quad (\text{E 2.13})$$

onde d é o diâmetro do pino, tal como definido na norma EN 14592, em mm, e f_u é a resistência à tração do pino, em N/mm^2 .

Para a quantificação da capacidade de carga de conexões de concreto e madeira, nenhum modelo particular ou expressão simplificada é apresentada pelo EUROCODE 5.

A curva de carga/deslocamento completa, continuou o autor, alcançada nos ensaios realizados no âmbito desta pesquisa, não só proporcionou a carga de ruptura da ligação mas, também, deu informação adicional sobre a rigidez e ductibilidade da ligação.

Segundo Branco (2009), algumas expressões derivadas podem ser encontradas no EC 5 parte 1, para o cálculo do módulo de deslizamento (K_s em EN 26891, 1991 e K_{ser} no EUROCODE 5). Exemplificando, para o caso em análise, conexões com elementos de ligação do tipo pino, utilizando pregos com furos pré-perfurados, a norma propõe que o módulo de deslizamento (K_{ser}) por plano de cisalhamento e por conector, sob carga de serviço, deve ser igual a:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \frac{d}{23} \quad (E 2.14)$$

onde ρ_m é a densidade média da madeira, em kg/m^3 , e d de o diâmetro do pino, em mm.

Demonstrou-se que o comportamento mecânico das estruturas mistas, tais como os elementos compostos de madeira e concreto, é mais frequentemente influenciado pelo módulo de deslizamento da junção do que pela capacidade máxima de carga de ruptura da junta. Em geral, deve-se afirmar que as propriedades de resistência e rigidez das conexões mistas de madeira e concreto devem ser avaliadas por ensaios. O EUROCODE 5, parte 2, contém poucas informações sobre o comportamento e projeto de conexões mistas de madeira e concreto. Sem o apoio de resultados experimentais, o EC 5, sugere ter em conta um valor do módulo de deslizamento duplo do que o de uma conexão semelhante de madeira com madeira. Isso não parece ser razoável. Os amplos resultados experimentais, Dias (2005), Mascia e Soriano (2000), Gelfi e Giuriani (1999) e Soriano e Mascia, não concordam com a sugestão do EUROCODE 5. Também é verdade que poucos autores propuseram equações simplificadas em consequência da dificuldade de avaliar, através de ensaios, todos os parâmetros envolvidos. No entanto, Turrini e Piazza

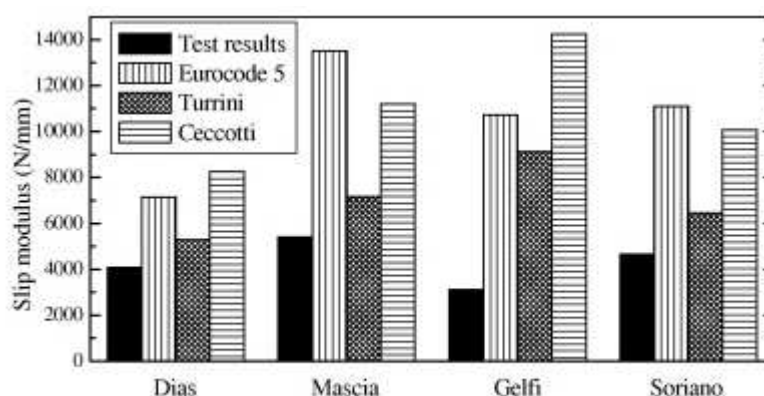
(1983) e Ceccotti (1995), propuseram expressões para a determinação do módulo de deslizamento com base em resultados experimentais, que, em alguns casos, estão de acordo com os resultados dos ensaios, Figura 2.36. Ambos os pesquisadores, definiram o módulo de deslizamento em termos do diâmetro do conector, mas, em vez do valor médio da densidade da madeira, sugerem o uso do módulo de elasticidade da madeira (E 2.15) e (E 2.16)

$$\text{Turrini: } K_{ser} = 0,08 Ed \quad (\text{E 2.15})$$

$$\text{Ceccotti: } K_{ser} = 0,125 Ed \quad (\text{E 2.16})$$

onde E é o módulo de elasticidade da madeira e d é o diâmetro do conector.

Figura 2.34 - Comparação de resultados experimentais para o módulo de deslizamento e a previsão do EURODE 5 ,Turrini (1993) e Ceccotti (1995)



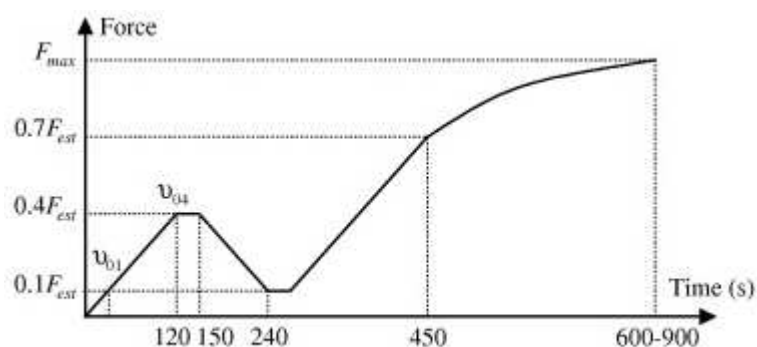
Fonte: Branco (2009).

Segundo Branco (2009), a avaliação experimental da capacidade de suporte de cargas e das propriedades de deformação das juntas de madeira e madeira e mistas de madeira e concreto deve ser conduzida de acordo com a EN 26891, 1991. Esta norma estabelece as regras e os princípios para determinação da capacidade de suporte de cargas e propriedades de deformação das juntas de madeira conectadas através de fixadores mecânicos. No entanto, uma vez que não existe um padrão específico, a EN 26891, 1991, é normalmente usada para conexões mistas de madeira e concreto como, também, para conexões com chapas de aço e madeira.

Na EN 26891, todos os parâmetros do procedimento de carregamento são definidos com base em uma estimativa inicial da carga máxima (F_{est}). Esta estimativa é obtida a partir da experiência, dos cálculos ou dos resultados dos ensaios preliminares e é mantida para todos os ensaios, sendo alterada somente se, durante os ensaios, o valor médio da carga máxima desviar mais de 20% da F_{est} . O ensaio é realizado com controle de carga até 70% da carga máxima estimada e, a partir desse ponto, com controle do deslocamento. O ensaio termina quando a carga máxima é atingida ou quando o deslizamento é igual a 15 mm.

Na Figura 2.35, a curva de carga/tempo para todo o teste é mostrada.

Figura 2.35 - Curva de carga/tempo segundo o EN 26891, 1991



Fonte: Branco (2009).

Com base nas curvas de carga/deslocamento obtidas a partir dos ensaios, propriedades diferentes podem ser calculadas incluindo a carga máxima (F_{max}) e o módulo de deslizamento (K_s). A carga máxima é obtida diretamente a partir da curva de carga/deslocamento. O módulo de deslizamento é calculado usando a equação (E 1.6)

$$K_s = \frac{0,4 F_{est}}{\frac{4}{3}(V_{04} - V_{01})} \quad (\text{E 2.16})$$

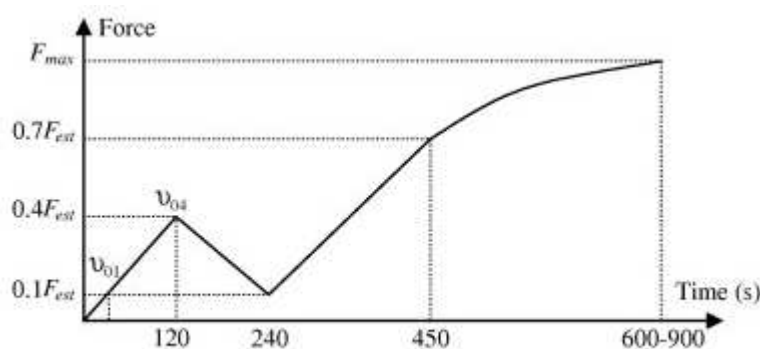
onde v_{01} é o deslizamento medido quando 10% da carga estimada é aplicada e v_{04} é o deslizamento medido quando 40% da carga estimada é aplicada e F_{est} é a carga estimada.

O módulo de deslizamento das conexões é então determinado com base na carga máxima estimada e no deslocamento medido em dois pontos do procedimento

de carregamento. No entanto, Dias (2005), descobriu que o método proposto na EN 26891 (1991), para determinar o módulo de deslizamento de juntas mistas de madeira e concreto, pode levar a resultados não completamente representativos do comportamento real das ligações, particularmente no que se refere a juntas com comportamento não-linear pronunciado na fase inicial do ensaio, como é o caso das conexões realizadas com parafusos do tipo pino.

No ensaio realizado por Branco (2009), foi seguido o prescrito na EN 26891 (1991), no entanto, por razões técnicas, o procedimento de carga sugerido por essa norma não pôde ser seguido. Com os equipamentos disponíveis foi impossível ter períodos de 30 s com carga constante depois descarregar até 10% da estimativa inicial de carga máxima. Os períodos estacionários de carga foram removidos e uma descarga completa foi realizada como mostra a Figura 2.36.

Figura 2.36 - Procedimento de aplicação de carga no ensaio de cisalhamento



Fonte: Branco (2007).

Após os ensaios, Branco (2009) chegou às seguintes conclusões:

O comportamento de estruturas mistas de madeira e concreto é regulado pela rigidez da ligação entre a peça de madeira e a laje de concreto. O método de projeto, de acordo com o EUROCODE 5 para essas conexões, é baseado em coeficientes de modificação aplicados ao módulo de deslizamento semelhantes as conexões de madeira com madeira. Para a capacidade de suporte de cargas não é dado ou sugerido nenhum método simplificado, contrariamente às versões anteriores.

Com o objetivo de estudar a adequação da metodologia proposta no EUROCODE 5 para ligações mistas de madeira e concreto, usando a madeira Pinus Pinaster, os resultados dos testes experimentais foram comparados com os valores

obtidos seguindo o método do EC 5. Demonstrou-se que o modelo de escoamento europeu, utilizado no EC 5, é capaz de prever com confiabilidade o modo de falha da ligação. No entanto, os resultados dos testes mostram valores significativamente diferentes dos obtidos usando o procedimento definido no EUROCODE 5.

Os resultados experimentais obtidos mostram que uma melhor aproximação do comportamento mecânico pode ser alcançada se for levada em consideração uma formulação diferente para o módulo de deslizamento de ligações mistas de madeira e concreto.

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA CONSTRUTIVO MISTO CONCRETO E CLT

Pretende-se, nesse trabalho, além da proposição de um conector de aço para ligações de CLT, sugerir um sistema construtivo misto que utilize painéis de madeira laminada colada cruzada (CLT) e lajes de concreto armado pré-fabricado. Esse novo arranjo ampliará as possibilidades de uso do sistema CLT incluindo ligações com concreto pré-fabricado, ainda não estudado e experimentado em todo o mundo.

As vedações externas e internas das edificações serão em CLT e as lajes de piso e de forro em concreto pré-fabricado.

Verifica-se uma lacuna no desenvolvimento e na aplicação do CLT no Brasil. Não existem fábricas com tecnologia e produção suficiente para fazer frente às exigências do mercado. Acredita-se que esse trabalho possa trazer uma contribuição para discussão e assimilação dessa tecnologia de ponta e de grande potencial de uso, em nosso país.

O Sistema será limitado a atender edificações de até três pavimentos. Optamos por essa limitação por haver restrições legais urbanas em cidades brasileiras referentes à segurança contra incêndio. Edificações com até três pavimentos ficam isentas da exigência de escadas especiais e enclausuradas conforme Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais - CBMMG. IT-08/2017, por exemplo, em Belo Horizonte. Embora o sistema possa ser aplicado para edificações mais altas optamos por nos limitar para aquelas de até três pavimentos.

Pretende-se idealizar um sistema construtivo para utilização dos produtos em sinergia entre si, a fim de assegurar o máximo desempenho estrutural, térmico, acústico, de vedação as intempéries e de durabilidade. É apresentado a seguir o Sistema Construtivo.

3.1 Elementos constituintes do sistema

- a) Painéis CLT;
- b) Lajes de concreto armado pré-fabricadas;

c) Elementos de ligação.

a) Painéis de CLT:

São os elementos principais de vedação do sistema. São elaborados a partir de tábuas de pinho nórdico, *pinus sylvestris*, selecionadas e classificadas em função da sua dureza e fabricados com a mais avançada tecnologia. São montados com as aberturas de portas, janelas, detalhes especiais de fixação (furos, tampões, etc.), locais para passagem de instalações elétricas e hidráulicas, tudo em consonância com os projetos de arquitetura e estrutural. Após fabricação são transportados da fábrica para o canteiro e montados a seguir. As dimensões variam em função do fabricante. Geralmente são montados com um número ímpar de camadas de tábuas (de três a sete camadas). A espessura das tábuas pode variar de 16 mm a 51 mm e a largura de 60 mm a 240 mm. As larguras típicas dos painéis são 600 mm, 1200 mm, 2400 mm e 3000 mm. No comprimento é possível fabricá-los com até 18000 mm. As limitações das dimensões fabricadas são em função do transporte e montagem na obra.

Figura 3.1 - Painéis CLT - LENO - MetsäWood



Fonte: Jular Madeiras (2012).

Figura 3.2 - Montagem de Painéis CLT - LENO



Fonte: Jular Madeiras (2012).

b) Lajes de concreto armada pré-fabricadas:

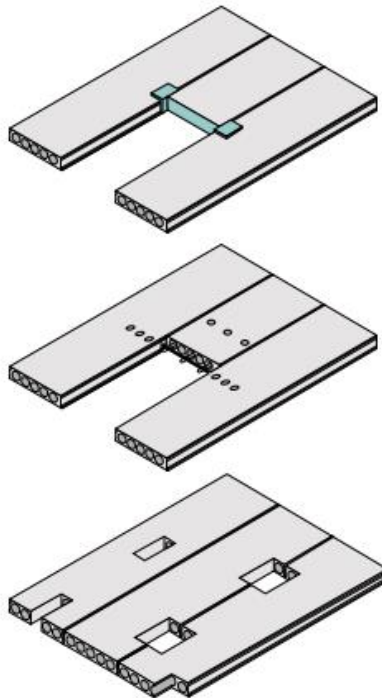
Serão fabricadas a partir das mais avançadas técnicas disponíveis no país e com as seguintes dimensões: Largura 800 mm, comprimento 4000 mm e espessura 120 mm. Poderão ser alveolares protendidas, alveolares armadas, ou maciças armadas. As lajes pré-fabricadas por extrusão apresentam alta resistência e grande durabilidade devido ao moderno processo produtivo gerar um alto grau de compactação do concreto. O sistema construtivo permitirá agilidade na execução da estrutura e maior controle dimensional e estrutural.

Figura 3.3 - Laje pré-fabricada alveolar, içada na obra



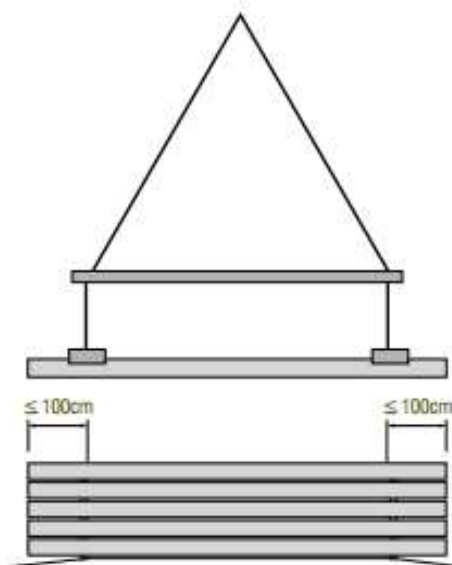
Fonte: Cassol Pré-fabricados (2015).

Figura 3.4 - Possibilidades de arranjos e montagem das lajes



Fonte: Cassol Pré-fabricados (2015).

Figura 3.5 - Sistema de montagem da laje com garras e cabos para içamento



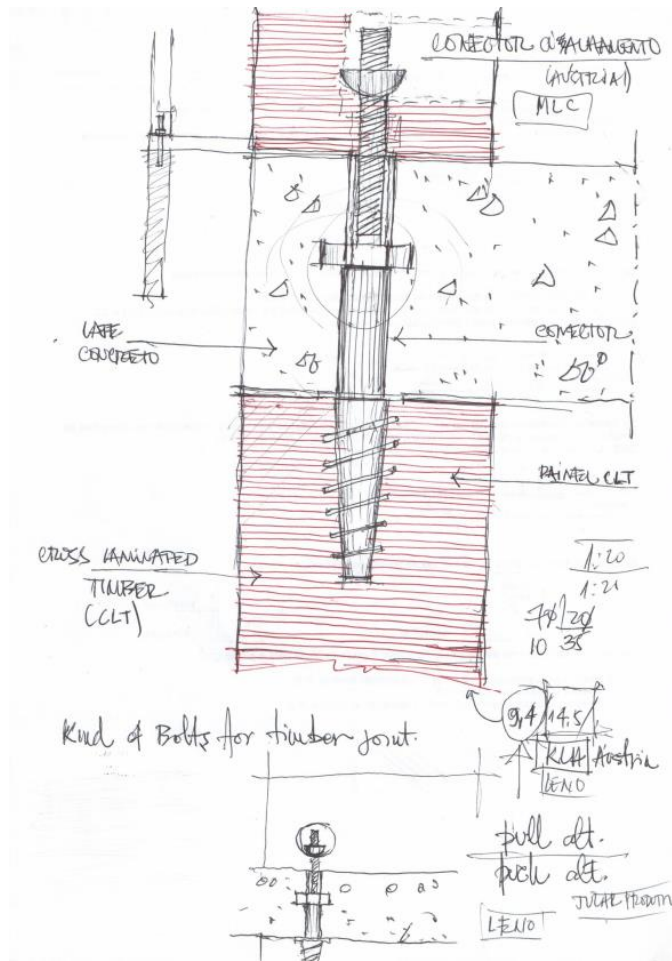
Fonte: Cassol Pré-fabricados (2015).

c) Elementos de ligação:

Em estruturas de madeira ou estruturas mistas de madeira e concreto ou madeira e aço, quando não se tem projeto, as articulações e ligações representam, com frequência, os pontos de menor resistência. Uma concepção inadequada é responsável por muitas patologias e o seu comportamento mecânico, nomeadamente a sua rigidez, desempenha um papel crucial na distribuição das tensões na estrutura. Os conectores de chapa dobrada, como os mostrados no capítulo 2.3 desse trabalho, são bastante eficazes nas ligações de madeira com madeira, mas nas ligações que envolvem concreto armado, apresentam algumas restrições no que tange à fixação com buchas e furação do concreto armado, como já foi dito anteriormente.

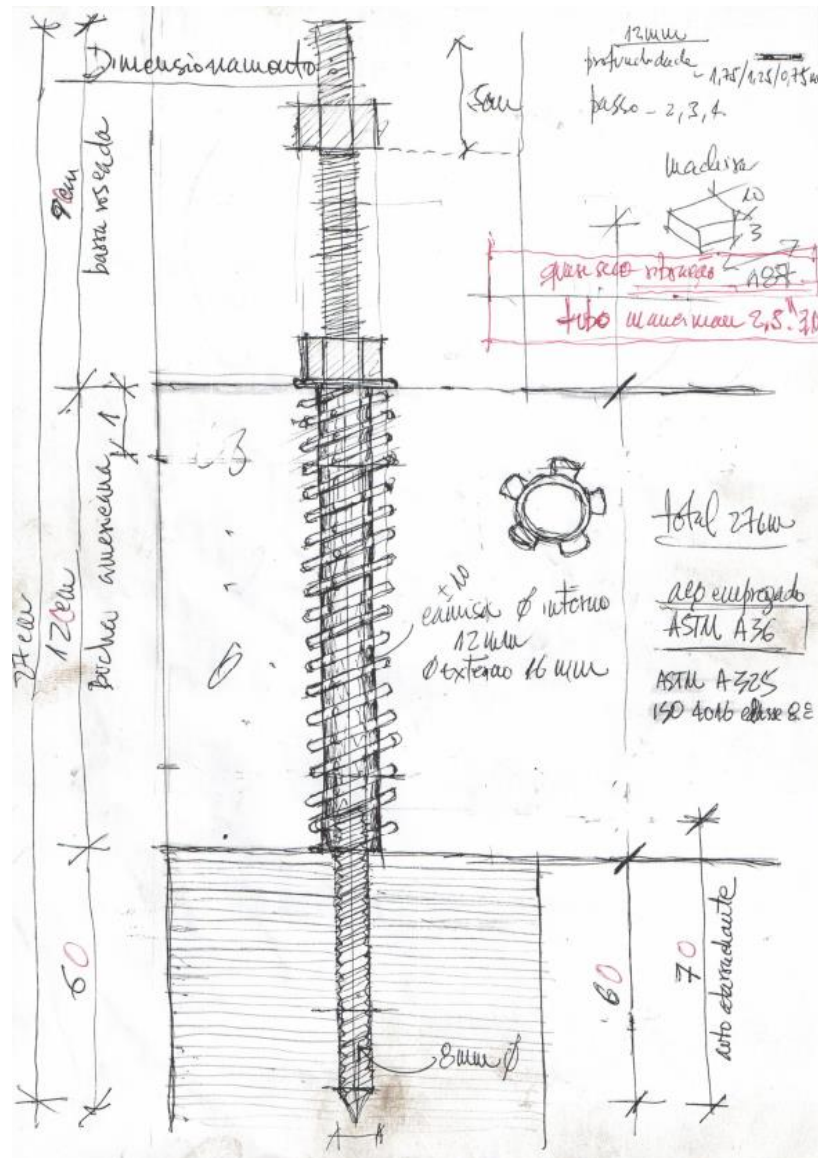
Nesse trabalho, buscou-se realizar estudos no sentido de se chegar a um conector de desenho simples e adequado ao uso no sistema construtivo proposto. Alguns desses estudos são mostrados nas Figuras 3.6 a 3.10.

Figura 3.6 - Estudos para conector



Fonte: Do autor.

Figura 3.7 - Estudos para conector

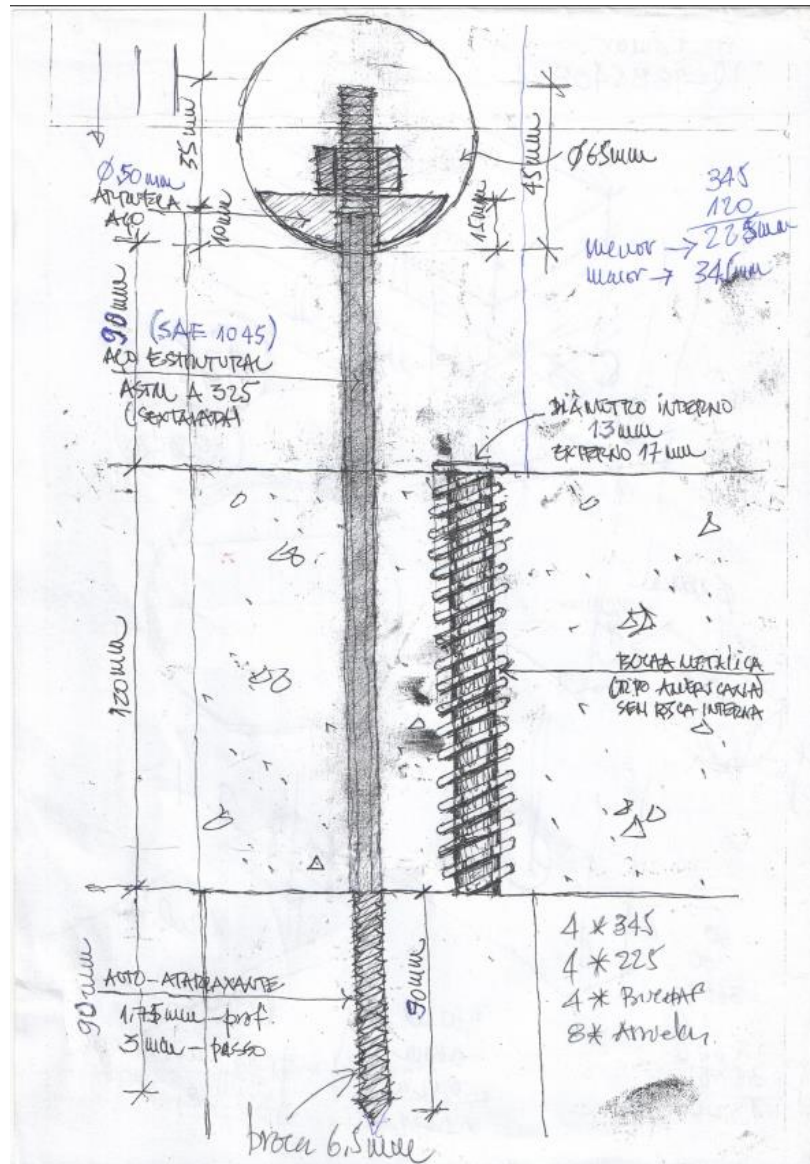


Fonte: Do autor.

Com base nesses estudos, a adequabilidade a múltiplas aplicações, a forma, a facilidade de fixação, o material, dentre outros parâmetros considerados, optou-se primeiramente, por um modelo que apresentasse uma das extremidades auto-atarraxante, para fixação no painel inferior, e a outra extremidade roscada com o uso de arruela com seção cilíndrica e porca sextavada, para fixação no painel superior, como mostra a Figura 3.7. A fim de propiciar uma junção rígida dos painéis com a laje de concreto, de forma a evitar as perdas da força de tração no momento da fixação,

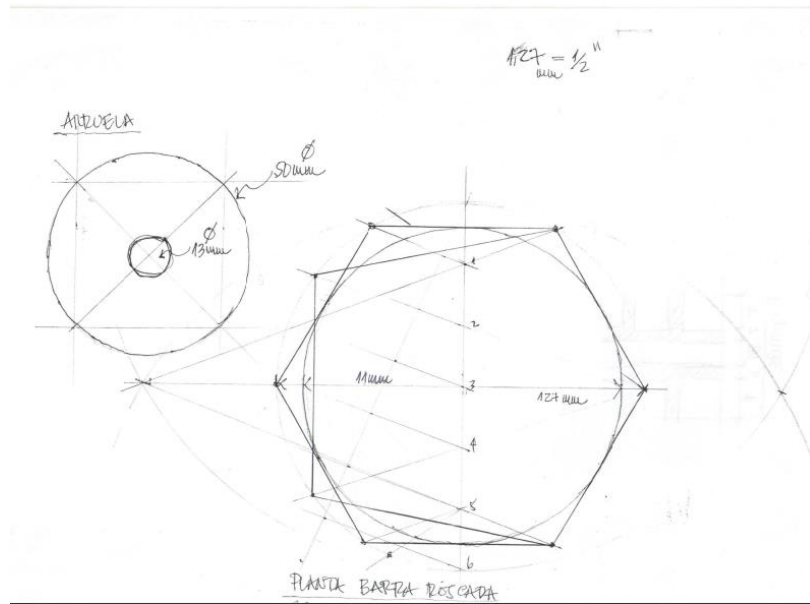
foram projetadas e fabricadas buchas metálicas que serão fixadas na laje no momento da concretagem como mostra a Figura 3.8.

Figura 3.8 - Estudos para conector



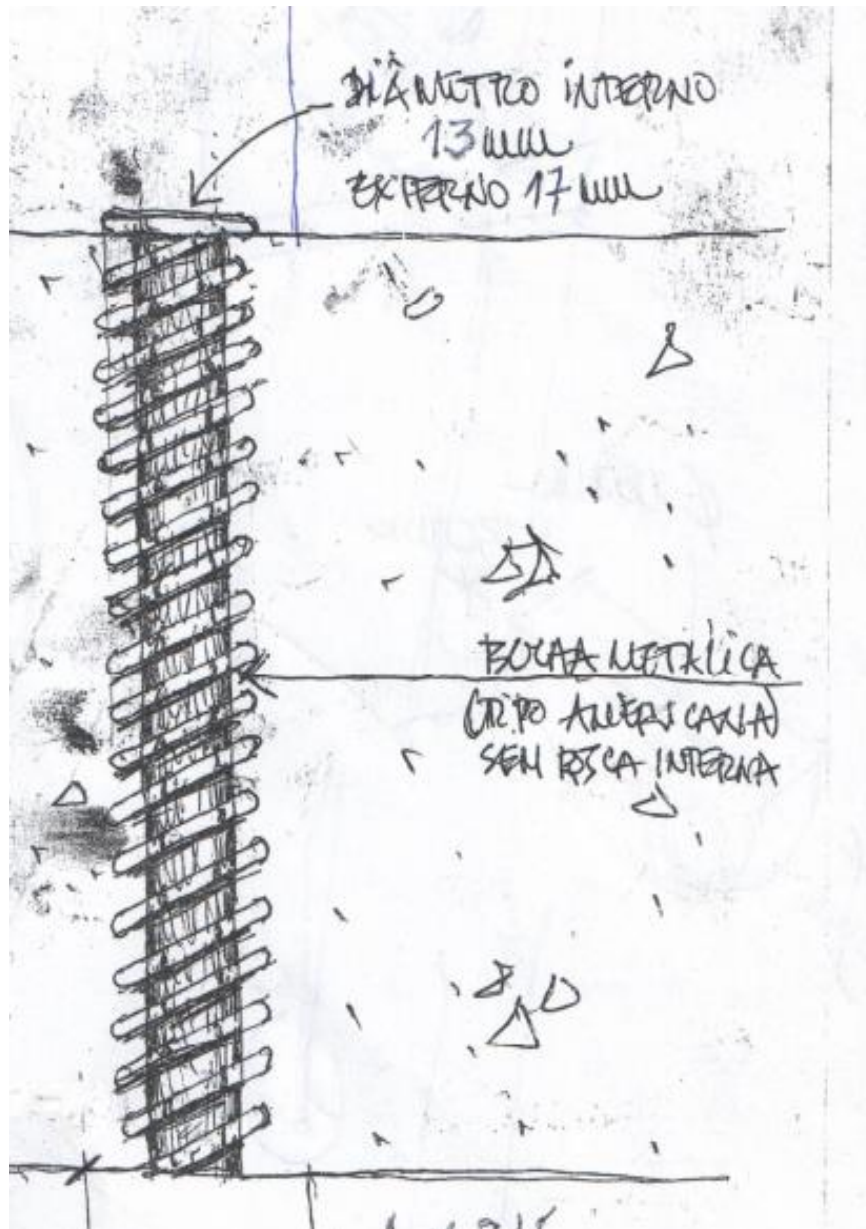
Fonte: Do autor.

Figura 3.9 - Estudos para conector em aço sextavado



Fonte: Do autor.

Figura 3.10 - Estudos para conector



Fonte: Do autor.

Foram projetados, também, pinos guia para fixação e manutenção da bucha na posição final durante o processo de concretagem da laje, como será mostrado mais adiante.

Todos os elementos de ligação serão fabricados em aço SAE 1045, a partir de barras sextavadas de 1/2 polegada, com diâmetros de rosca de 10mm, para ligação dos painéis com painéis e painéis com a laje de concreto.

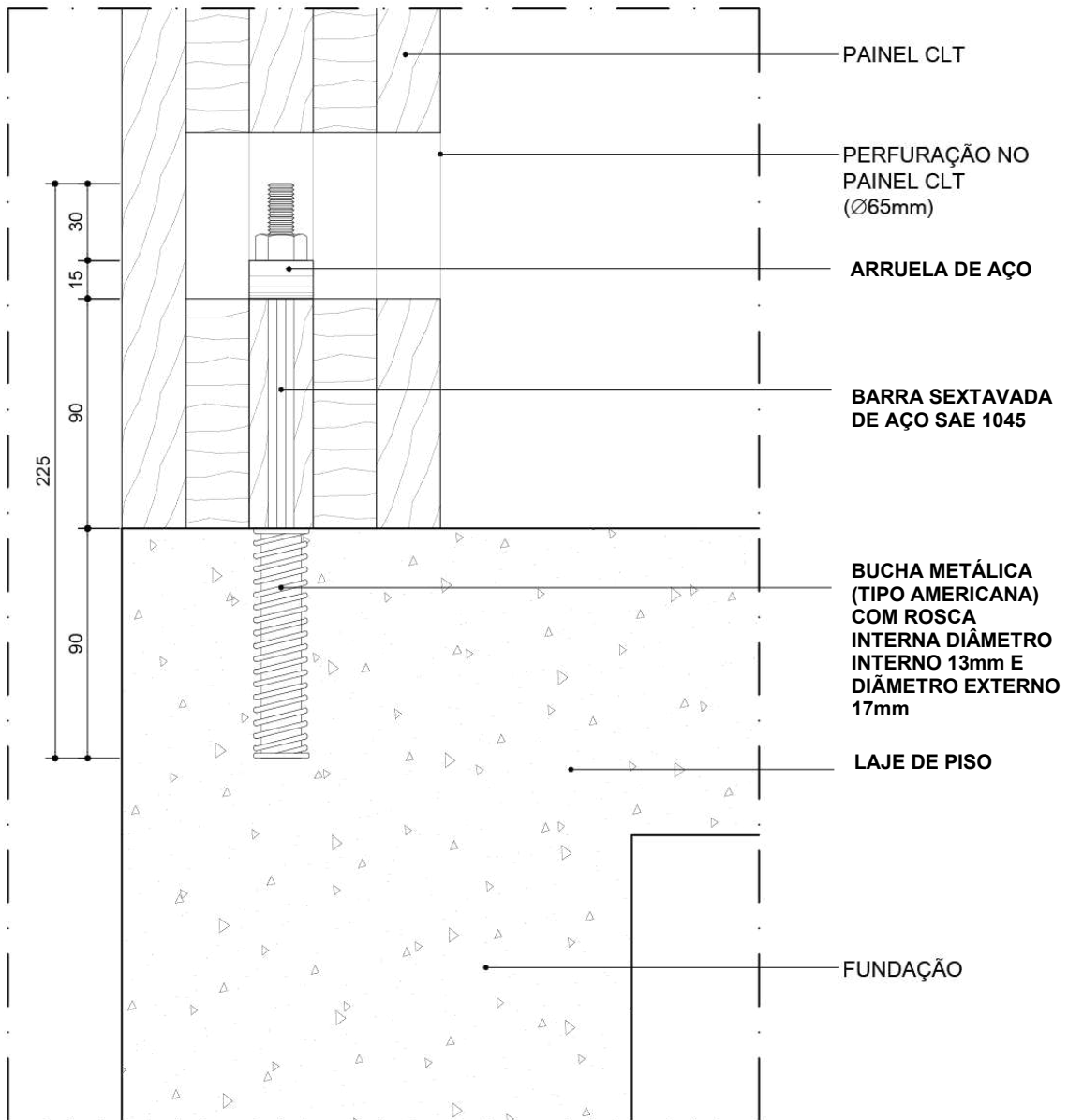
3.1.1 Conexão com as bases de concreto (fundações)

Na ancoragem dos painéis de CLT com as bases de concreto da edificação deverão ser adotados os procedimentos adequados de montagem com a utilização de equipamento de elevação e transporte dos painéis.

A base de concreto deverá ser preparada para receber a bucha com rosca interna, na posição de ancoragem, antes da concretagem.

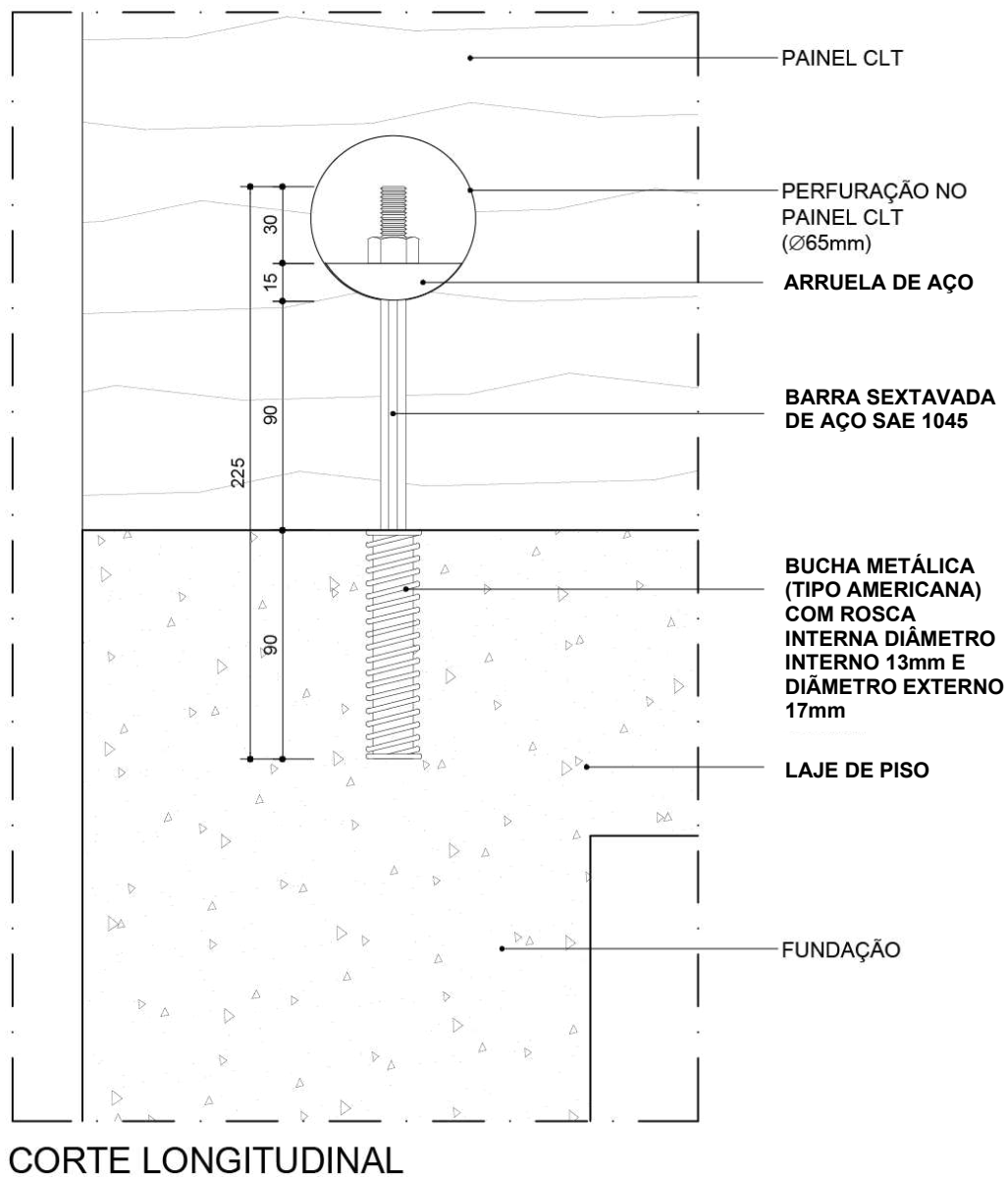
Serão utilizados conectores e bucha com rosca interna conforme mostram as figuras 3.11 e 3.12. Os painéis deverão ser perfurados para a colocação dos conectores e para acesso a porca de fixação como mostrado na figura 3.13.

O furo para passagem do conector no painel superior deverá ser oblongo para permitir ajustes na montagem do painel. Após montagem, esse furo deverá ser preenchido com resina epóxi.

Figura 3.11 - Corte transversal da ligação do conector 1 com a base de concreto**CORTE TRANSVERSAL**

Fonte: Do autor.

Figura 3.12 - Corte longitudinal da ligação do conector com a base de concreto

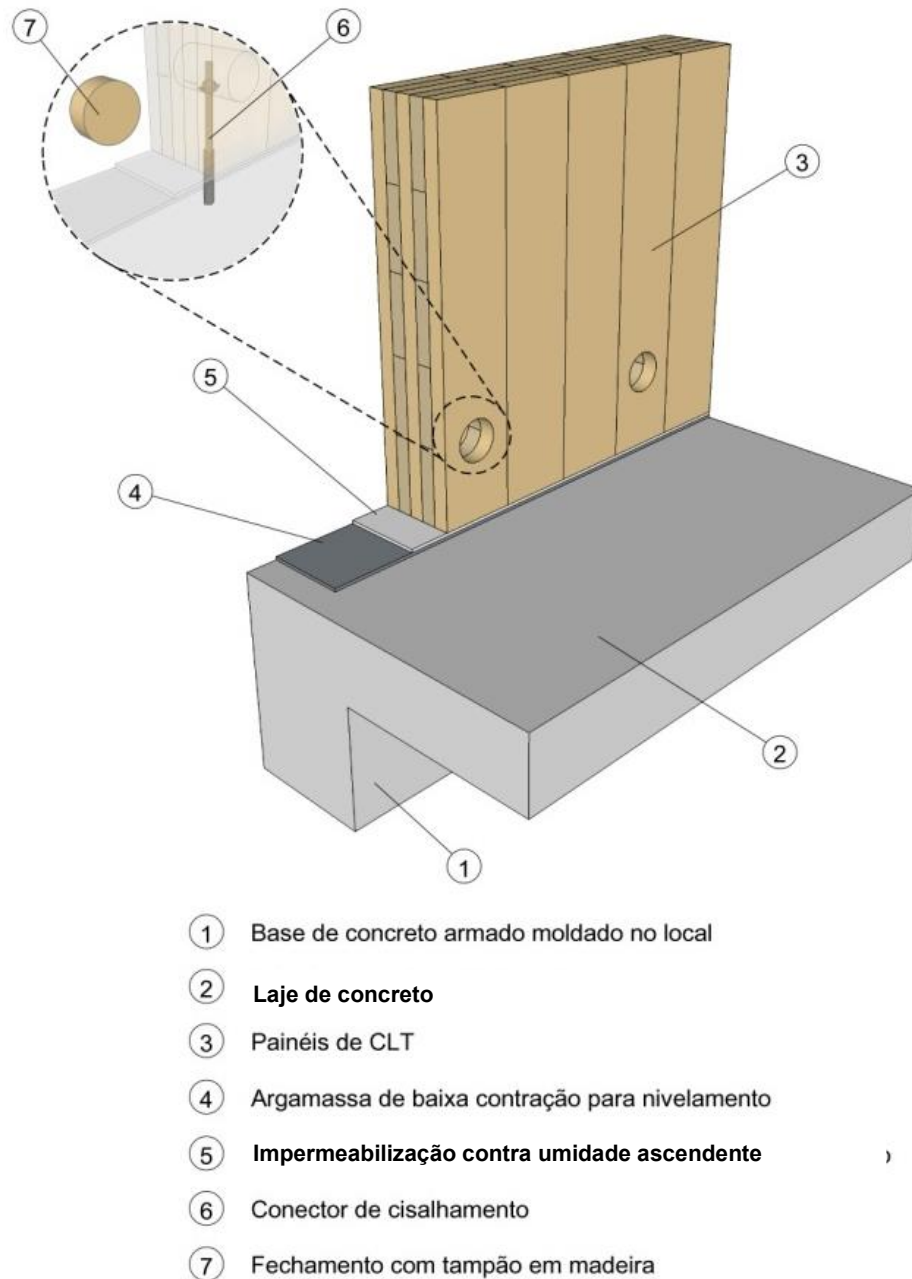


Fonte: Do autor.

Os procedimentos de montagem são os seguintes:

- 1º- Fixação do conector na base de concreto;
- 2º- Colocação e ajuste do painel superior na posição final;
- 3º- Enchimento do furo oblongo do painel com resina epóxi;
- 4º- Colocação da arruela e porca de fixação;
- 5º- Aperto da porca;
- 6º- Fixação do tampão de madeira.

Figura 3.13 - Modelo da ligação dos painéis com a base de concreto



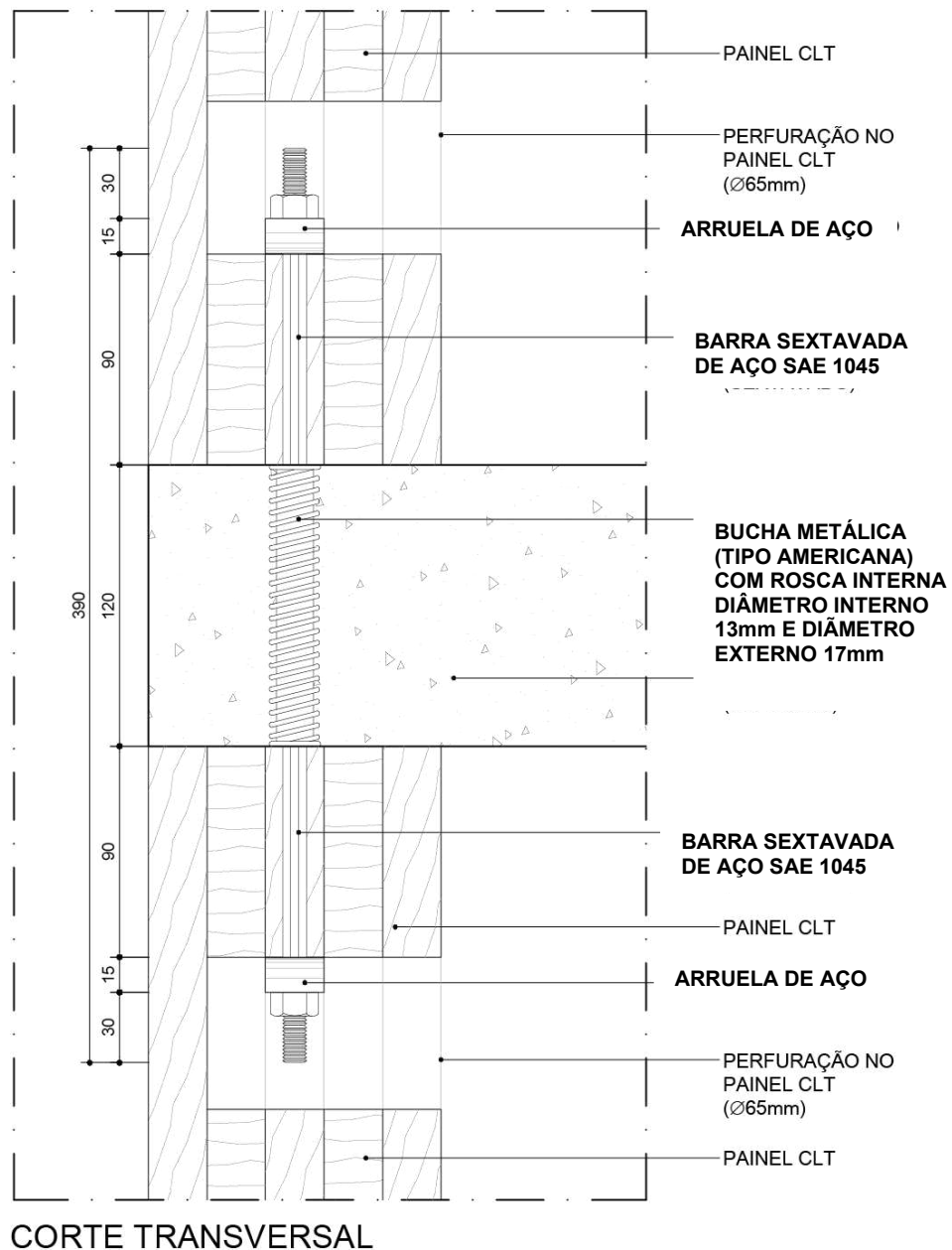
Fonte: Do autor.

3.1.2 Conexão dos painéis com lajes de concreto armado pré-fabricado

Essas ligações serão efetivadas por meio de conectores com bucha sem rosca interna. Os painéis serão preparados para fixação na fábrica e as buchas posicionadas na laje de acordo com o projeto antes da concretagem. Os painéis serão perfurados para a colocação dos conectores e para instalação e giro da porca de

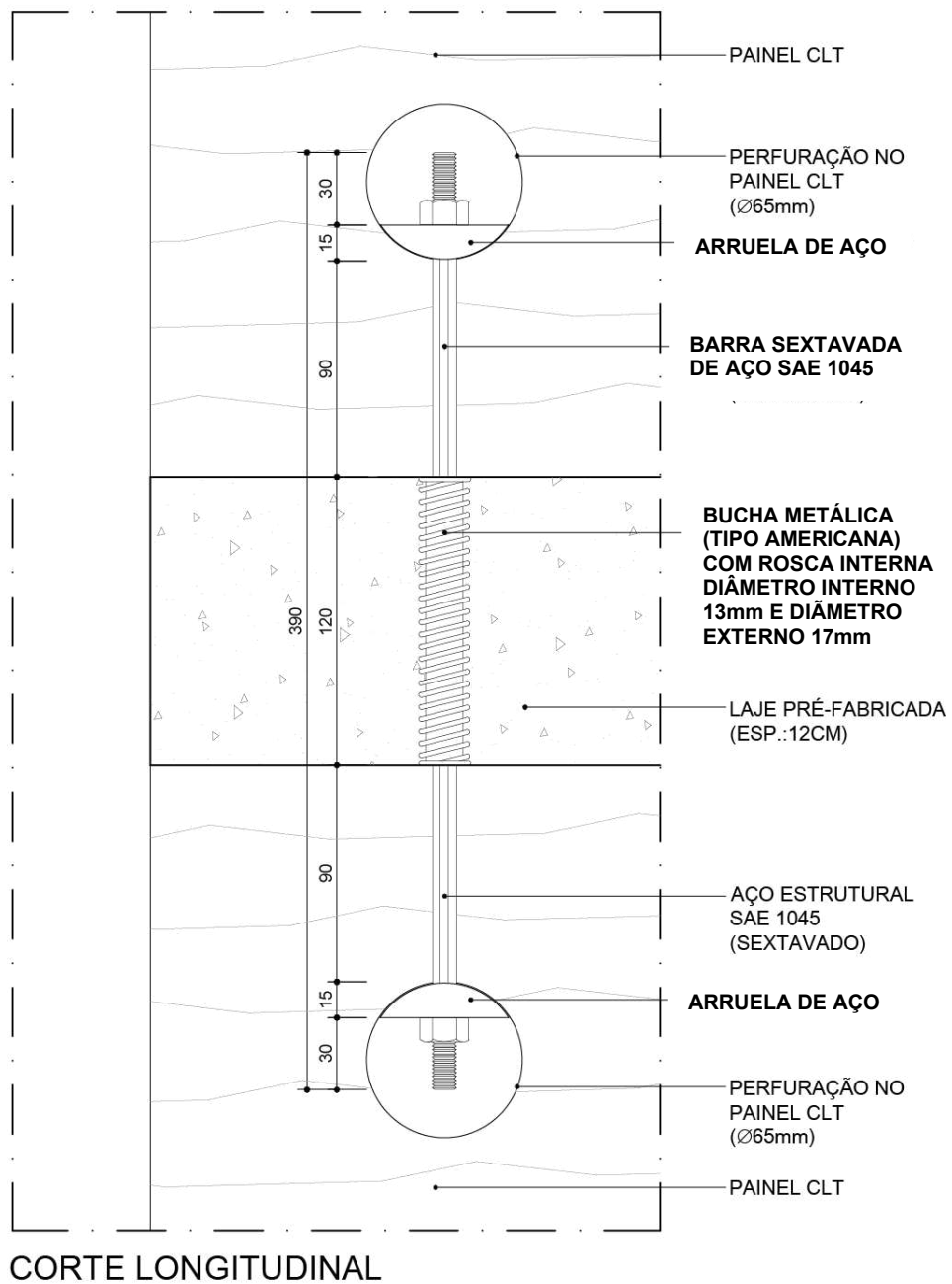
fixação como mostrado nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16. Os furos para passagem do conector no painel superior e inferior deverão ser oblongos para permitir ajustes na montagem dos painéis. Após montagem, esse furo deverá ser preenchido com resina epóxi.

Figura 3.14 - Corte transversal da ligação dos painéis com a laje de concreto



Fonte: Do autor.

Figura 3.15 - Corte longitudinal da ligação dos painéis com a laje de concreto



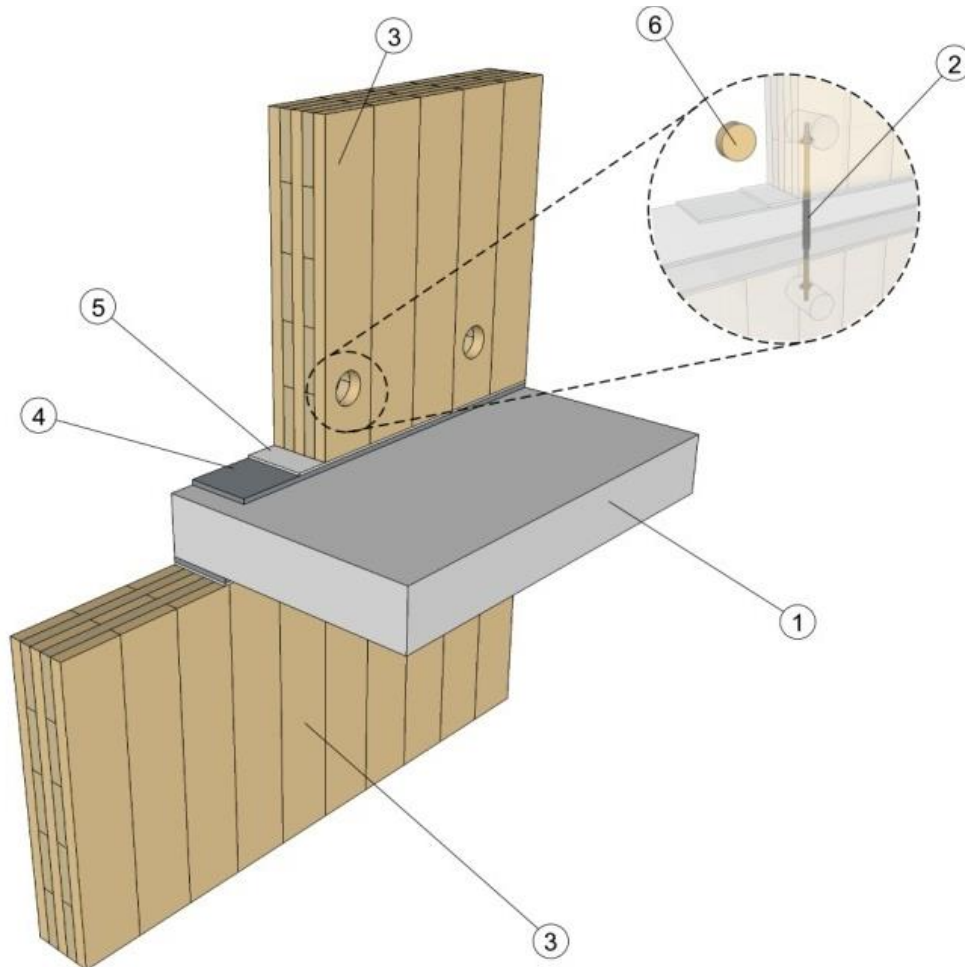
Fonte: Do autor.

Os procedimentos de montagem são os seguintes:

- 1º- Fixação do conector no painel inferior;
- 2º- Colocação da laje na posição de ancoragem;
- 3º- Enchimento da bucha com resina epóxi;

- 4º- Colocação e ajuste do painel superior na posição final;
- 5º- Enchimento do furo oblongo com resina epóxi;
- 6º- Colocação da arruela e porca de fixação;
- 7º- Aperto das porcas nas extremidades inferior e superior do conector;
- 8º- Fixação do tampão de madeira.

Figura 3.16 - Modelo da ligação dos painéis com a laje de concreto



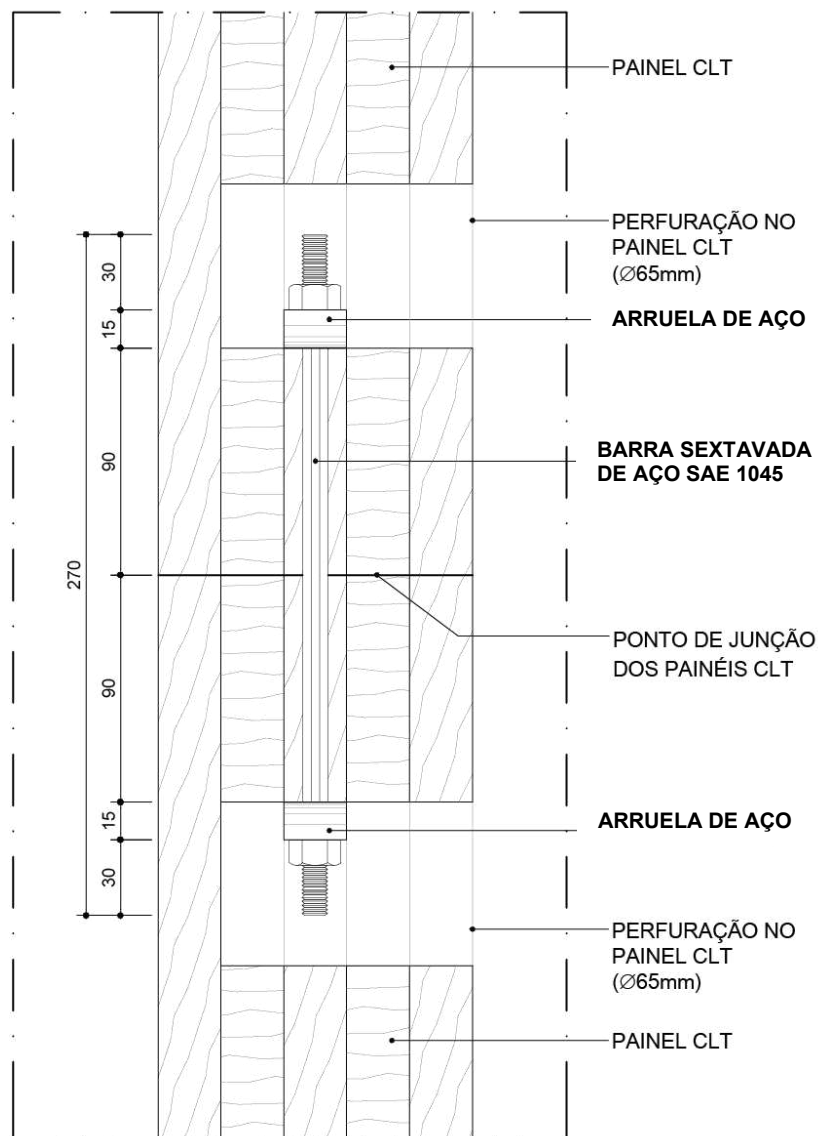
- ① Laje de concreto pré-fabricada
- ② Conector de cisalhamento
- ③ Painéis de CLT
- ④ Argamassa de baixa contração para nivelamento
- ⑤ Impermeabilização contra umidade ascendente
- ⑥ Fechamento com tampão em madeira

Fonte: Do autor.

3.1.3 Conexão de painéis CLT/CLT

Essas ligações serão efetivadas por meio de conectores sem a utilização de buchas. Os painéis deverão ser preparados para fixação na fábrica, devendo ser perfurados para a colocação dos conectores e para instalação e giro da porca de fixação como mostram as Figuras 3.17, 3.18 e 3.19. O furo para passagem do conector nos painéis deverá ser oblongo para permitir ajustes na montagem. Após montagem, esse furo deverá ser preenchido com resina epóxi.

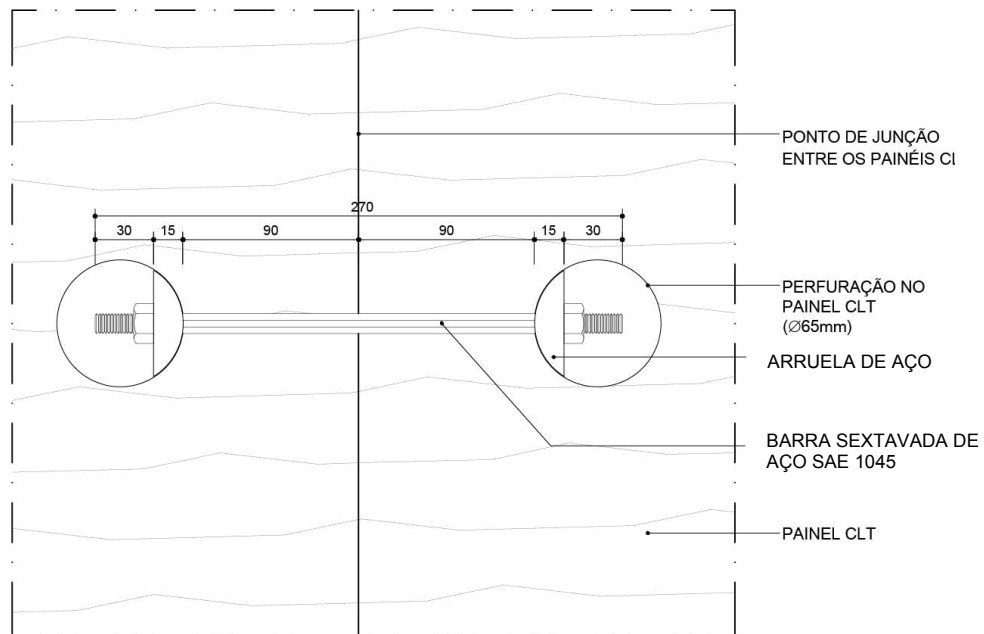
Figura 3.17 - Corte transversal da ligação de painel CLT com painel CLT



CORTE TRANSVERSAL

Fonte: Do autor.

Figura 3.18 - Corte longitudinal da ligação de painel CLT com painel CLT



CORTE LONGITUDINAL

Fonte: Do autor.

Os procedimentos de montagem são os seguintes:

- 1º- Fixação do conector no 1º painel;
- 2º- Colocação e ajuste do 2º painel na posição final;
- 5º- Enchimento do furo oblongo com resina epóxi;
- 6º- Colocação das arruelas e porcas de fixação;
- 7º- Aperto das porcas nas duas extremidades do conector;
- 5º- Fixação dos tampões de madeira.

Nas ligações de painéis CLT com painéis CLT, poderão ocorrer três tipos de conexão, a saber:

- a) Conexão de topo;
- b) Conexão em T;

c) Conexão de Canto.

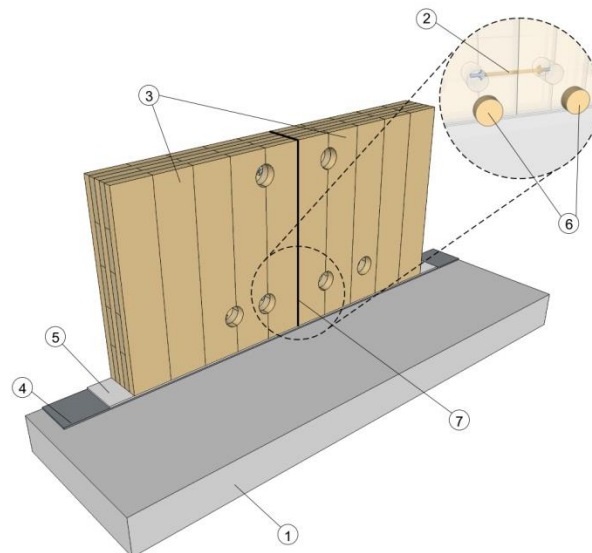
Em seguida, são apresentados os subsistemas de paredes e pisos que podem ser obtidos com as conexões aqui desenvolvidas.

a) Conexão de Topo:

São utilizados os conectores do tipo 2, menores, sem bucha. A fixação obedecerá os seguintes procedimentos:

- 1º- Montagem do primeiro painel na posição;
- 2º- Fixação do conector no primeiro painel;
- 3º- Montagem do segundo painel na posição;
- 4º- Colocação das arruelas e porcas de fixação;
- 5º- Aperto das porcas nas duas extremidades do conector;
- 5º- Fixação dos tampões de madeira.

Figura 3.19 - Modelo da conexão entre painéis de topo



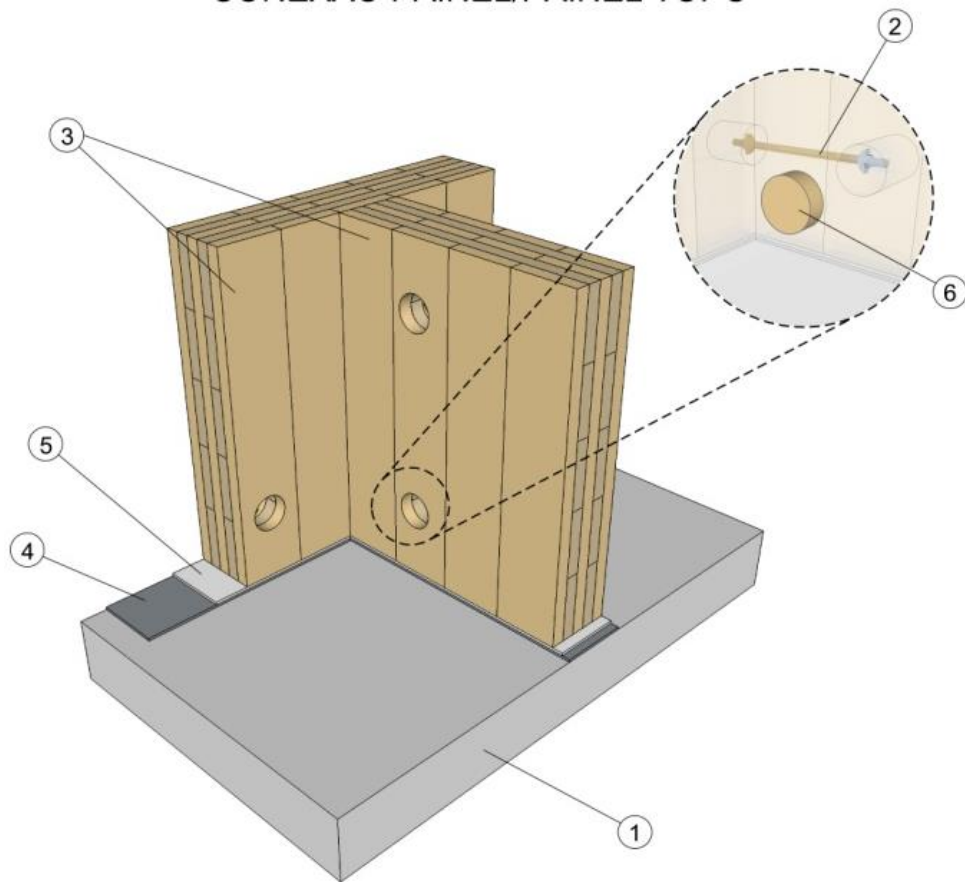
- ① Laje de concreto pré-fabricada
- ② Conector de cisalhamento
- ③ Painéis de CLT
- ④ Argamassa de baixa contração para nivelamento
- ⑤ Impermeabilização contra umidade ascendente
- ⑥ Fechamento com tampão em madeira
- ⑦ Ponto de junção entre painéis

Fonte: Do autor.

b) Conexão em T:

Da mesma forma e procedimentos que os utilizados na conexão de topo. A diferença se dará na furação dos painéis na fábrica que deverão obedecer o posicionamento dos furos previstos no projeto de montagem e execução. O painel passante receberá a furação na face externa. Serão utilizados os conectores do tipo 2, sem bucha.

Figura 3.20 - Conexão dos painéis em T



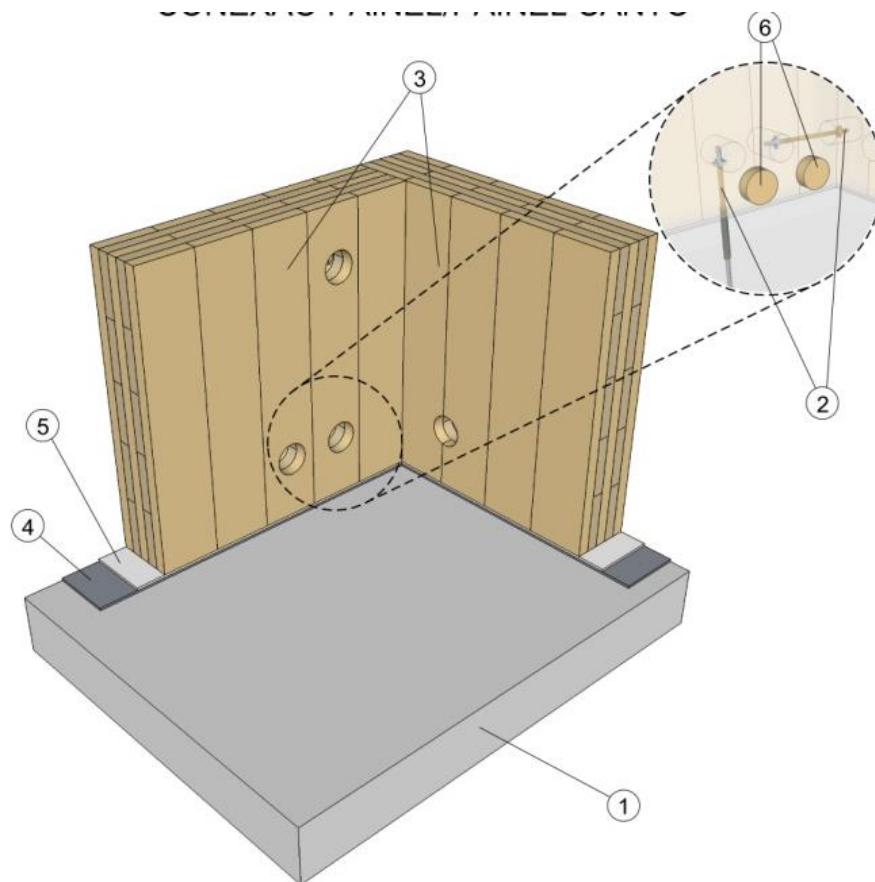
- ① Laje de concreto pré-fabricada
- ② Conector de cisalhamento
- ③ Painéis de CLT
- ④ Argamassa de baixa contração para nivelamento
- ⑤ **Impermeabilização contra umidade ascendente**
- ⑥ Fechamento com tampão em madeira

Fonte: Do autor.

d) Conexão de Canto:

Da mesma forma e procedimentos que os utilizados na conexão de topo. A diferença, assim como na conexão em T, se dará na furação dos painéis na fábrica que deverão obedecer o posicionamento dos furos previstos no projeto de montagem e execução. O painel passante receberá a furação na face externa. Serão utilizados os conectores do tipo 2, sem bucha. A fixação obedecerá os mesmos procedimentos.

Figura 3.21- Conexão dos painéis de canto



- ① Laje de concreto pré-fabricada
- ② Conector de cisalhamento
- ③ Painéis de CLT
- ④ Argamassa de baixa contração para nivelamento
- ⑤ **Impermeabilização contra umidade ascendente**
- ⑥ Fechamento com tampão em madeira

Fonte: Do autor.

3.1.4 Conexão com a laje de cobertura

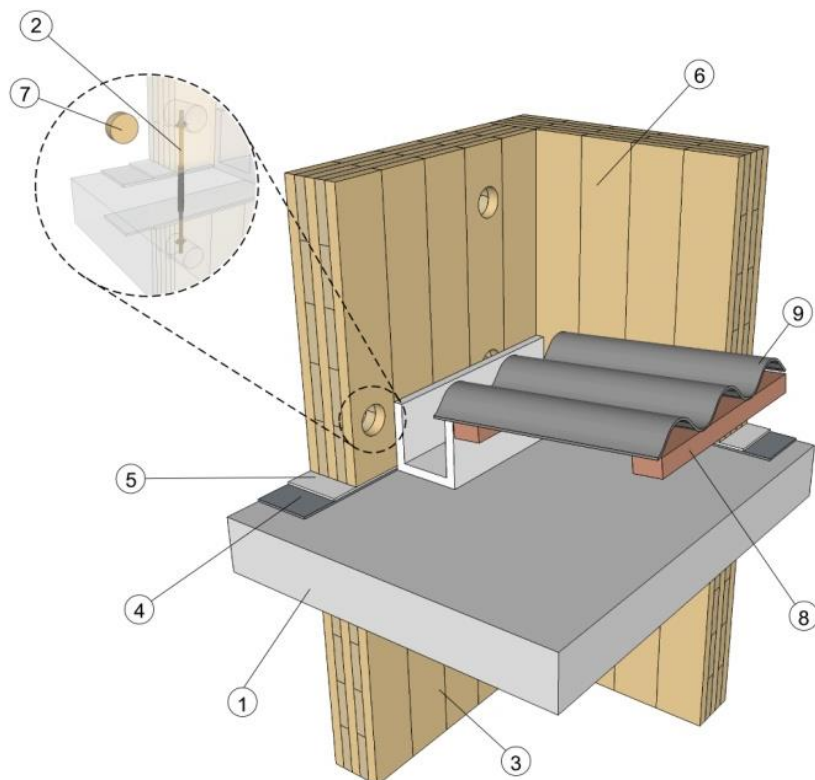
As conexões com a laje de cobertura poderão ocorrer de duas formas, dependendo da solução do projeto de arquitetura:

- a) Com platibanda;
- b) Sem platibanda.

a) Com platibanda:

Essas ligações, da mesma maneira que a ligação de painéis com as lajes de piso, serão efetivadas através de conectores com bucha sem rosca interna. Os painéis serão preparados para fixação na fábrica e as buchas posicionadas na laje de acordo com o projeto, antes da concretagem. Os painéis serão perfurados para a colocação dos conectores e para a instalação e giro da porca de fixação como mostrado na Figura 3.22. Os furos para passagem do conector nos painéis superior e inferior deverão ser oblongos para permitir ajustes na montagem dos painéis. Após montagem, esses furos deverão ser preenchidos com resina epóxi.

Figura 3.22 - Conexão com a laje de cobertura com platibanda



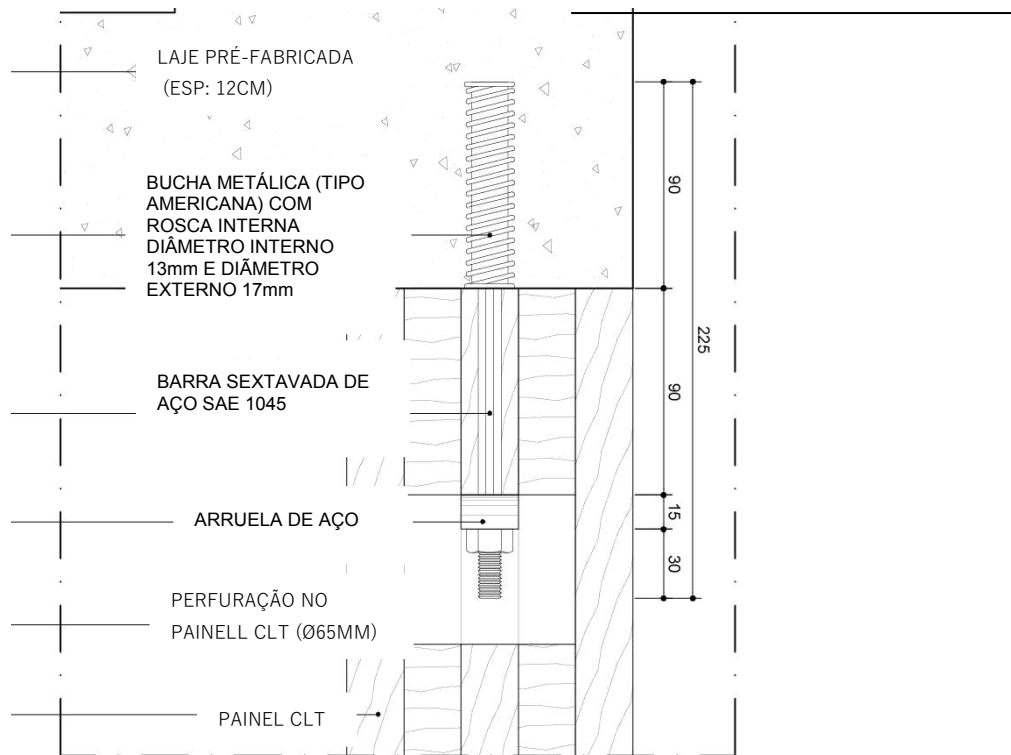
- | | |
|--|------------------------------------|
| ① Laje de concreto pré-fabricada | ⑥ Painéis de CLT na platibanda |
| ② Conector de cisalhamento | ⑦ Fechamento com tampão em madeira |
| ③ Painéis de CLT | ⑧ Ripa em madeira |
| ④ Argamassa de baixa contração para nivelamento | ⑨ Telha ondulada a escolher |
| ⑤ Impermeabilização contra umidade ascendente | |

Fonte: Do autor.

b) Sem platibanda:

Serão adotados os mesmos procedimentos que os da a conexão com as bases de concreto. Serão utilizados conectores com bucha de rosca interna conforme mostram as Figuras 3.23 e 3.24. Os painéis deverão ser perfurados para a colocação dos conectores e para acesso à porca de fixação como mostrado na Figura 3.23. O furo para passagem do conector no painel superior deverá ser oblongo para permitir ajustes na montagem do painel. Após montagem, esse furo deverá ser preenchido com resina epóxi.

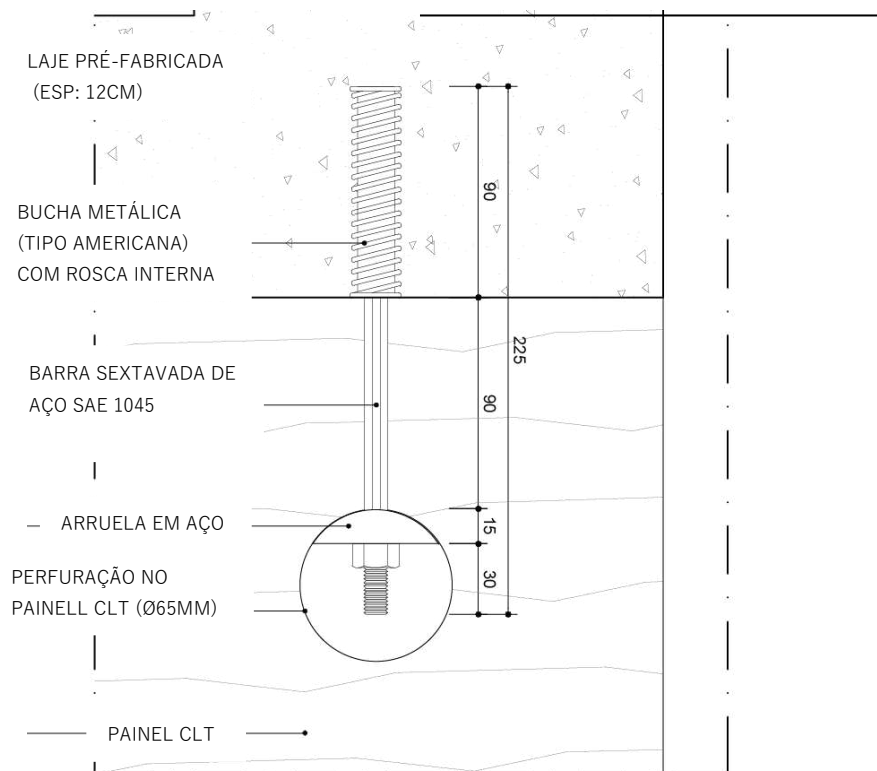
Figura 3.23 - Conexão com a laje de cobertura sem platibanda



CORTE TRANSVERSAL

Fonte: Do autor.

Figura 3.24 - Conexão com a laje de cobertura sem platibanda



CORTE LONGITUDINAL

Fonte: Do autor.

4 CAMPANHA EXPERIMENTAL PRELIMINAR

Na presente pesquisa, foi realizado um estudo teórico-experimental que tem como objetivo avaliar o comportamento da ligação entre painéis de CLT e laje de concreto e entre painéis CLT com CLT, através de conector de cisalhamento, constituído por barra de aço roscada, anel de aço, porcas e arruelas, que será apresentado mais adiante nesse capítulo.

Num primeiro momento, campanha experimental preliminar (CEP), avaliou-se a metodologia a ser adotada através de pré-ensaios com protótipos fabricados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas da UFMG. A parte experimental incluiu uma série de ensaios de compressão e arrancamento, nos quais foram avaliadas a resistência dos conectores isolados, dos conectores nas ligações entre painéis e laje, a umidade, densidade, retração e resistência à compressão da madeira utilizada e as forças atuantes no conector.

Num segundo momento, campanha experimental final (CEF), a partir de elementos industriais, ou seja, de produtos fabricados pela indústria no país, verificou-se a eficiência e performance da ligação utilizando-se de painéis CLT fabricados pela CROSSLAM, lajes pré-fabricadas fabricadas pela PRECON e conectores fabricados pela CISER. Todas elas empresas de tradição e reconhecidas no âmbito da construção civil no país.

4.1 Materiais e confecção de modelos (protótipos)

Para execução dos pré-ensaios de verificação da solução proposta, foram fabricados protótipos no *Laboratório de Análise Experimental de Estruturas* (LAEES) e no *Centro Avançado de Pesquisa da Madeira, Móveis e Novos Materiais* (CEPAM³). Foram fabricados dois painéis de CLT utilizando tábuas de eucalipto da espécie "EucaliptusGrandis", duas lajes de concreto armado, oito conectores de aço SAE 1045, quatro buchas para inserção no concreto e oito arruelas especiais.

A classificação visual da madeira utilizada foi feita a partir de um lote de "EucaliptusGrandis" disponível no CEPAM³, já anteriormente seco em estufa.

Foram fabricadas duas lajes de concreto, com dimensões de 600x600x120mm. O traço de concreto adotado foi: 1: 2,06: 2,43, com fator de água/concreto = 0,62, sendo utilizados:

- a) Cimento CPV HOLCIM ARI PLUS: 48,61 kg;
- b) Areia Natural Grossa: 100,26 kg;
- c) Brita 0 (zero): 118,32 kg;
- d) Água: 30 litros.

Os conectores foram projetados em aço SAE 1045, a partir de barras sextavadas de 1/2 polegada, com diâmetros de rosca de 10mm, para ligação dos painéis com painéis e painéis com a laje de concreto.

4.1.1 Fabricação do painel de madeira laminada colada cruzada

Foram fabricados dois painéis de madeira laminada colada cruzada com dimensões finais de 600x600x125 mm, em conformidade com o que se descreve a seguir.

4.1.1.1 Seleção das peças

A classificação da madeira utilizada foi feita visualmente a partir de um lote de 'EucaliptusGrandis" disponível no CEPAM³, já anteriormente seco em estufa. Foram observados os defeitos que afetariam a resistência e a rigidez das peças, no que se refere à presença de nós, rachaduras, colorações ou manchas, bolsas de resina, furos de insetos, empenamento e quina morta ou esmoado.

As peças foram selecionadas e preparadas tendo como referência madeiras sem defeitos, Figura 4.1 e 4.2.

Figura 4.1 - Lote de "EucaliptusGrandis"**Figura 4.2 - Peças nas dimensões finais**

Fonte: Do autor.

4.1.1.2 Detalhes de fabricação

Para confecção do painel CLT, foi fabricado um quadro suporte de madeira (gabarito), desmontável, mostrado na Figura 4.3, que acomodasse, lado a lado, sete peças (lâminas) por camada, perfazendo 5 camadas, Figuras 4.4. A função desse quadro é não permitir que as tábuas deslizassem entre si no momento de aplicação da força para colagem. Os painéis, após a pré-montagem, ficaram com dimensões finais de 600mm x 600mm x 125 mm, conforme mostram as Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.3 - Quadro Suporte (gabarito)**Figura 4.4 - Pré-montagem das peças**

Fonte: Do autor.

Para colagem das peças utilizou-se, em ambas as faces de colagem, o adesivo CASCOPHEN RS-216-M que, de acordo com informações da empresa fabricante, é um produto que já foi utilizado em várias pesquisas em instituições nacionais com bons resultados na fabricação de madeira laminada colada. Por se tratar de uma resina sintética, à base de Resorcinol-Formol, em solução álcool/água, apresenta

excelentes resultados para colagens resistentes à água fria ou fervente e a muitos solventes orgânicos, fungos e mofo, ao calor seco ou úmido. É especialmente indicada para os casos em que a colagem deverá ficar exposta temporária ou definitivamente à ação de intempéries. O produto CASCOPHEN RS-216-M (líquido) é usado em conjunto com o Catalisador FM-316-M (em pó).

Figura 4.5 - Painel CLT acabado

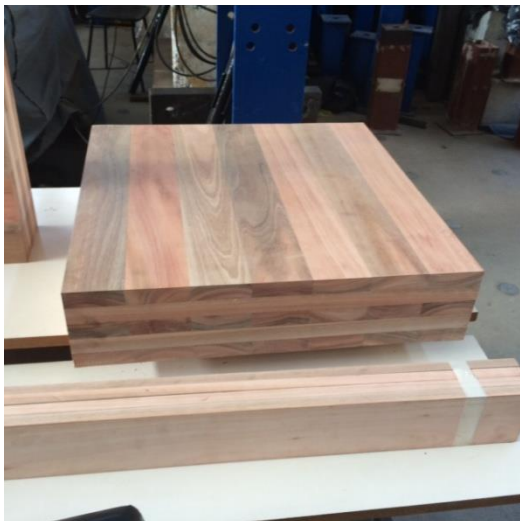
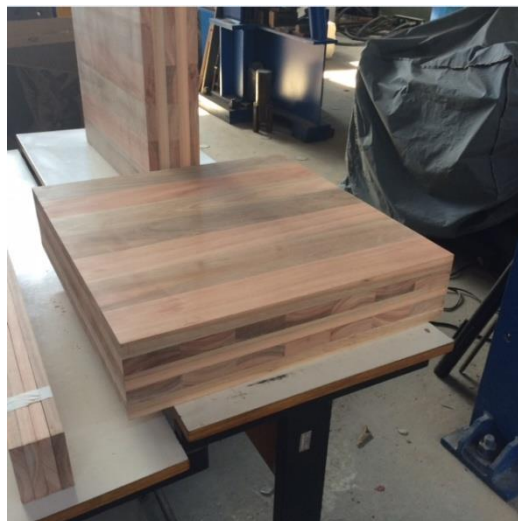


Figura 4.6- Painel CLT acabado



Fonte: Do autor.

Após montagem e colagem, o painel, já colocado entre as duas placas metálicas, foi submetido a uma força de 300 KN para prensagem, ao longo de 18 horas para cura. A força foi aplicada em etapas, cada etapa com um valor de 100 KN e intervalos de 3 minutos entre eles. A força foi aplicada por meio de um atuador hidráulico, marca Enerpac, com capacidade de 500 KN, instalado em um pórtico de reação fixo à placa de reação do LAEES. Para a leitura da força aplicada, foi utilizado um anel dinamométrico com capacidade de 500 KN, munido de um relógio comparador com precisão de 0,44 KN. O processo é mostrado nas Figuras 4.7 a 4.12.

Figura 4.7 – Painel em fase de montagem



Fonte: Do autor.

Figura 4.8 – Painel em fase de montagem



Figura 4.9- Painel pronto para prensagem



Fonte: Do autor.

Figura 4.10- Colocação da chapa superior



Figura 4.11 - Prensagem do painel



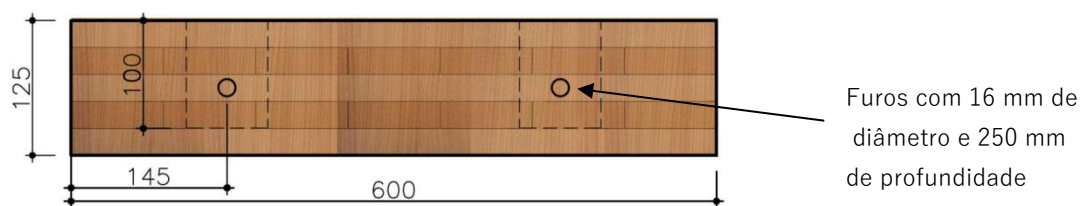
Fonte: Do autor.

Figura 4.12 - Prensagem do painel



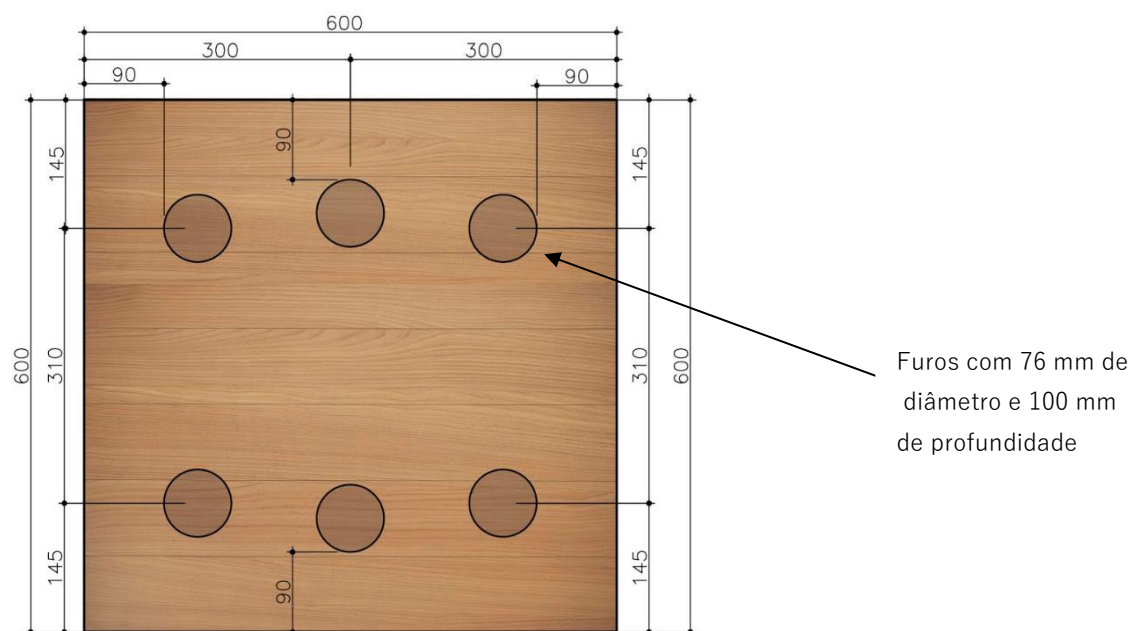
As dimensões finais dos painéis e furação são mostradas nas Figuras 4.13 e 4.14 a seguir.

Figura 4.13 – Vista lateral do projeto de furação do painel CLT



Fonte: Do autor.

Figura 4.14 – Vista superior do projeto de furação do painel de CLT

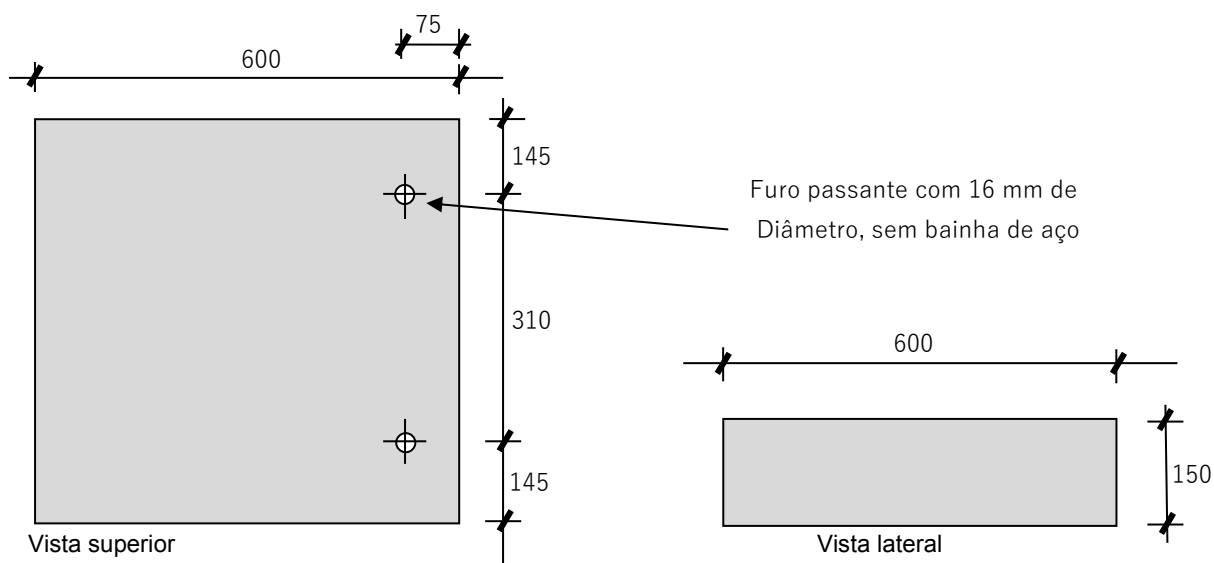


Fonte: Do autor.

4.1.2 Fabricação da laje de concreto

Para execução das lajes de concreto, por se tratar de um traço forte, muito denso, o slump utilizado foi com valor mais alto para facilitar o adensamento do concreto. O concreto foi verificado com relação a sua resistência à compressão, com a execução de corpos de prova cilíndricos, de acordo com a ABNT NBR 5739: 2007, após cura de 14 e 28 dias. Pode-se verificar o projeto da laje de concreto e suas dimensões na Figura.

Figura 4.15 - Projeto da laje de concreto (medidas em mm)



Fonte: Do autor.

As fôrmas das lajes foram executadas em Madeirite, plastificado, com cola fenólica, nas dimensões previstas para as lajes, conforme mostra a Figura 4.16. Na armação, foram utilizadas barras de aço CA50 com 10mm de diâmetro conforme mostra a Figura 4.17.

Foram preparados 6 corpos de prova cilíndricos para cada laje concretada, com dimensões padrão de 10 x 20 cm, e mais 6 corpos de prova de reserva para eventuais falhas na execução dos testes.

Figura 4.16 - Forma da laje de concreto



Fonte: Do autor.

Figura 4.17 – A armação da laje



Antes da concretagem, a fôrma foi preparada para receber os pinos guia de metal que serviram para manter a bucha de fixação do conector na posição final

durante o processo concretagem. Foram feitos dois furos com 10mm de diâmetro, um em cada face da fôrma, para a fixação dos pinos, conforme mostra a Figura 4.18. Após o posicionamento dos pinos procedeu-se à colocação das buchas, Figura 4.19. As Figuras 4.20 e 4.21 mostram as buchas já na posição de concretagem da laje. Após a colocação das buchas as fôrmas foram fechadas e posicionadas conforme mostra a Figuras 4.22. A concretagem foi executada com as fôrmas na posição vertical.

Após a cura, as guias metálicas foram retiradas e as buchas limpas, preparando-as para a passagem e fixação do conector.

Foram, então, realizados ensaios para verificação da resistência à compressão do concreto e determinação do seu módulo de elasticidade.

Figura 4.18 - Furos e fixação dos pinos



Figura 4.19 - Colocação da bucha nos pinos



Fonte: Do autor.

Figura 4.20 - Buchas na posição final



Figura 4.21 - Bucha na posição final



Fonte: Do autor.

Figura 4.22 - Fôrma na posição de concretagem



Fonte: Do autor.

4.1.3 Projeto e fabricação dos conectores

Os conectores foram fabricados em oficina de usinagem de metal com a utilização de equipamentos de usinagem tais como: Centro de usinagem *discovery* CNC ROMI, mostrado na Figura 4.23 e 4.24, torno CNC ROMI, Figura 4.25 e fresadora vertical TOOS, mostrada na Figura 4.24. Na sua fabricação foram utilizadas barras sextavadas de 1/2 polegada, de aço SAE 1045. O diâmetro final da área com rosca foi de 10mm.

Figura 4.23 - Centro de usinagem CNC



Figura 4.24 - Centro de Usinagem CNC



Fonte: Do autor.

Figura 4.25 - Torno CNC ROMI



Figura 4.26 - Fresadora vertical TOOS



Fonte: Do autor.

Os conectores, com 420 mm de comprimento, assim como as buchas, as arruelas, as porcas para fixação e o anel metálico para distribuição das tensões na madeira são mostrados nas Figuras 4.27 e 4.28.

Figura 4.27 - Bucha e pino guia



Figura 4.28 - Conector arruelas, porcas e anel



Fonte: Do autor.

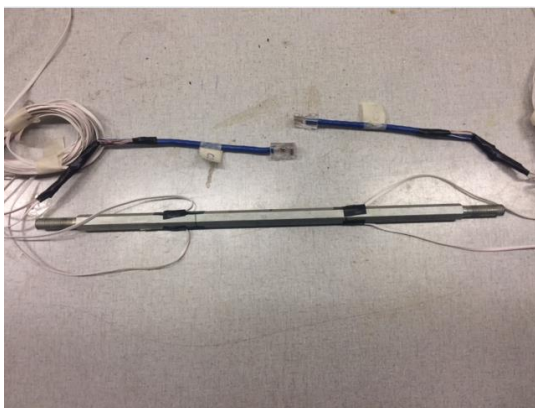
4.1.4 Montagem dos modelos de ensaio

Após observações e considerações relativas ao posicionamento dos extensômetros elétricos, sobretudo com relação à posição de sua instalação, resolveu-se adotar 2 extensômetros externos ativos para cada lado do conector, sendo cada conjunto numa posição oposta à outra e assim atingir com mais facilidade a interface do concreto com a madeira. O circuito foi configurado em ponte completa de Whinstone para obter sensibilidade apenas a forças de tração ou compressão. Foram utilizados quatro extensômetros, tipo KFG-1N-120-C1-11, com comprimento de 10 mm, para cada conector, conforme pode-se verificar na Figura 4.29.

Para passagem dos cabos dos extensômetros foram realizados dois cortes de 10 mm na face de contato do painel com a laje, Figura 4.32.

Durante a colocação dos conectores, os furos de 16 mm - tanto da laje de concreto quanto das laterais dos painéis de CLT - foram preenchidos com resina epóxi bi-componente SIKADUR 32 de média viscosidade. A fim de evitar a colagem do painel com a laje pré-fabricada foi inserida uma película (lona plástica) impermeabilizante na interface. Pode-se verificar a montagem dos painéis nas Figuras 4.30 e 4.31.

Figura 4.29 - Montagem dos extensômetros



Fonte: Do autor.

Figura 4.31 - Montagem dos extensômetros

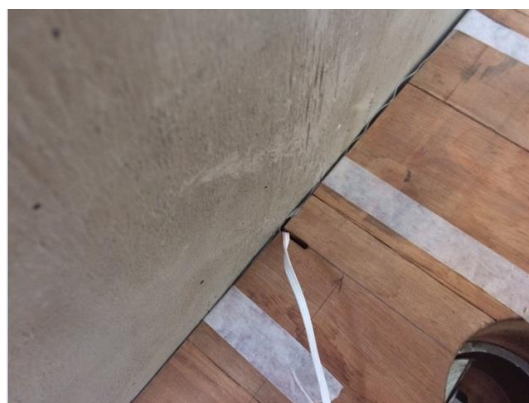


Fonte: Do autor.

Figura 4.30 - Montagem dos modelos



Figura 4.32- Saída cabos dos Extensômetros



4.2 Instrumentação e equipamentos

Para a execução dos ensaios de caracterização do concreto:

- Prensa servo-hidráulica EMIC PC200, com capacidade de 2000 kN, célula de pressão interna e clip-gage (extensômetro). Os dois medidores do clip-gage foram fixados em duas faces opostas dos CPs, conforme mostrado nas Figuras 4.33 e 4.34.

Figura 4.33 - Máquina Universal Instron



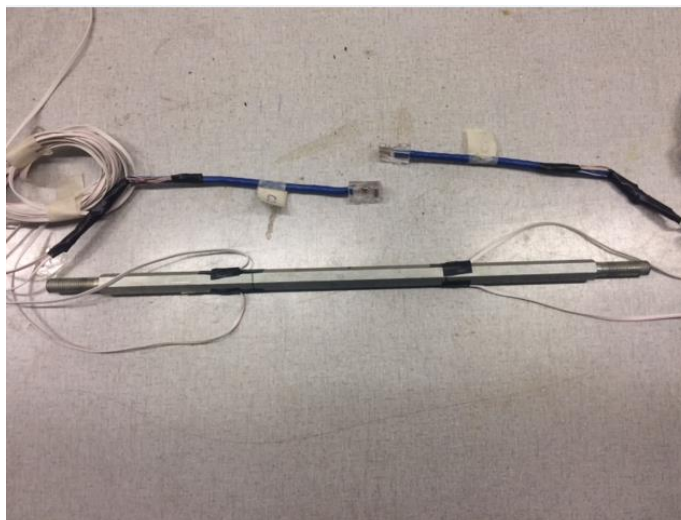
Figura 4.34 - Máquina Universal Instron



Fonte: Do autor.

- Para medir as forças aplicadas nos conectores foram utilizados extensômetros elétricos tipo KFG-1N-120-C1-11, com comprimento de 1 mm, como mostra a Figura 4.35.

Figura 4.35 - Posicionamento dos extensômetros



Fonte: Do autor.

- Para ensaio de cisalhamento direto foi utilizado um pórtico de reação com atuador hidráulico MTS, série 201.70T, com capacidade de carga à compressão de 1.460 kN, curso do cilindro de 250 mm, sistema de controle de

carga e deslocamento e sistema de aquisição e controle FlexTest GT Controller, Figura 4.36.

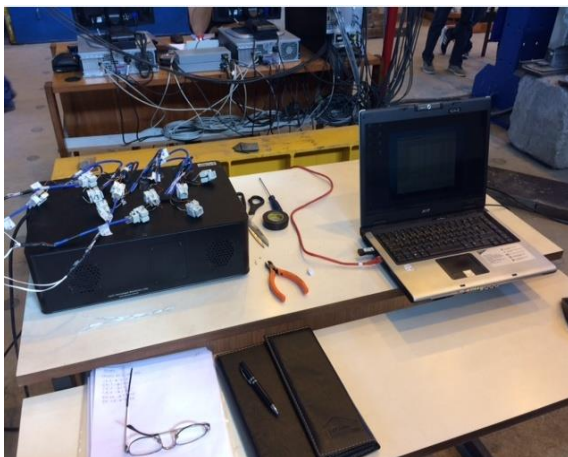
- Para a aquisição de dados relativos aos DTs e aos transdutores de força de tração foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados (SAD) de 32 canais da Lynx Tecnologia Eletrônica. Esse Sistema de Aquisição de Dados é composto por um placa aquisitora ADS2000 e duas placas condicionadoras AI-2161 de 16 canais. O programa Lynx AqDados 7.02.11 para ambientes Microsoft Windows™ foi responsável pela leitura e gravação dos dados, enquanto o programa Lynx AqDAnalysis 7.0.11 permitiu a criação de diagramas e a exportação de dados para outros programas como o Microsoft Excel™.
- A aquisição de dados referentes ao atuador hidráulico foi feita com o sistema da própria MTS, e, posteriormente, os resultados sincronizados com o sistema da Lynx. Todos os dados foram coletados com uma taxa de amostragem de 2 Hz.

Os dois sistemas de aquisição de dados são vistos nas Figuras 4.37 e 4.38.

Figura. 4.36 – Pórtico de reação MTS



Fonte: Do autor.

Figura 4.37 - Aquisição de dados (SAD)**Figura 4.38 - Aquisição de dados da MTS**

Fonte: Do autor.

4.3 Metodologia ensaios preliminares

Os Pré-ensaios foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG.

4.3.1 Ensaios de caracterização física e mecânica - materiais

4.3.1.1 Concreto

Para o concreto, foram preparados 18 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 200x100 mm, preparados no momento da concretagem das lajes. Foram 6 corpos de prova para a primeira laje (M1), 6 corpos de prova para a segunda laje (M2) e 6 corpos de prova de reserva. Sua resistência à compressão foi verificada de acordo com a norma ABNT NBR 5739: 2007, com 14 e 28 dias de cura. Para os ensaios os corpos de prova foram identificados e passaram por um capeamento de enxofre nas suas faces superior e inferior como mostra a Figura 4.39

Figura 4.39 - CP identificados

Fonte: Do autor.

Figura 4.40 - Máquina Universal Instron

Os ensaios foram realizados na Máquina universal Instron conforme mostrado na Figura 4.40. As leituras de carga e deslocamento foram feitas através do sistema de aquisição de dados da máquina.

Foram realizadas medições dos diâmetros dos CPs na sua seção horizontal superior, na seção central e na seção inferior. Após as medições foram calculadas as médias dos diâmetros e a seguir foram colocados na máquina PC 200 e realizado o ensaio de compressão simples até a ruptura, calculando-se a tensão máxima de ruptura.

Após 28 dias de idade foram novamente procedidos os ensaios de compressão no concreto com a medição dos diâmetros dos CPs e, dessa vez, instalados extensômetros do tipo clip gage para a medição das deformações nos CPs e determinação do módulo de elasticidade. Com os extensômetros instalados foram aplicadas as forças até atingirem o valor de 70% da máxima estimada. A partir daí foram retirados os extensômetros e aplicada a força até atingir a ruptura do concreto

4.3.1.2 Madeira

Para a caracterização da madeira foram preparadas sete amostras das peças utilizadas na confecção dos painéis. As amostras foram retiradas de tábuas escolhidas de forma aleatória no lote de madeiras. Suas dimensões seguiram o prescrito na norma ABNT NBR 7190: 1997 - Anexo B, ou seja, 2,0 cm x 3,0 cm x 5,0 cm, como pode-se observar na Figura 4.41.

Figura 4.41 - Corpos de prova de madeira identificados

Fonte: Do autor.

De acordo com a norma NBR 7190-1997, passou-se à determinação da umidade. Para tanto, foram determinadas as massas iniciais dos corpos de prova e aferidas suas dimensões (medidas úmidas), utilizando paquímetro digital de precisão. Os corpos de prova foram então colocados em uma câmara de secagem (estufa), com temperatura controlada de 103°C, ao longo de 24 h. Após esse período os CPs foram retirados da câmara, colocados numa campânula de vidro, verificadas suas massas através de uma balança de precisão e colocados novamente na câmara por mais 6 h. Concluída essa etapa foram novamente aferidas suas massas e verificou-se uma variação entre essas medidas consecutivas menor que 0,5% (medidas secas). Encerrou-se então o processo de secagem dos corpos de prova. O teor de umidade da madeira, a densidade aparente e a densidade de massa seca da madeira, foram calculados seguindo as prescrições da NBR 7190: 1997.

A seguir foram determinadas as retrações para se verificar a estabilidade dimensional da madeira. As retrações foram determinadas para cada uma das direções principais, que correspondem à axial (R_a), radial (R_r) e tangencial (R_t) às fibras, através das prescrições da NBR 7190: 1997.

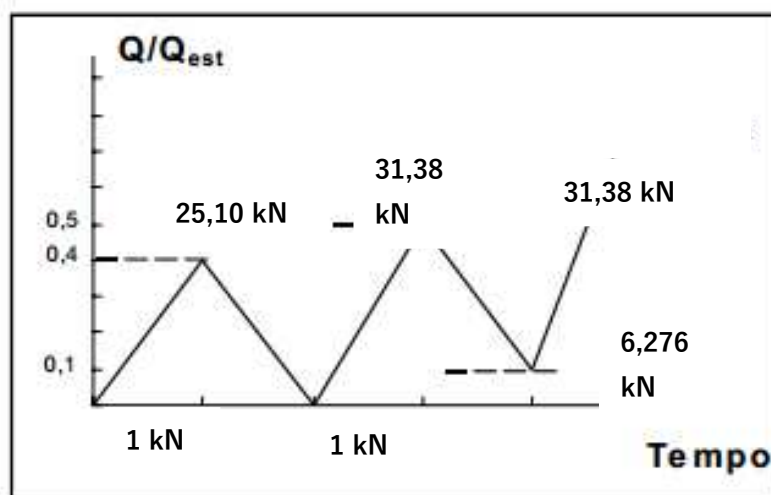
4.3.2 Ensaio de cisalhamento direto dos modelos preliminares

Os ensaios dos Modelos 1 e 2 foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG.

Foram realizados no pórtico de reação com atuador hidráulico MTS, série 201.70T.

Durante sua execução utilizou-se controle por força, com velocidade igual a 0,21 kN/s, seguindo o programa de carregamento estabelecido na Figura 4.42.

Figura 4.42 - Programa de carregamento dos ensaios 1 e 2



Fonte: Standards Australia/New Zeland – AS BBBB (1997).

Os ensaios foram realizados com os modelos sobre dois apoios e força vertical aplicada no centro da laje de concreto, que se encontrava na posição vertical. Os apoios utilizados em todas as extensões dos painéis de CLT eram constituídos de chapas de aço niveladas sobre blocos de concreto, de forma a permitir que a laje de concreto deslocasse verticalmente, na direção perpendicular dos painéis de CLT, conforme se vê nas Figuras 4.43 e 4.44.

Figura 4.43 - Posicionamento das chapas de aço **Figura 4.44 – Aparelho de interface central.**



Fonte: Do autor.

Na região de aplicação da força foi utilizado um aparelho de interface - constituído de uma rótula cilíndrica apoiada em uma placa de aço - que distribuiu os esforços pela região de contato e ao longo de todo o comprimento e espessura da laje de concreto, Figura 4.44, transferindo somente força vertical.

4.4 Resultados e discussões

Apresentamos, a seguir, os resultados dos ensaios de caracterização e cisalhamento preliminares.

4.4.1 Madeira e concreto

A resistência a compressão média aos 14 dias foi de 27,09 MPa com desvio padrão de 1,35 MPa e coeficiente de variação de 4,98%. As tensões de ruptura média aos 28 dias de idade foi de 30,18 MPa com desvio padrão de 1,02 MPa e coeficiente de variação de 3,37%. O módulo de elasticidade médio aos 28 dias foi de 22843 MPa com desvio padrão de 748 MPa e coeficiente de variação de 3,28%.

Os valores aferidos nos ensaios mantêm um nível de discrepância muito baixo entre si, tanto para idade de 14 e 28 dias, pelo CV baixo < que 5%. Pode-se observar, também, que em função de se tratar de um concreto convencional, ou seja, água, cimento, areia e brita, sem aditivos, o traço utilizado permitiu que se alcançassem os valores descritos, aos 14 dias de cura, bastante significativos e compatíveis com a

norma ABNT NBR 12655:2015 (10,0 até 40,0 MPa). Também aos 28 dias de idade os valores foram muito significativos e próximos da resistência máxima prevista na norma.

Os resultados obtidos, para a caracterização da madeira, são apresentados na Tabela 4.1. Notar que os coeficientes de variação são baixos indicando uma boa apuração de dados.

Tabela 4.1 - Ensaio de caracterização da madeira.

CPs	Densidade aparente (g/cm ³)	Densidade seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Fator anisotrópico
Média	0,80	0,78	9,76	1,17
Desvio Padrão (DP)	0,07	0,07	0,43	0,16
Coefficiente de Variação (CV)	8,12	8,77	4,42	13,53

Fonte: Do autor.

Segundo Durlo e Marchiori (1992), o mais importante índice para se avaliar a estabilidade dimensional da madeira é o coeficiente ou fator anisotrópico, definido pela relação entre as contrações tangencial e radial (T/R). O fator anisotrópico é o resultado da razão direta entre as contrações tangencial e radial. O valor médio foi de 1,17, sendo os limites individuais superior e inferior, respectivamente, de 1,45 e 1,03.

4.4.2 Ensaio de cisalhamento direto nos modelos preliminares

Neste Item estão apresentados os resultados obtidos no primeiro ensaio do Modelo 1, que foi realizado segundo a metodologia apresentada no subitem 4.3.2. São mostrados aqui dois gráficos elaborados quando da conclusão do texto do Projeto de Tese para Qualificação, portanto, de forma parcial.

Os resultados estão agrupados por comportamento, em termos de força imposta versus deslocamentos relativos entre a laje de concreto e os painéis de CLT (deslizamento) e em termos de força imposta versus força de tração nos conectores de cisalhamento (arrancamento). (FIGURAS 4.45 E 4.46).

Todas as análises apresentadas neste Item são preliminares, e carecem de mais estudos.

Conforme pode ser observado nos gráficos dos deslocamentos relativos, em todos os ciclos de força, o DT03 apresentou o dobro do deslocamento apresentado pelo DT01, tendo o deslocamento médio, após a aplicação da força máxima aplicada, resultado no valor de 1,5 mm.

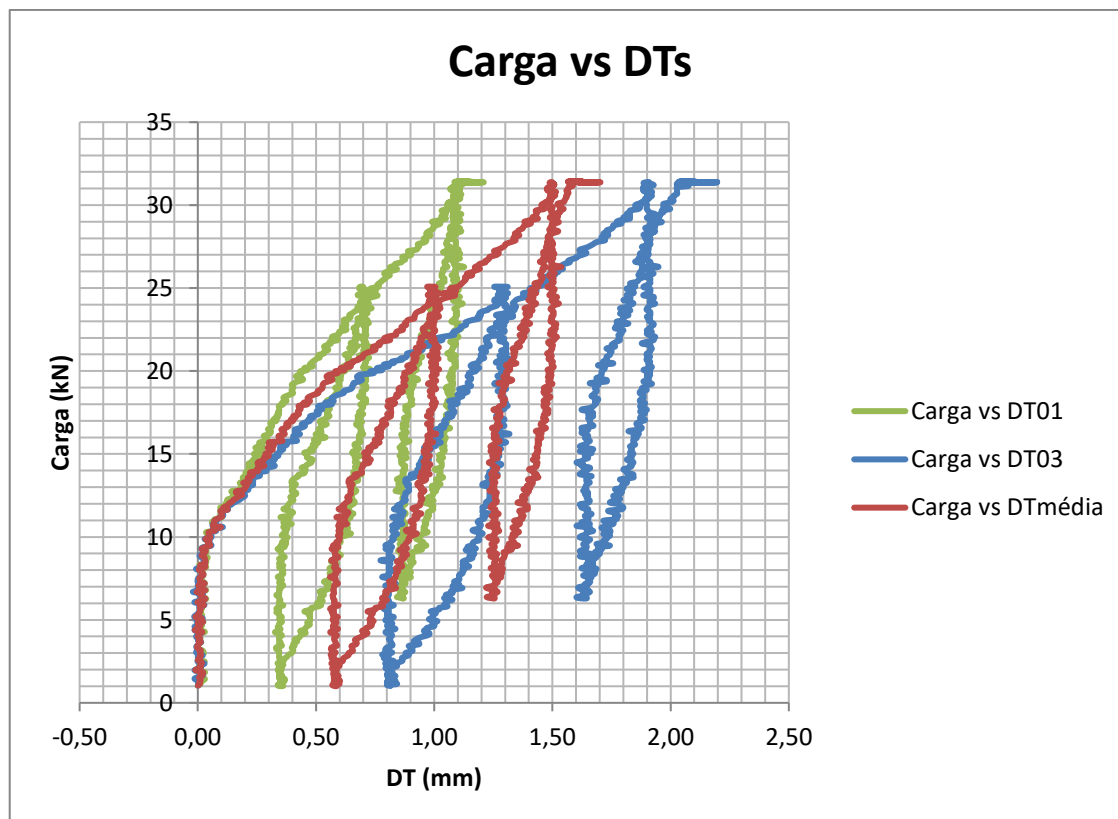
Nota-se que a força máxima aplicada neste ensaio foi da ordem de 50% da força última prevista para a ruptura do modelo, pois se pretendia ainda realizar mais um ensaio com o Modelo 1. O ensaio seria realizado liberando-se os painéis de CLT para a rotação em relação à laje de concreto, provocando-se, assim, flexão nos conectores de cisalhamento com o objetivo de se verificar o comportamento da solução adotada também para esta condição de solicitação, até ser atingida a força de ruptura.

Observando-se a Figura 4.46, verifica-se que os resultados obtidos para as forças de tração nos conectores mostram-se diferentes entre os três dispositivos, sobretudo os do conector C3-1_c em relação aos demais conectores de cisalhamento. Estas diferenças de leitura verificadas durante a realização do primeiro ensaio do Modelo 1 sugere que a centralização do modelo não ficou correta como deveria ou que a execução dos furos para a passagem desses conectores também não foi realizada considerando-se o alinhamento e a simetria desejados.

Nota-se nas Figuras 4.45 e 4.46 que as diferenças entre as leituras dos sensores crescem à medida que a força aplicada também aumenta. Como os painéis de CLT estavam restritos em relação à rotação em relação à laje de concreto, pode-se também justificar essas diferenças, sobretudo com o aumento da força aplicada, pela ocorrência de alguma acomodação no aparelho de interface ou nos apoios dos painéis de CLT.

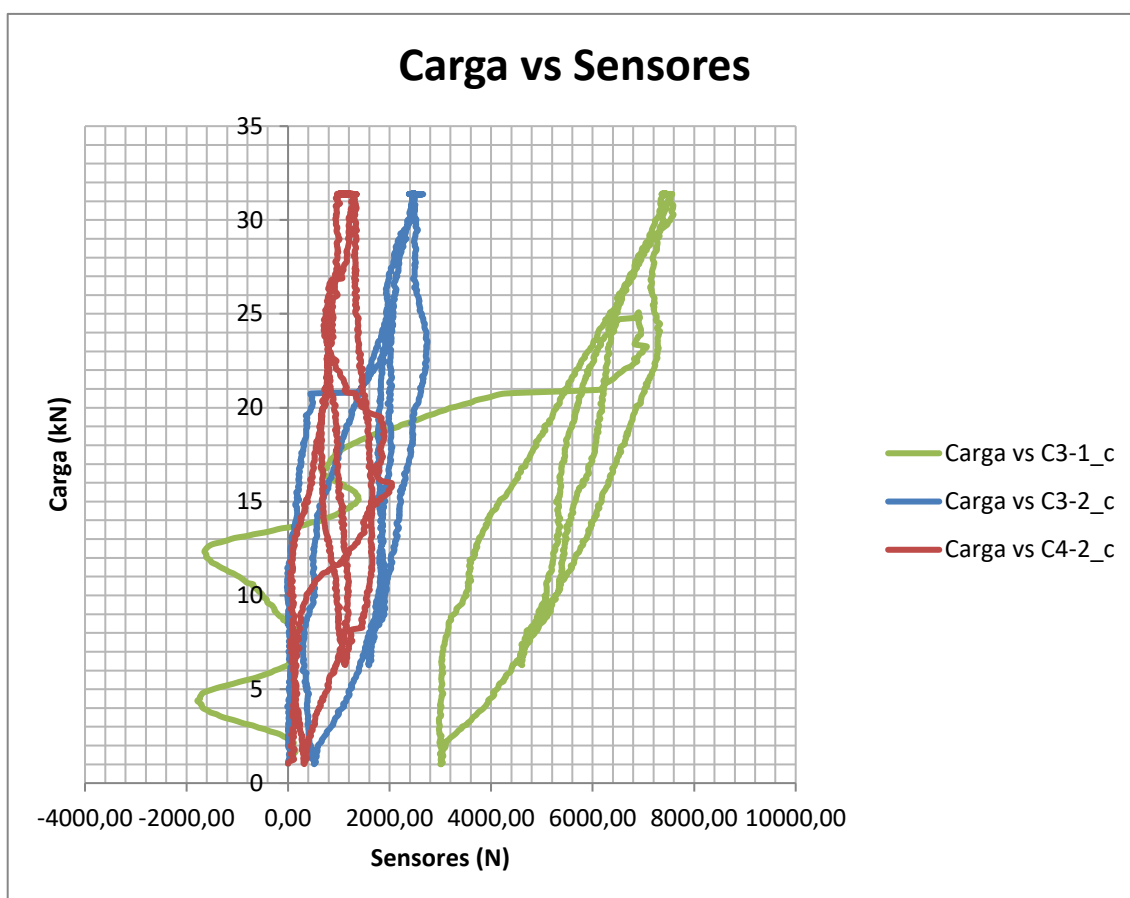
Outra observação importante, é que o dimensionamento dos furos para passagem dos conectores nos painéis não previa a instalação dos extensômetros externos e sim internamente aos mesmos. Essa falha, em função da modificação da posição dos extensômetros nos conectores é que, supostamente, acarretou na perda de sinal de alguns extensômetros e o resultado discrepante final da leitura.

Figura 4.45 - Força versus deslocamentos relativos entre os painéis de CLT e a laje de concreto



Fonte: Do autor.

Figura 4.46 - Força aplicada versus forças de tração nos conectores de cisalhamento



Fonte: Do autor.

4.5 Conclusões e propostas de modificação dos modelos

Pretendia-se, com a realização do ensaio de cisalhamento direto, a verificação do deslocamento relativo entre os painéis e a laje de concreto, bem como as forças atuantes nos conectores. Para medir as forças aplicadas nos conectores foram inicialmente idealizados furos no centro do fuste com rosca dos conectores, com 3 mm de diâmetro e 50 mm de profundidade, para instalação de extensômetros elétricos apropriados, como mostra a Figuras 4.47. No entanto, devido à perda de resistência do conector com o furo no centro do fuste, levou a modificação da solução proposta e adoção da estratégia de instalação dos extensômetros na face externa do conector, como mostra a Figura 4.48.

Figura 4.47 - Conectores com furo de 3 mm Figura 4.48 - Extensômetros externos



Fonte: Do autor.

Essa modificação - considerando que o diâmetro do furo no painel não foi alterado - no momento da instalação dos conectores - pode ter gerado uma compressão excessiva nos extensômetros (perpendicular ao extensômetro) e levado a perda de sinais de leitura de alguns extensômetros e, até mesmo, alterado a leitura dos mesmos. Dessa forma, tendo em vista que a força de tração (arrancamento) prevalecente foi confirmada, resolveu-se modificar o arranjo para os ensaios finais e abandonar a fixação de extensômetros externos no conector e avaliar apenas o deslocamento relativo entre os painéis e a laje de concreto, através dos transdutores de deslocamento.

5 CAMPANHA EXPERIMENTAL FINAL

Para ensaios de verificação da solução proposta, foram utilizados painéis produzidos pela CROSSLAM – Brasil, lajes pré-fabricadas de concreto armado produzidas pela PRECON, com concreto de alta resistência, e conectores de aço A 193 B7 produzidos pela CISER, que serão mostradas no decorrer desse trabalho.

A parte experimental incluiu séries de ensaios de compressão e arrancamento, nos quais serão avaliadas a resistência dos conectores isolados, dos painéis de madeira, das lajes de concreto, como também, a resistência e rigidez das ligações entre painéis x laje e painéis x painéis.

5.1 Materiais e confecção de modelos finais

5.1.1 Características dos painéis de madeira laminada colada cruzada

Foram utilizados painéis de madeira laminada colada cruzada (CLT) produzidos pela CROSSLAM, empresa sediada em São Paulo, que iniciou suas atividades há pouco mais de três anos e, até o momento, é praticamente a única empresa no país a produzir o CLT. Para sua produção a CROSSLAM utiliza-se da madeira “Pinus Taeda” seca em estufa, com 12% +/- 2% de umidade, podendo ser tratada em autoclave com CCB, ou com imersão em solução de Boro (neste caso o produto acabado). O adesivo utilizado é a base de poliuretano, monocomponente, livre de formaldeídos, com teor de sólidos de 100% certificado para uso estrutural e à prova d’água. As dimensões finais dos painéis são de 600x600x150 mm, com 5 camadas de madeira de 30 mm de espessura cada. Podemos verificar os painéis nas Figuras 5.1 e 5.2.

Figura 5.1- Painéis de madeira CLT



Figura 5.2- Painéis de madeira CLT



Fonte: Do autor.

5.1.2 Fabricação das lajes de concreto

As lajes de concreto pré-fabricadas maciças foram produzidas pela PRECON, empresa sediada em Belo Horizonte, MG, utilizando-se da mais alta tecnologia do setor. Todos os componentes do concreto são certificados. Suas dimensões são de 600x600x150 mm e o traço utilizado está especificado no Quadro 5.1 abaixo:

Quadro 5.1- Caracterização do Concreto na Fabricação

TRAÇOS OTIMIZADOS	Traço 15 Fck 50,0
MATERIAIS	Kg/m ³
CP V ARI PREMIUM LIZ	501
Pó de pedra Borges	527
Areia Quartzo Minas Gerais	220
B00	227
B0	640
Água	193
MasterGlenium 51	4,26

Fonte: Do autor.

- Fator água/cimento = 0,39;
- Cimento CP V ARI;
- Teor de argamassa = 59,0;
- Concreto Fluido, espalhamento = 740 mm;

- MasterGlenium 51 = Aditivo superplastificante a base de policarboxilatos.

Para fabricação das lajes de concreto, foram consideradas as recomendações, especificações e dimensões contidas na norma EN 1994-1-1: 2004, que trata de testes padrão para os conectores de cisalhamento em estruturas mistas de aço e concreto, sendo, no entanto, utilizada como referência para testes em ligações de madeira e concreto. Pode-se verificar a laje de concreto na Figura 5.3.

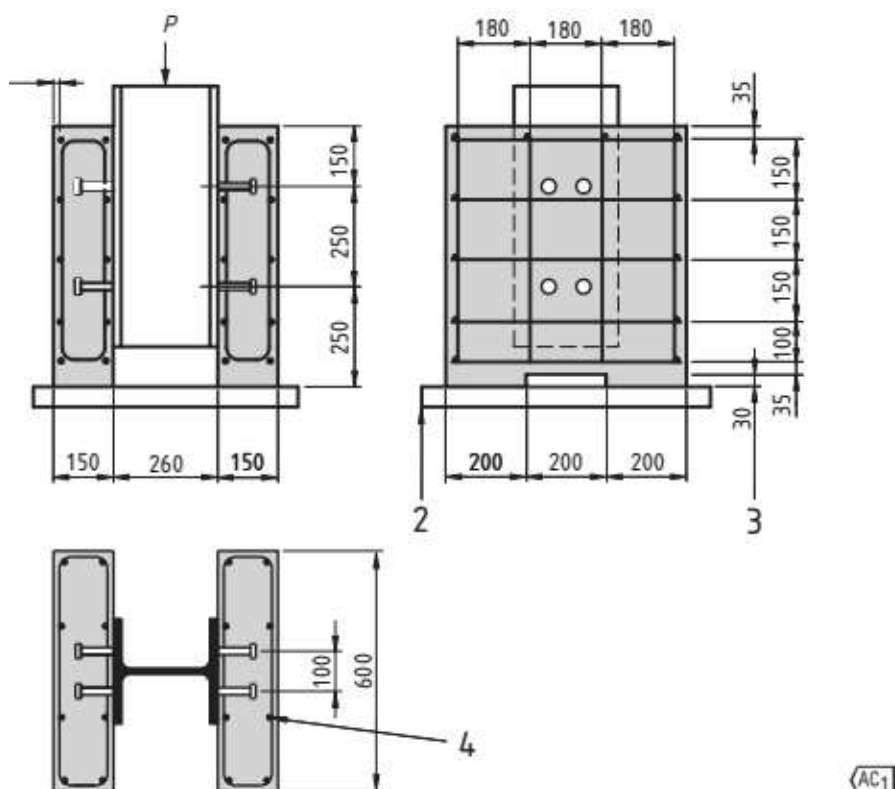
Figura 5.3- Laje de concreto pré-fabricada e corpos de prova cilíndricos



Fonte: Do autor.

Na armação, foram utilizadas barras de aço CA50 com 10 mm de diâmetro, em conformidade com a norma. O cimento utilizado foi o CP V-ARI PREMIUM, cimento portland de alta resistência inicial, com o aditivo GLENIUM 51, aditivo superplastificante de terceira geração e que foi desenvolvido para produção de concretos fluidos, concretos REODINÂMICOS e concretos de alto desempenho (CAD), geralmente utilizados na indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requer maior durabilidade e desempenho, segundo as especificações técnicas do fabricante. As ferragens para fabricação das lajes teve como referência o prescrito na EUROCODE 5 conforme podemos verificar na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Referência para armação das lajes pré-fabricadas - EUROCODE 4



Onde,

- 1 Cobrir 15mm
- 2 Em argamassa ou gesso
- 3 Vazio opcional
- 4 Reforço: barras de aço com 10mm diâmetro resultando numa ligação forte com $450 \leq f_{ck} \leq 550 \frac{N}{mm^2}$

Fonte: Do autor.

Foram fabricadas 6 lajes de concreto com dimensões de 600 x 600 x 150 mm. Como a fabricação das lajes ocorreu em etapas - em cada etapa eram concretadas 2 lajes - foram preparados 6 corpos de prova cilíndricos, com dimensões padrão de 100 x 200 mm e mais 6 corpos de prova de reserva para eventuais falhas na execução dos testes, para cada etapa, ou seja, para cada 2 lajes concretadas.

5.1.3 Detalhes dos conectores metálicos

Os conectores, porcas e arruelas de aço utilizadas foram fabricados pela CISER, empresa sediada em Araguari, Santa Catarina. Suas dimensões são de 420 mm por ½ polegada de diâmetro. Seguem as especificações técnicas do fabricante: Aço Liga, AISI 4140 Temperado e Revenido, as Porcas A194 grade 2H

Conector - HA ESTOJO A193 B7 UNC 1/2x2 RI ET

Código de Linha – UNC 855

Dimensões: ANSI 16,5

Rosca: UNC – UM ASME B1.1

Material: Aço Liga

Tratamento Térmico: Temperado e Revenido

Componentes: Prisioneiro ASTM A193 B7

Porca Sextavada Pesada ASTM A194 2H

Pode-se verificar os conectores nas Figuras 5.5 e 5.6 a seguir.

Figura 5.5 - Conector de aço da CISER

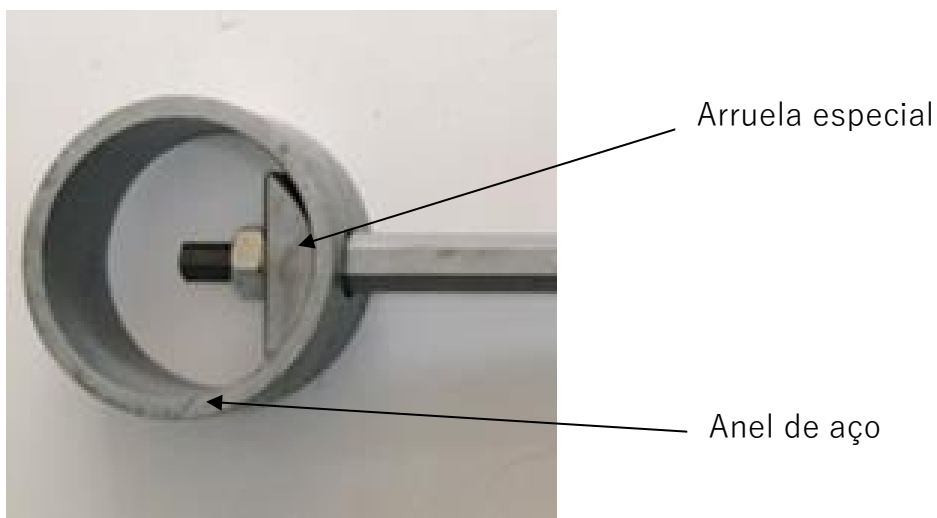


Figura 5.6- Conector de aço da CISER



Fonte: Do autor.

Foram fabricadas, também, para complementação dos conectores, utilizando-se aço SAE 1045, anel de aço e arruela especial, conforme se pode verificar na fig. 5.7 abaixo.

Figura 5.7 - Arruela e anel de aço especiais

Fonte: Do autor.

5.1.4 Montagem dos modelos de ensaio

Os modelos para os ensaios finais foram montados no LAEES, procedendo-se a colocação das peças nas posições previstas e fixando-as através dos conectores metálicos, como pode ser verificado nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

Figura 5.8 - Modelos montados**Figura 5.9 - Montagem dos modelos**

Fonte: Do autor.

Figura 5.10 – Detalhe da ligação

Fonte: Do autor.

Durante a colocação dos conectores, os furos de 16 mm - tanto da laje de concreto quanto das laterais dos painéis de CLT - foram preenchidos com resina epóxi bi-componente SIKADUR 32 de média viscosidade. Com o objetivo de evitar a colagem do painel com a laje pré-fabricada foi inserida uma película (lona plástica) impermeabilizante na interface.

5.1.5 Corpos de prova para caracterização de propriedades específicas

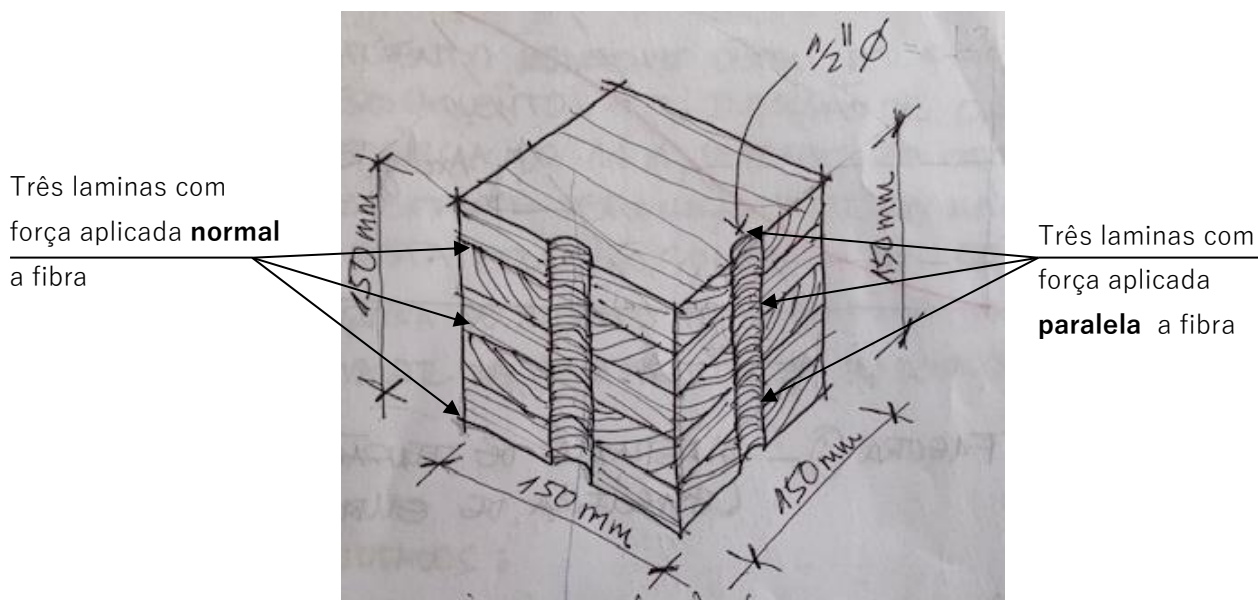
5.1.5.1 CP para embutimento do CLT

Para a determinação da resistência ao embutimento, tendo como corpo de prova madeira laminada colada cruzada - um produto relativamente novo no contexto mundial - e por não serem, ainda, regulados os procedimentos nas normas em vigor, tanto europeias quanto americanas e brasileiras, foram necessárias algumas modificações no corpo de prova para adequá-lo às prescrições normativas. Como o CLT é composto por lâminas de madeira cujo sentido das fibras se alternam, as recomendações relativas à aplicação da força, quer seja no sentido das fibras ou normal a elas, passam a ter sentido somente se for considerada a predominância delas. É importante salientar, que o CLT é composto por número ímpar de lâminas. Sendo assim, dependendo da posição que se coloque o corpo de prova, pode-se ter uma configuração predominante de um sentido das fibras em detrimento da outra. Podem-se verificar as diferentes configurações na ilustração da Figura 5.11.

Com o intuito de reduzir as implicações daí provenientes, optou-se, então, por aumentar a seção dos corpos de prova, tendo como referência a espessura do CLT

utilizado, com 5 lâminas e 150 mm de espessura total. Dessa forma, dependendo da posição dos CPs nos ensaios, a aplicação da força pode ser considerada paralela ou normal as fibras.

Figura 5.11– Corpo de prova para embutimento na madeira



Fonte: Do autor.

Foram produzidos 13 corpos de prova e esses seguiram, em parte, o prescrito na Norma NBR 7190 (1997) e a ASTM D5764-97a, cujas dimensões finais foram de 150x150x150mm.

Os corpos de prova foram preparados com uma cava de $1/2$ " de diâmetro em dois lados, Figura 5.12, para que se pudesse ensaiar o embutimento. De um lado com força aplicada normal as fibras (3 lâminas na posição normal, 2L) e de outro com força aplicada paralela as fibras (3 lâminas na posição paralela, 3L).

Figura 5.12– Corpo de prova para embutimento na madeira



Fonte: Do autor.

5.1.5.2 CP para módulo de elasticidade e resistência à compressão do CLT

Para os ensaios de compressão foram produzidos 14 corpos de prova, sendo 7 com 3 lâminas normais a aplicação da força e 7 com 3 lâminas paralelas a aplicação da força. Como se trata de amostras de madeira laminada colada, pelas mesmas razões explicitadas no ensaio de embutimento, modificamos as dimensões dos corpos de prova. As dimensões dos CPs seguiram o prescrito na Norma NBR 7190 (1997), ou seja, comprimento igual a três vezes o lado da seção transversal, 150x150x450 mm, conforme mostrado na Figura 5.13.

Figura 5.13 – CPs para ensaios de compressão

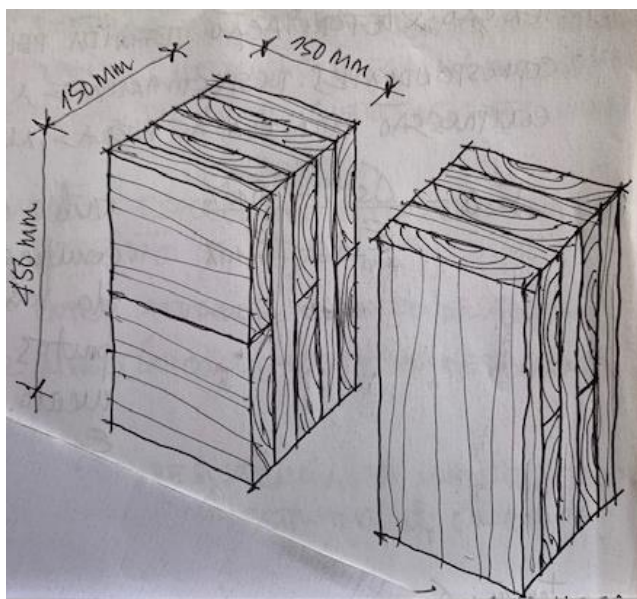


Figura 5.14 – CPs para compressão



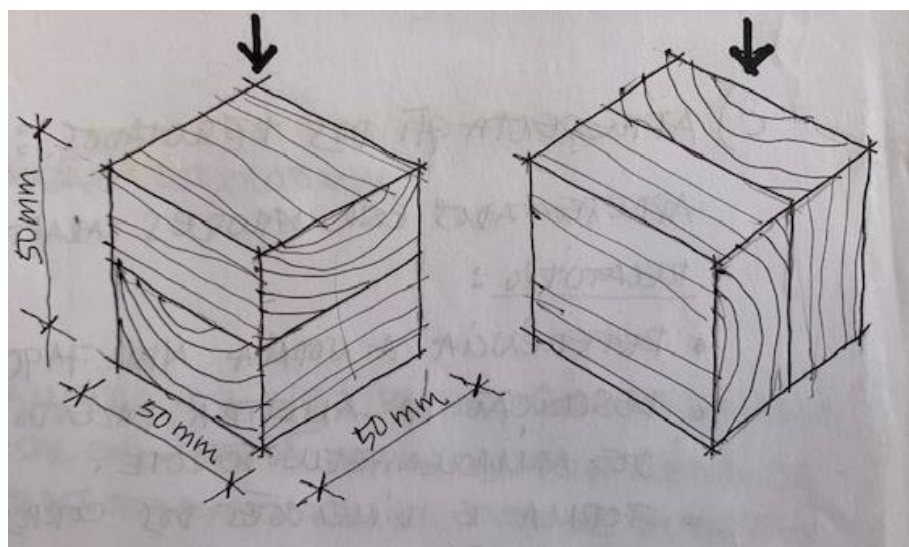
Fonte: Do autor.

5.1.5.3 CP para cisalhamento da madeira e da cola do CLT

Para os ensaios de cisalhamento foram produzidos 14 corpos de prova, sendo 7 para cisalhamento na linha de cola e 7 para cisalhamento paralelo às fibras da madeira. As dimensões dos CPs, assim como o procedimento do ensaio, seguiram o prescrito na Norma NBR 7190 (1997), cujas dimensões finais são de 50x50x50 mm conforme mostrado na Figura 4.17.

Pode-se verificar nas ilustrações a direção da aplicação de força nos CPs, Figura 5.15 e 5.16.

Figura 5.15 - Corpos de prova para resistência ao cisalhamento



Fonte: Do autor.

Figura 5.16 - Corpo de prova para resistência ao cisalhamento paralelo às fibras



Fonte: Do autor.

5.1.5.4 CP para arrancamento do conector

O CP foi preparado com dimensões de 178x100x100 cm, no qual foi introduzido um conector colado.

Foi utilizado o adesivo estrutural à base de resina epóxi, alta fluidez, Sikadur – 32 Gel, bi-componente, no furo de ancoragem dos conectores no corpo de prova de madeira. Podemos verificar o CP na Figura 5.17.

Figura 5.17 – Corpo de prova para ensaio de arrancamento



Fonte: Do autor.

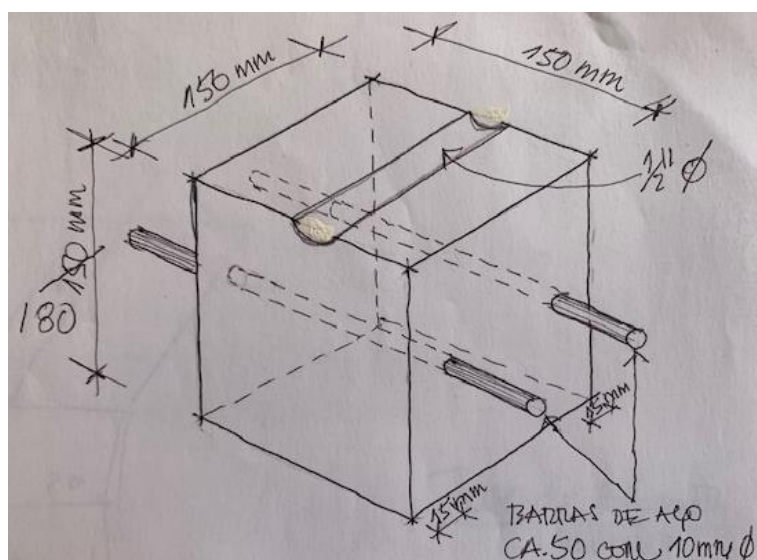
Os furos, nos CPs de madeira, foram feitos utilizando-se furadeira industrial, na própria empresa fabricante dos painéis, com diâmetros médios de 16 mm. Os conectores foram posicionados da mesma maneira que nos painéis de madeira, a fixação foi realizada através de porcas e arruelas especiais. O anel metálico também foi colocado na mesma posição. O adesivo estrutural, bi-componente, foi preparado e utilizado conforme as indicações do fabricante. Após a mistura, eles foram aplicados nas extremidades das barras, no local a ser inserido no CP de madeira, com espátula. Todas as barras foram inseridas manualmente. Após a colagem e fixação dos conectores, os CPs foram condicionados à temperatura ambiente até a data dos ensaios.

5.1.5.5 CP para embutimento do concreto

O corpo de prova e o ensaio de embutimento para o concreto foi adaptado pela inexistência de um modelo padrão. Foram produzidos 4 corpos de prova. A preparação dos CPs tomou como referência o prescrito na Norma ASTM D5764 – 97a,

no que se refere a conformação do corpo de prova e posicionamento do conector, Figura 5.18. As dimensões finais do CP são de 150x150x150 mm, mesmas dimensões adotadas para o ensaio de embutimento na madeira. Embora as normas, NBR 7190: 1997, ASTM D5764 – 97a e EM 383: 2007 diferenciem, com relação as dimensões e conformação do corpo de prova, as equações para o cálculo da resistência ao embutimento são praticamente as mesmas. Portanto, adotamos o mesmo procedimento previsto na ASTM D5764-97a.

Figura 5.18 – Ilustração do corpo de prova de concreto para embutimento

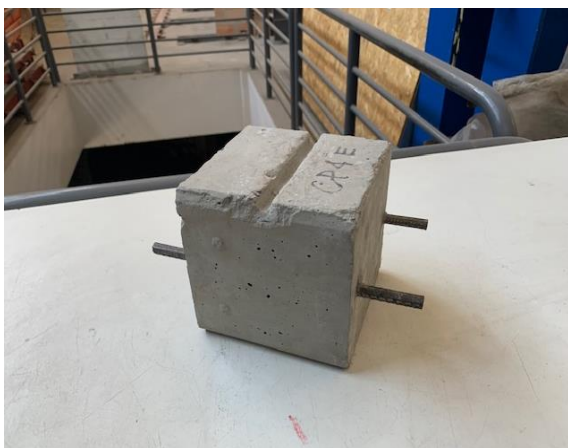


Fonte: Do autor.

Durante a concretagem os corpos de prova foram produzidos com uma cava de $\frac{1}{2}$ " de diâmetro (profundidade de $\frac{1}{4}$ ") na face superior, e dois ferros, CA 50 com 10mm de diâmetro, no sentido transversal a cava, para evitar a pré-fissura do concreto, conforme mostrado na Figura 5.19.

Embora as lajes tenham sido executadas por uma empresa industrial, com larga experiência em pré-fabricados de concreto, a cava prevista para o corpo de prova ficou com profundidade superior a especificada, ou seja, maior que $\frac{1}{4}$ ". Frente ao imprevisto, resolveu-se aplicar um grauteamento na cava para adequação à profundidade necessária, Figura 5.20

Figura 5.19- CP para embutimento no concreto **Figura 5.20- CP embutimento com graute**



Fonte: Do autor.

5.1.5.6 CP para momento de plastificação do conector

Os conectores, porcas e arruelas de aço utilizadas foram fabricados pela CISER. Constituem-se em barra roscada de aço liga, temperado e revenido, porcas e arruelas, com as seguintes propriedades mecânicas definidas pelo fabricante: Tensão mínima de escoamento de 517 MPa e tensão de tração mínima de 689 MPa. Suas dimensões são de 420 mm por 12,7 mm de diâmetro.

Figura 5.21- Corpo de Prova para momento de plastificação do conector



Fonte: Do autor.

5.2 Instrumentação e equipamentos

Para realização dos ensaios de caracterização foram utilizadas:

- Prensa hidráulica EMIC – PC 200, com capacidade de 2000 kN;
- Clip-gage de configuração dupla para módulo de concreto;
- Prensa hidráulica EMIC – DL 30000 de 300 kN;
- As leituras de carga e deslocamento da PC 200 e DL 30000 foram feitas utilizando-se os sistemas de aquisição de dados das máquinas conectados a um microcomputador;
- Pórtico de reação com atuador hidráulico MTS, série 201.70T, com capacidade de carga à compressão de 1.460 kN, curso de cilindro de 250 mm, sistema de controle de carga e deslocamento e sistema de aquisição e controle Flex Test GT Controller;
- Sistema de aquisição de dados (SAD) de 32 canais da Lynx Tecnologia Eletrônica, composto por placa aquisidora ADS2000 e duas placas condicionadoras AI-2161 de 16 canais;
- Na instrumentação foram utilizados transdutores de deslocamento Kyowa com curso de 50 mm e sensibilidade de 0,01 mm.

5.3 Metodologia dos ensaios

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, segundo procedimentos previstos em normas pertinentes, e ensaios da ligação entre painéis de madeira x madeira x madeira (MMM) e madeira x concreto x madeira (MCM), no que tange a resistência, rigidez da ligação e análise comparativa dos resultados obtidos experimentalmente com aqueles obtidos através da aplicação das fórmulas previstas no EUROCODE 5.

5.3.1 Ensaio de caracterização do concreto

Os ensaios de caracterização do concreto foram realizados no LAEEs e passam a ser descritos a seguir.

5.3.1.1 Ensaio de caracterização mecânica do concreto

Para a execução dos ensaios de caracterização do concreto foi utilizada a prensa hidráulica EMIC – PC 200, com capacidade de 2000 kN. Os transdutores foram fixados em duas faces opostas dos CPs, conforme mostrado na Figura 5.23. As leituras de carga e deslocamento foram feitas utilizando-se o sistema de aquisição de dados da própria máquina. A velocidade de carregamento adotada para o ensaio foi de 10 MPa/min.

Foram preparados 18 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 200x100 mm no momento da concretagem das lajes pré-fabricadas na Usina. Desses 18 CPs, 6 corpos de prova para as duas primeiras lajes ensaiadas (M1 e M2 pinus/concreto/pinus), 6 corpos de prova para as duas segundas lajes ensaiadas (M3 e M4 pinus/concreto/pinus) e 6 corpos de prova para as duas terceiras lajes ensaiadas (M5 e M6 pinus/concreto/pinus). Sua resistência à compressão foi verificada de acordo com a norma ABNT NBR 5739: 2007. Para os ensaios os corpos de prova foram identificados como mostra a Figura 5.22.

A resistência à compressão do concreto foi avaliada por meio de ensaios de compressão uniaxial, executado de acordo com a NBR-5739 (1994). O módulo de elasticidade estático foi determinado segundo a NBR-8522 (2004).

Figura 5.22 - Corpos de prova identificados **Figura 5.23 - Prensa Hidráulica EMIC – PC 200**



Fonte: Do autor.

Foram realizadas medições dos diâmetros dos CPs na sua seção horizontal superior, na seção central e na seção inferior. Após as medições foram calculadas as

médias dos diâmetros e a seguir foram colocados na máquina para aplicação da força até a ruptura do corpo de prova, obtendo-se tensão máxima de ruptura.

Para determinação do módulo de elasticidade, os ensaios de compressão no concreto foram realizados com a medição dos diâmetros dos CPs e instalados extensômetros do tipo clip gage para a medição das deformações. Esse procedimento foi executado apenas num dos CPs por ensaio. Com os extensômetros instalados foram aplicadas as forças até atingirem o valor de 70% da máxima estimada. A partir daí foram retirados os extensômetros e aplicada a força até atingir a ruptura do concreto.

5.3.1.2 Embutimento no concreto

Para a execução dos ensaios foi utilizada a prensa hidráulica EMIC – DL 30000 de 300 kN. Os transdutores foram fixados nas duas extremidades opostas do conector, através de duas porcas consecutivas, de forma que a face plana da porca recebesse a haste do transdutor. As leituras de carga e deslocamento foram feitas utilizando-se o sistema de aquisição de dados da DL30000, conectado a um microcomputador. A taxa de carregamento adotada para o ensaio foi a de 10 MPa/min. Pode-se verificar o posicionamento do corpo de prova e dos transdutores de deslocamento na Figura 5.24 a seguir.

Figura 5.24 - Ensaio de embutimento no concreto



Fonte: Do autor.

As resistências ao embutimento no concreto foram calculadas a partir das forças máximas de embutimento obtidas, usando a equação E5.1.

$$f_{e,\alpha} = \frac{F_{e,\alpha,max}}{dxt} \quad \text{E5.1}$$

Sendo:

$f_{e,\alpha}$ - resistência ao embutimento no concreto

$F_{e,\alpha,max}$ - força máxima de embutimento no concreto

d – diâmetro do conector

t – espessura do corpo de prova em milímetros

5.3.2 Ensaios de caracterização da madeira

Foram executados quatro grupos de ensaios para caracterização da madeira, quais sejam: densidade, embutimento, compressão, arrancamento e cisalhamento. Esse último em duas etapas, cisalhamento da madeira e na linha de cola. Foi determinada também, a densidade aparente da madeira.

5.3.2.1 Densidade aparente

A densidade aparente da madeira foi determinada segundo as prescrições da NBR 7190:1997. A densidade aparente ρ_{ap} é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova com teor de umidade de n%, sendo dada por:

$$\rho_{ap} = \frac{m_n}{V_n} \quad \text{E5.2}$$

Onde:

m_n é a massa da madeira a n% de umidade, em quilogramas

V_n é o volume da madeira a n% de umidade, em metros cúbicos

Para cada CP, foram preparadas 6 amostras de madeira.

Figura 5.25 - Corpo de prova para verificação da densidade aparente

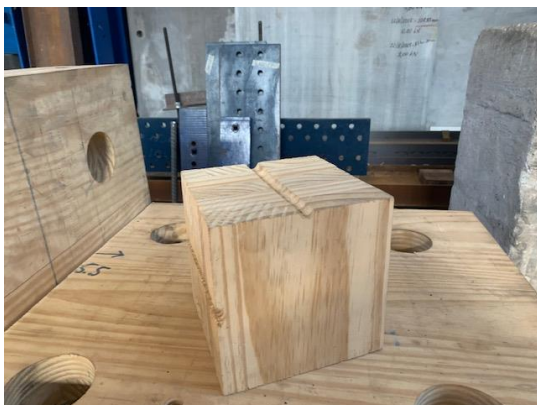


Fonte: Do autor.

5.3.2.2 Embutimento na madeira

Para a execução dos ensaios foi utilizada a prensa hidráulica EMIC – DL 30000 de 300 kN. O ensaio foi realizado com o conector apoiado sobre a cava na madeira e sobre ele aplicada a força. Os transdutores foram fixados em duas faces opostas do conector, através de duas porcas consecutivas, conforme mostrado na fig. 5.28. As leituras de carga e deslocamento foram feitas utilizando-se o sistema de aquisição de dados da DL30000, conectado a um microcomputador. A taxa de carregamento adotada para o ensaio foi a de 10 MPa/min.

Figura 5.26 – CP para embutimento na madeira **Figura 5.27 – CP para o ensaio de embutimento**



Fonte: Do autor.

Segundo a NBR 7190- 1997, a resistência de embutimento (f_e) é definida pela razão entre a força F_e que causa a deformação específica residual de 2% e a área de embutimento do pino $A_e = td$, determinada no ensaio, como mostra-se a seguir.

f_{e0} - Resistência de embutimento paralela às fibras

f_{e90} - Resistência de embutimento normal às fibras

$$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{td} \text{ MPa} \quad \text{E5.3}$$

$$f_{e90} = \frac{F_{e90}}{td} \text{ MPa} \quad \text{E5.4}$$

F_{e0} - Força aplicada paralela às fibras

F_{e90} - Força aplicada normal às fibras, correspondentes às deformações residuais de $\varepsilon = 2\%$ em Newtons.

t = espessura do corpo de prova em metros

d = diâmetro do pino

Por outro lado, a ASTM D5764 – 97a, recomenda que as resistências ao embutimento na madeira, obtidas experimentalmente, devem ser expressas a partir das forças máximas usando a equação E5.5. Sugere, também, que a taxa de velocidade do ensaio deve ser determinada em um teste preliminar para que a carga máxima fosse obtida entre 3 e 7 min.

$$f_{e,\alpha} = \frac{F_{e,\alpha,max}}{dt} \quad \text{E5.5}$$

Sendo:

$f_{e,\alpha}$ - resistência ao embutimento na madeira (N/mm²)

$F_{e,\alpha,max}$ - força máxima de embutimento na madeira (N)

d - diâmetro do conector (mm)

t - espessura do corpo de prova (mm)

Percebe-se que as equações são praticamente as mesmas na NBR 7190 e na ASTM D5764, mudando apenas a configuração do corpo de prova que, no caso em tela, foi adotada e adaptada a da ASTM D5764.

Figura 5.28 – Ensaio de embutimento na madeira sendo realizado



Fonte: Do autor.

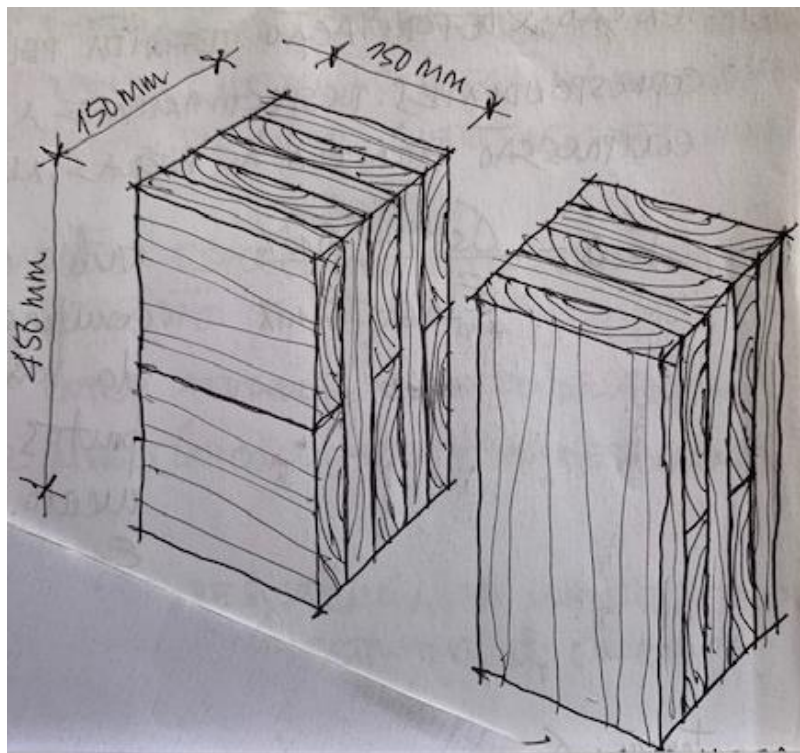
5.3.2.3 Modulo de elasticidade e resistência à compressão

Para a execução dos ensaios foi utilizada a prensa hidráulica EMIC – PC 200, com capacidade de 2000 kN. Os transdutores foram fixados em duas faces opostas dos CPs, conforme mostrado na Figura 4.52. As leituras de carga e deslocamento foram feitas utilizando-se o sistema de aquisição de dados da própria máquina conectado a um microcomputador. A taxa de carregamento adotada para o ensaio foi de 10 MPa/min.

O procedimento de ensaio seguiu o recomendado na NBR 7190 – 1997, e foram realizados seis ensaios para cada tipo de corpo de prova, quais sejam, seis ensaios para os CPs com a força aplicada na posição de três lâminas paralelas as fibras e seis

ensaios com a força aplicada na posição de duas lâminas paralelas as fibras. Podemos verificar as ilustrações dos CPs na Figura 5.29.

Figura 5.29 – Corpos de prova para ensaios de compressão na madeira



Fonte: Do autor.

Figura 5.30 – Corpo de prova para ensaios de compressão na madeira



Fonte: Do autor.

Segundo a NBR 7190: 1997, a resistência à compressão paralela as fibras ($f_{wc,0}$ ou f_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada de 150 mm de lado e 450 mm de comprimento. É dada em MPa por:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0 \max}}{A} \quad \text{E5.5}$$

$F_{c0 \max}$ - Força máxima de compressão aplicada em Newtons

f_{c0} - Resistência à compressão paralela às fibras em MPa

A = Área da seção transversal comprimida em m²

A rigidez da madeira, na direção paralela às fibras, deve ser determinada por seu módulo de elasticidade obtido do trecho linear do diagrama de tensão x deformação específica, em MPa. Para essa finalidade, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante a curva tensão x deformação, definida pelos pontos correspondentes respectivamente a 10% e a 50% da resistência à compressão paralela às fibras, medidas no ensaio, sendo dadas em MPa por:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad \text{E5.6}$$

Onde:

$\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$ são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} do diagrama de carregamento.

$\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ são as deformações específicas medidas no corpo de prova correspondentes às tensões de $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$.

Figura 5.31- Ensaio de compressão madeira

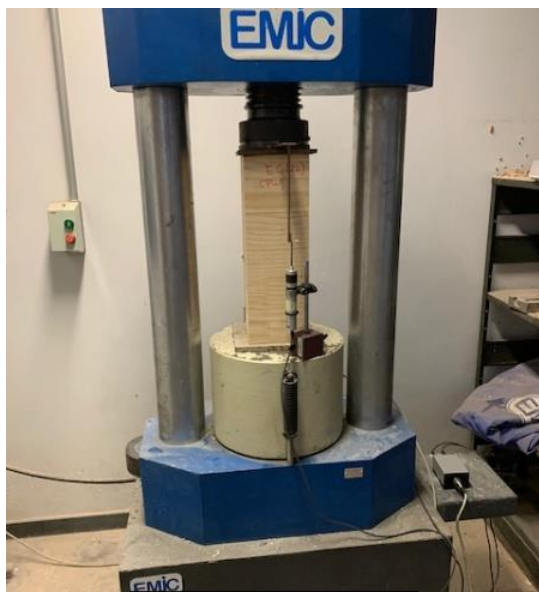


Figura 5.32 - Ensaio de compressão madeira



Fonte: Do autor.

5.3.2.4 Resistência ao cisalhamento da madeira e da cola

Para a execução dos ensaios foi utilizada a prensa hidráulica EMIC – DL 30000 de 300 kN. As leituras de carga foram feitas utilizando-se o sistema de aquisição de dados da DL30000, conectado a um microcomputador. A taxa de carregamento adotada para o ensaio foi de 2,5 MPa/min.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira ($f_{wv,0}$ ou f_{v0}) é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo de prova prismático, sendo dada por:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad \text{E5.7}$$

Onde:

$F_{v0,max}$ - é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova, em Newtons;

A_{v0} - é a área inicial da seção crítica do corpo de prova, em um plano paralelo às fibras, em metros quadrados.

O valor característico da resistência ao cisalhamento deve ser dado pelo estimador dado na norma NBR 7190.

Figura 5.33 - Ensaio de cisalhamento paralelo Figura 5.34 - Ensaio de cisalhamento paralelo



Fonte: Do autor.

A resistência ao cisalhamento na lâmina de cola, paralelo às fibras da madeira laminada colada ($F_{gv,0}$) é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na lâmina de cola de um corpo de prova prismático, sendo dada por:

$$f_{gv} = \frac{F_{v0,max}}{A_{gv,0}}$$

E5.8

Onde:

$F_{v0,max}$ – é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova em Newtons

$A_{gv,0}$ - é a área inicial da lâmina de cola do corpo de prova, em um plano paralelo às fibras, em m².

O valor característico da resistência ao cisalhamento deve ser dado pelo estimador dado na norma NBR 7190.

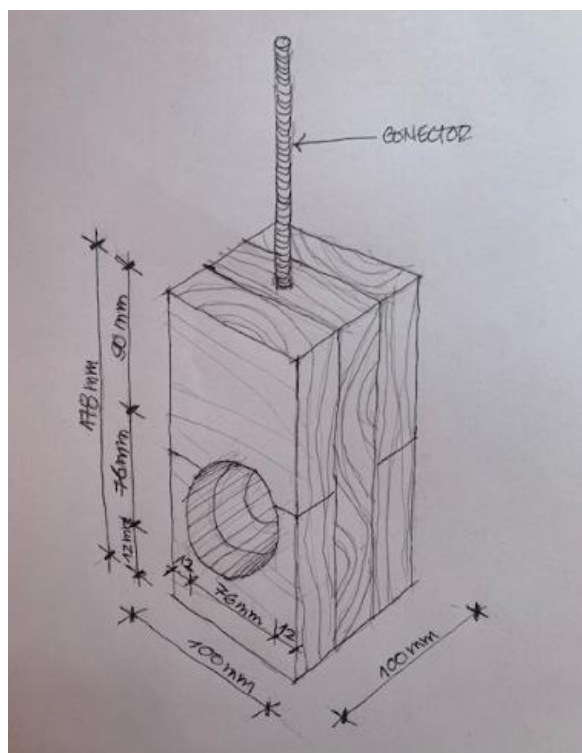
Os ensaios de cisalhamento na linha de cola e resultados são mostrados no Quadro 4.14 e nas figuras 5.35 e 5.36.

Figura 5.35 - Ensaio de cisalhamento**Figura 5.36 - Cisalhamento na linha de cola**

Fonte: Do autor.

5.3.2.5 Resistencia ao arrancamento do conector

Os ensaios de arrancamento na madeira foram realizados seguindo-se as prescrições da ASTM-D 1761(1994). O objetivo do ensaio foi verificar o desempenho ao arrancamento do conector proposto na ligação com o painel de madeira. O corpo de prova foi preparado com as dimensões de 100x100x178 mm e furo com 76 mm de diâmetro, conforme pode-se observar na figura 5.37

Figura 5.37- Corpo de prova para arrancamento

Fonte: Do autor.

Os ensaios foram executados na máquina universal DL30000, da marca EMIC, com capacidade para 300 kN. Também foi utilizado o acessório para o ensaio de arrancamento, conforme mostrado na figura 5.37. O deslizamento relativo, entre a barra de aço e o corpo de prova de madeira, foi medido através de dois transdutores de deslocamento, com curso de 50 mm.

Figura 5.38 - Acessório para o ensaio de arrancamento e transdutores de deslocamento



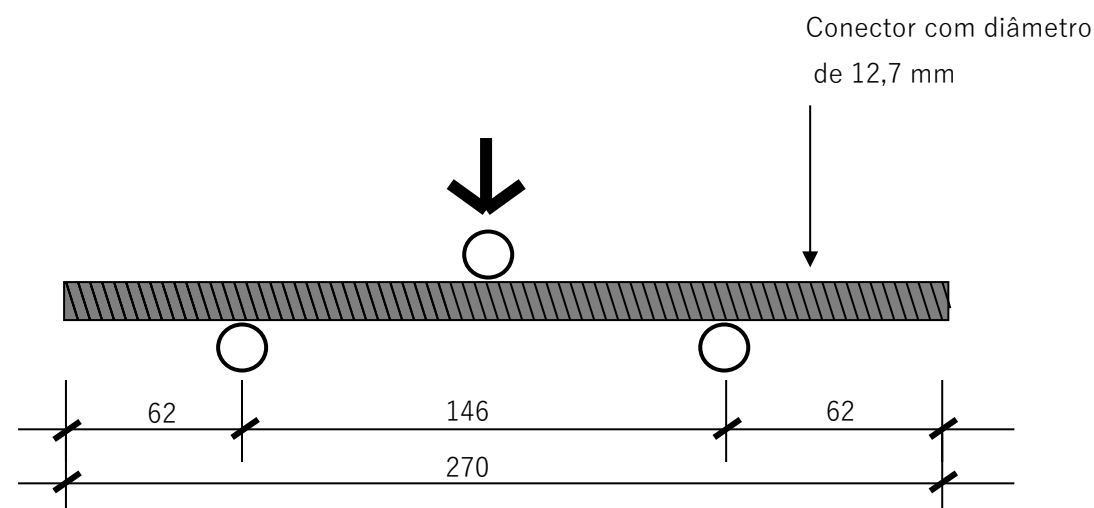
As leituras de carga e deslizamento foram feitas utilizando-se o sistema de aquisição de dados da máquina universal, conectado a um microcomputador. Todos os ensaios foram automatizados com o uso de um script (ou programa), o que possibilitou sua execução com controle de deslocamentos. A velocidade adotada foi de 2,55 mm/min.

5.3.2.6 Ensaio para determinação do momento de plastificação

Para a execução dos ensaios foi utilizada a prensa hidráulica EMIC – DL 30000 de 300 kN. O transdutor de deslocamento foi fixado com sua haste por baixo de uma placa metálica presa no êmbolo móvel da prensa, conforme pode-se observar na figura 5.40. As leituras de carga e deslocamento foram feitas utilizando-se o sistema de aquisição de dados da DL30000, conectado a um microcomputador. A taxa de carregamento adotada para o ensaio foi a de 10 MPa/min.

Foram realizados 6 ensaios de verificação do momento de plastificação dos conectores, de acordo com a norma ASTM F 1575-03:2013. O ensaio foi realizado com o conector submetido ao esforço de flexão em três pontos e a distância entre apoios (S_{bp}) de 146 mm, ou seja, 11,5 d. A figura 4.41 ilustra o esquema do ensaio.

Figura 5.39 – Esquema de ensaio de flexão do conector (medidas em mm)



Fonte: Do autor.

O momento de plastificação do conector foi determinado pela equação:

$$M_{y,T} = \frac{P \cdot S_{bp}}{4} \quad (\text{E5.9})$$

Sendo:

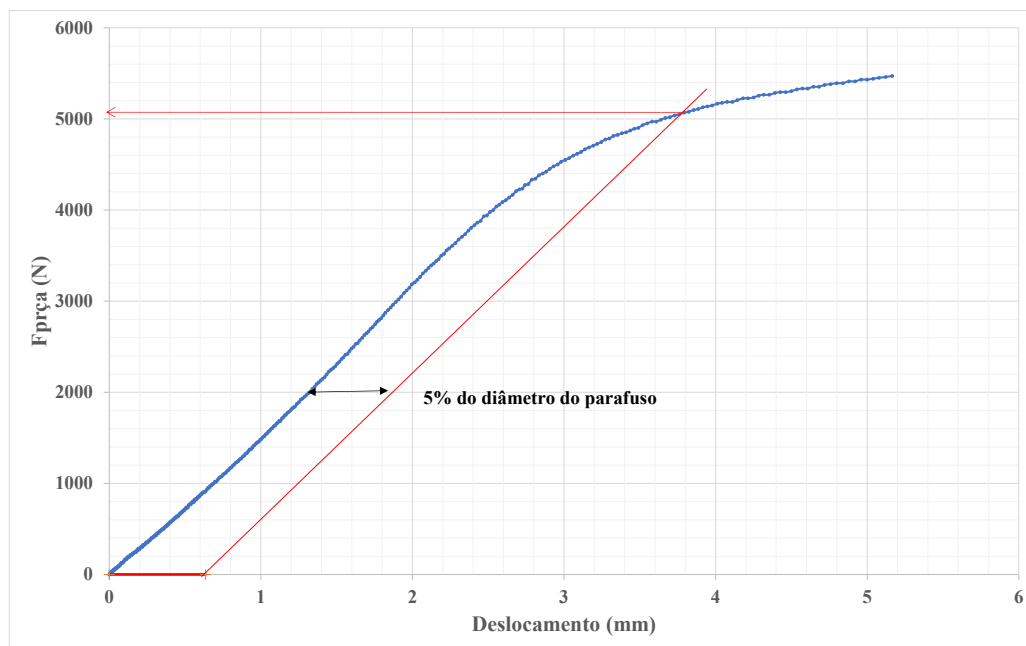
$M_{y,T}$ - momento de plastificação do conector (N.mm),

P - força de escoamento (N)

S_{bp} - distância entre apoios

Os gráficos força-deslocamento foram plotados após os ensaios. As forças de escoamento do conector, para cálculo do momento de plastificação, foram obtidas pela paralela a parte linear do gráfico, deslocada em 5% do diâmetro do conector. O valor é obtido pela interseção dessa reta paralela com a curva, conforme se pode verificar na figura 5.40.

Figura 5.40 – Gráfico força de arrancamento x deslocamento. Determinação da força de arrancamento máxima



Fonte: Do autor.

Pode-se verificar o ensaio para determinação do momento de plastificação do conector na figura 5.41.

Figura 5.41- Ensaio para determinação do momento de plastificação do conector



Fonte: Do autor.

5.4 Resultados e discussões da campanha experimental final– materiais

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios em forma resumida e em gráficos. Será feita uma análise de dados com a principal finalidade de determinar os valores característicos de cada propriedade do material. Para isso é necessário que cada série de resultados não apresente outliers e tenha uma distribuição normal.

Os resultados de ensaio para determinação da densidade aparente para cada tipo de painel estão apresentados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Resultados de ensaio de densidade aparente para os painéis de CLT

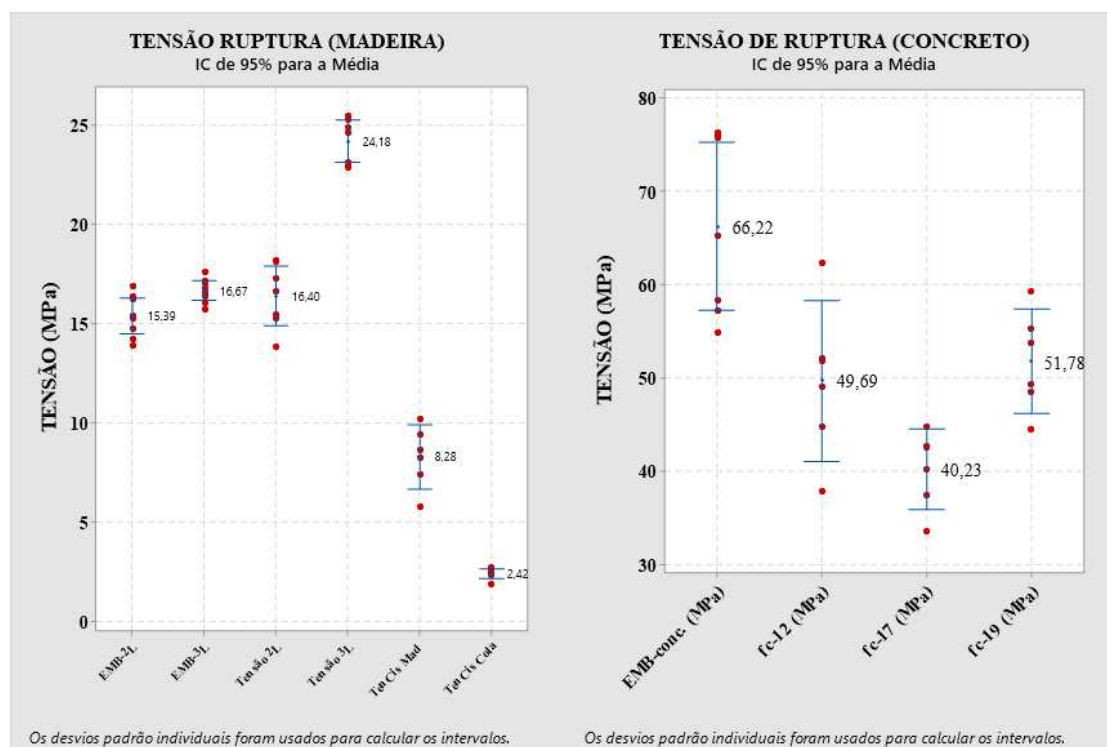
Painel CLT	DENSIDADE								
	CPs (Kg/m ³)						Média (Kg/m ³)	Desvio Padrão (Kg/m ³)	Coefficiente Variação (%)
M1	549	518	377	505	378	479	564	19,9	3,53
M2	541	517	429	505	403	495	522	10,7	2,05
M3	549	527	431	502	367	460	421	21,9	5,20
M4	585	507	435	484	404	486	501	9,2	1,83
M5	569	524	433	511	391	482	389	14,3	3,67
M6	587	539	424	500	388	502	484	14,7	3,03

Fonte: Do autor.

5.4.1 Apresentação dos resultados de ensaio

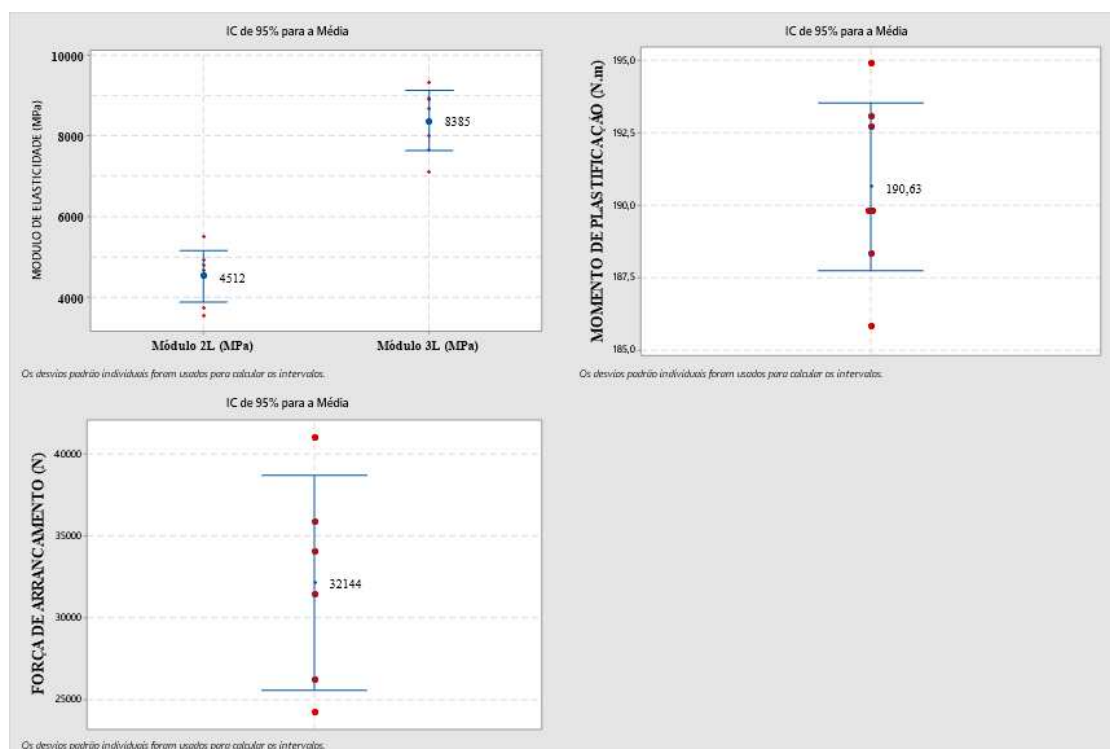
Nas figuras 5.41 e 5.42 estão apresentados as séries de valores com seus respectivos intervalos de confiança (IC) para um nível de confiança de 95%. Observando os gráficos pode-se afirmar que a qualidade dos resultados de ensaio foi boa. Os coeficientes de variação (Cv) dos ensaios realizados estão mostrados na coluna 4 da Tabela 5.1 Como quase todos os coeficientes de variação dos resultados obtidos foram homogêneos (baixa dispersão) com $Cv \leq 15\%$ e apenas a tensão de ruptura do adesivo, a tensão de ruptura do concreto (f_c-12) e a força de arrancamento do conector tiveram uma média dispersão para $15\% < Cv < 30\%$, pode-se concluir que os resultados obtidos nos ensaios experimentais foram de boa qualidade.

Figura 5.42 – Valores individuais e intervalo de confiança de cada série, para um nível de confiança de 95%



Fonte: Do autor.

Figura 5.43 – Valores individuais e intervalo de confiança de cada série dos módulos de elasticidade e força de arrancamento, para um nível de confiança de 95%



Fonte: Do autor.

A ordem dos CPs para realização dos ensaios foi selecionada aleatoriamente. Antes de qualquer análise estatística, foi feita uma verificação dos valores outlier e se a amostra segue uma distribuição normal.

5.4.2 Verificação de valores outlier de cada série

Um outlier é uma observação atípica. Quando houve outlier, identificou-se a causa de todos e corrigiram-se os valores e quando não foi possível determinar as causas, foram removidos. O teste utilizado foi o de Grubbs

Para encontrar um outlier foi adotada uma hipótese nula e uma alternativa. A hipótese nula (H_0) e alternativa são duas declarações mutuamente exclusivas sobre uma população. Um teste de hipótese usa dados amostrais para determinar se deve rejeitar a hipótese nula. A hipótese nula indica que todos os valores de dados provêm da mesma distribuição normal. A hipótese alternativa indica que o menor ou o maior valor dos dados é um outlier.

O nível de significância, α , adotado foi de 0,05. Um nível de significância de 0,05 indica que o risco de se concluir que existe uma diferença, quando, na verdade, não existe nenhuma diferença real, é de 5%.

Para determinar se um outlier existe, compare-se o p-value ao nível de significância.

Valor de $p \leq \alpha$: Existe um outlier (rejeite H_0). Se o valor de p é menor ou igual ao nível de significância, rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que existe um outlier.

Valor de $p > \alpha$: Não é possível concluir que existe um outlier (não deve rejeitar H_0). Se o valor de p é maior do que o nível de significância, não deve-se rejeitar a hipótese nula, porque não há evidências suficientes para concluir que existe um outlier.

Este estudo de outliers foi feito para todas as séries de valores de ensaios. Como exemplo é apresentado, na figura 5.44, a resposta fornecida pelo software Minitab 19 para a série de valores do embutimento da madeira na direção 2L (EMB-2L).

Figura 5.44 – Resposta fornecida pelo software Minitab 19 para a série de valores do embutimento da madeira na direção 2L

WORKSHEET 1

Teste de Outlier: EMB-2L

Método

Hipótese nula Todos os valores de dados são provenientes da mesma população normal

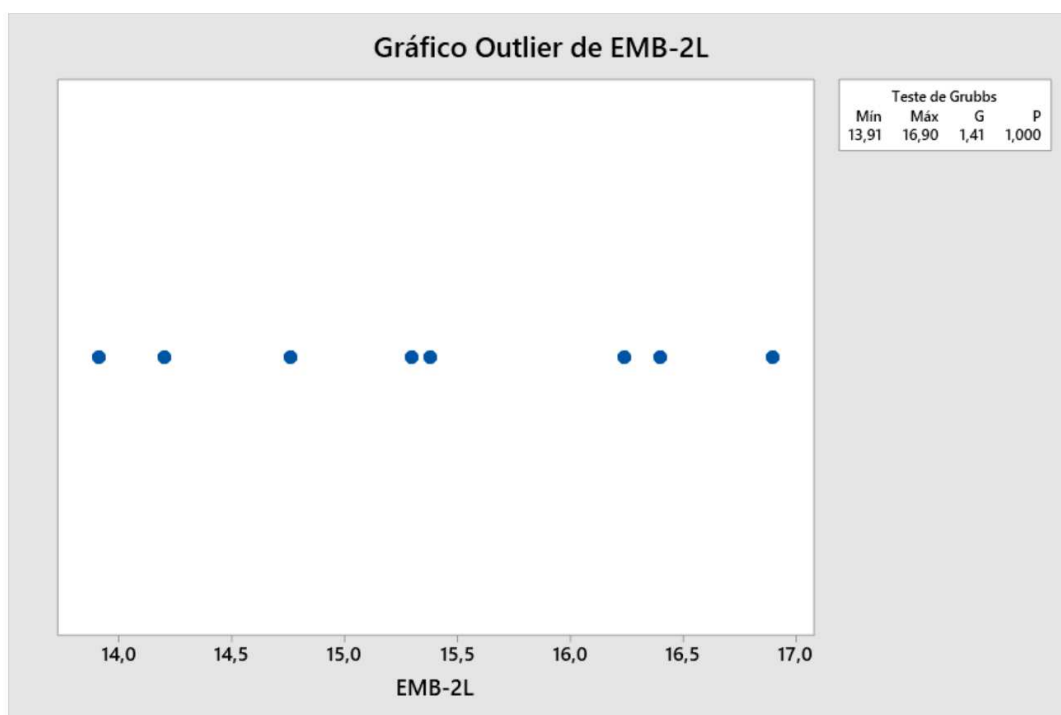
Hipótese alternativa O menor ou o maior valor dos dados é um outlier

Nível de significância $\alpha = 0,05$

Teste de Grubbs

Variável	N	Média	DesvPad	Mín	Máx	G	P
EMB-2L	8	15,386	1,071	13,910	16,900	1,41	1,000

* NOTA * Nenhum outlier no nível de significância 5%



Fonte: Do autor.

Na Tabela 5.2 são apresentadas todas as análises de todas as séries de valores dos resultados dos materiais. Como o valor de p-value é maior que o nível de significância ($p\text{-value} > p=0,05$), não se deve rejeitar a hipótese nula, porque não há evidências suficientes para concluir que existe um outlier. Assim com nível de confiança de 95% podemos afirmar que é possível que não exista, nas séries de valores, nenhum outlier.

Tabela 5.2 – Teste de Grubbs para outliers em todos os resultados experimentais com $\alpha = 0,05$,

(MPa)									
Variável	N	Média	D.P.	C.V. %	Min	Máx	G	p-value	Outlier
EMB-2L	8	15,39	1,07	7%	13,91	16,90	1,41	1,000	OK
EMB-3L	8	16,67	0,60	4%	15,75	17,60	1,56	0,746	OK
Tensão 2L	7	16,40	1,62	10%	13,87	18,17	1,56	0,610	OK
Módulo 2L	7	4512	695	15%	3514	5506	1,44	0,884	OK
Tensão 3L	7	24,18	1,15	5%	22,88	25,50	1,15	1,000	OK
Módulo 3L	7	8385	809	10%	7102	9336	1,59	0,563	OK
TenCisMad	6	8,28	1,55	19%	5,78	10,18	1,62	0,358	OK
TenCis Cola	7	2,42	0,26	11%	1,89	2,71	2,00	0,061	OK
EMB-conc.	7	66,22	9,71	15%	54,82	76,32	1,17	1,000	OK
fc-12	6	49,69	8,19	16%	37,85	62,37	1,55	0,484	OK
fc-17	6	40,23	4,11	10%	33,62	44,78	1,61	0,374	OK
fc-19	6	51,78	5,32	10%	44,49	59,27	1,41	0,779	OK
My (N.m)	7	190,63	3,13	2%	185,78	194,91	1,55	0,636	OK
Arran (N)	6	32145	6253	19%	24200	41066	1,43	0,734	OK

Fonte: Do autor.

5.4.3 Verificação da distribuição normal de cada série

Para verificação da distribuição normal das séries, foi feito o teste de Anderson-Darling. Este teste é geralmente mais eficaz para a detecção de não normalidade nas caudas de distribuição.

Para determinar se os dados não seguem uma distribuição normal, compare-se o valor de p-value com o nível de significância. Geralmente, um nível de significância $\alpha = 0,05$ funciona bem. Um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de concluir que os dados não seguem a distribuição normal quando eles realmente a seguem.

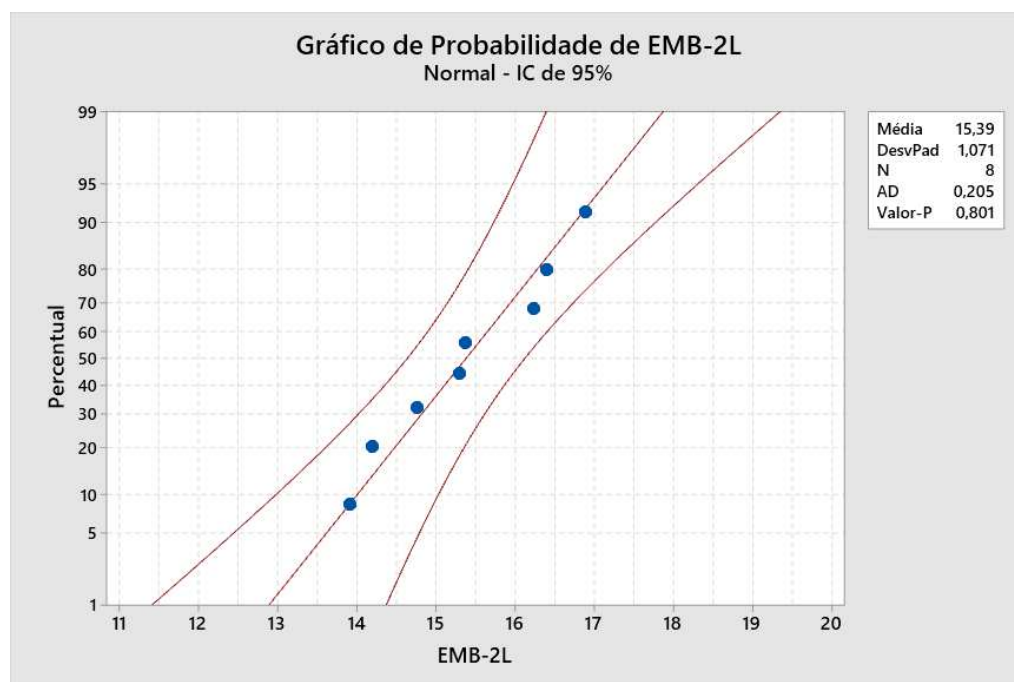
Valor de $p \leq \alpha$: Os dados não seguem uma distribuição normal (Rejeita-se H_0). Se o valor de p for menor ou igual ao nível de significância, deve-se rejeitar a hipótese nula e concluir que os dados não seguem a distribuição normal.

Valor de $p > \alpha$: Não é possível concluir que os dados não seguem uma distribuição normal (não se deve rejeitar H_0). Se o valor de p for maior do que o nível

de significância, não se deve rejeitar a hipótese nula. Não há evidências suficientes para concluir que os dados não seguem uma distribuição normal.

A seguir é apresentado na figura 5.45, como exemplo, o gráfico plotado pelo minitab 19. Observando o gráfico, com o p-value de 0,801 > 0,05 pode-se concluir, com nível de confiança de 95%, que a série de valores segue uma distribuição normal.

Figura 5.45 – Exemplo de resultado apresentado pelo Minitab 19. Embutimento direção 2L



Fonte: Do autor.

Na Tabela 5.2 são apresentadas todas as análises de todas as séries de valores dos resultados dos materiais. Como o valor de p-value é maior que o nível de significância ($p\text{-value} > \alpha = 0,05$), não se deve rejeitar a hipótese nula, porque não há evidências suficientes para concluir que os dados não seguem uma distribuição normal. Assim com nível de confiança de 95% pode-se afirmar que é possível que as séries de valores tenham uma distribuição normal.

Tabela 5.3 – Teste de Anderson-Darling para norma resultados experimentais com $\alpha = 0,05$, (MPa)

Variável	AD	p-value	Normalidade
EMB-2L	0,205	0,801	Dist. Normal
EMB-3L	0,104	0,991	Dist. Normal
Tensão 2L	0,253	0,608	Dist. Normal
Módulo 2L	0,307	0,464	Dist. Normal
Tensão 3L	0,529	0,113	Dist. Normal
Módulo 3L	0,289	0,510	Dist. Normal
TenCisMad	0,173	0,873	Dist. Normal
TenCis Cola	0,450	0,187	Dist. Normal
EMB-conc.	0,568	0,087	Dist. Normal
fc-12	0,219	0,710	Dist. Normal
fc-17	0,269	0,534	Dist. Normal
fc-19	0,167	0,886	Dist. Normal
My (N.m)	0,212	0,762	Dist. Normal
Arrancam. (N)	0,172	0,876	Dist. Normal

Fonte: Do autor.

5.4.4 Determinação dos valores característicos

Os valores característicos das propriedades mecânicas dos materiais serão determinados a partir do intervalo de confiança da população de cada propriedade com um nível de confiança de 95%. Para isso será realizado o teste t para uma amostra pelo minitab 19.

O teste t para uma amostra é usado para estimar a média de uma população quando não se conhece o desvio padrão da população. Usando esta análise pode-se determinar o intervalo de confiança (IC) que, provavelmente, inclui a média de uma população.

Para se garantir que os resultados sejam válidos, foram consideradas as seguintes diretrizes ao coletar dados, realizar a análise e interpretar os resultados:

- O desvio padrão da população não é conhecido;
- Os dados devem ser contínuos. Dados contínuos têm um número infinito de valores entre quaisquer dois valores;

- Os dados amostrais não devem ser severamente assimétricos;
- Os dados da amostra devem ser selecionados aleatoriamente;
- Cada observação deve ser independente de todas as outras observações;
- Eliminar todos os valores outlier;
- A amostra deve ter uma distribuição normal.

A equação E5.1 determina o intervalo de confiança da média da população,

$$\mu \in \left(\bar{X} \pm t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad \text{ou} \quad \bar{X} - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} + \bar{X} \quad \text{E5.1}$$

Onde:

μ é a média da população

\bar{X} é a média da amostra

$t_{\alpha/2}$ a probabilidade acumulada inversa de uma distribuição t com $n-1$ graus de liberdade em $1-\alpha/2$

α é o nível de significância 0,05 ou 5%

S o desvio padrão da amostra

n o tamanho da amostra.

Segundo a NBR 7190, “O valor característico inferior $X_{k,\text{inf}}$, menor que o valor médio, é o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido em um dado lote de material. De modo geral, salvo especificação em contrário, entende-se que o valor característico X_k seja o valor característico inferior $X_{k,\text{inf}}$. Admite-se que as resistências das madeiras tenham distribuições normais de probabilidades.”, assim o valor característico, considerando o IC, será o limite inferior (X_k), equação E5.2

$$X_k = \bar{X} - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{E5.2}$$

Apresentamos a seguir, o teste t para uma amostra com a determinação do intervalo de confiança com nível de significância de $\alpha = 0,05$, ou nível de confiança de 95%, feito para todas as séries de valores de ensaios. Como exemplo, é apresentado, na figura 5.46, a resposta fornecida pelo software Minitab 19 para a série de valores

do embutimento da madeira na direção 2L (EMB-2L). Nesta figura, observa-se o IC da média da população (μ) igual a (14,491; 16,282) com nível de significância de 95%. Assim, o valor característico da propriedade embutimento da madeira CLT na direção 2L, representado pelo símbolo ($f_{e,CLT,2L}$), será $f_{e,CLT,2L} = 14,49$ MPa.

Figura 5.46 – Exemplo de resultado apresentado pelo Minitab 19. Embutimento direção 2L



Fonte: Do autor.

Na Tabela 5.4 são apresentadas, para todas as séries de valores dos resultados dos materiais, as respostas fornecidas pelo software minitab 19. Com os valores dos ICs foram determinados os valores característicos de todos os materiais. Na coluna 6 é mostrada a simbologia adotada e na coluna 7 o valor característico da propriedade com nível de confiança de 95%.

Tabela 5.4 – Valores característicos das propriedades dos materiais com nível de confiança de 95%, (MPa)

Propriedade	N	Média	D.P.	IC	Simbologia	Resistência Característica
EMB-2L (MPa)	8	15,39	1,07	(14,491; 16,282)	$f_{e,CLT-2L,k}$	14,49
EMB-3L (MPa)	8	16,67	0,60	(16,170; 17,167)	$f_{e,CLT-3L,k}$	16,17
Tensão 2L (MPa)	7	16,40	1,62	(14,900; 17,892)	$f_{c,CLT-2L,k}$	14,90
Módulo 2L(MPa)	7	4512	695	(3870; 5155)	$E_{c,CLT-2L,k}$	3870

Tensão3L (MPa)	7	24,18	1,15	(23,115; 25,245)	$f_{c,CLT-3l,k}$	23,12
Módulo 3L (MPa)	7	8385	809	(7637; 9133)	$E_{c,CLT-3l,k}$	7637
TenCisMad (MPa)	6	8,28	1,55	(6,661; 9,906)	$f_{s,CLT,k}$	6,66
TenCis Cola(MPa)	7	2,42	0,26	(2,1724; 2,6590)	$f_{a,CLT,k}$	2,17
EMB-conc. (MPa)	7	66,22	9,71	(57,24; 75,20)	$f_{e,c,k}$	57,24
fc-12 (MPa)	6	49,69	8,19	(41,09; 58,29)	$f_{c,c-12,k}$	41,09
fc-17 (MPa)	6	40,23	4,11	(35,92; 44,54)	$f_{c,c-17,k}$	35,92
fc-19 (MPa)	6	51,78	5,32	(46,20; 57,37)	$f_{c,c-19,k}$	46,20
My (N.m)	7	190,63	3,13	(187,74; 193,53)	$M_{y,par,k}$	187,74
Arranca. (N)	6	32145	6253	(25582; 38707)	$F_{arr,par}$	25582

Fonte: Do autor.

6 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DOS MODELOS

Os ensaios finais dos modelos dessa pesquisa foram organizados em três linhas distintas de investigação, quais sejam:

- Desenvolvimento de análise teórica considerando a formulação do EUROCODE 5, Teoria de Johansen, comparando os resultados obtidos com os resultados experimentais, analisando as cargas últimas experimentais e as avaliadas teoricamente.
- Ensaios experimentais de cisalhamento direto para determinação da carga de ruptura, usando o estudo da ligação de CLT e concreto (MCM) e CLT com CLT (MMM). Nesses ensaios analisaram-se o comportamento das ligações estruturais e, posteriormente, comparados os resultados entre si.
- Determinação do módulo de deslizamento avaliando a rigidez das ligações.

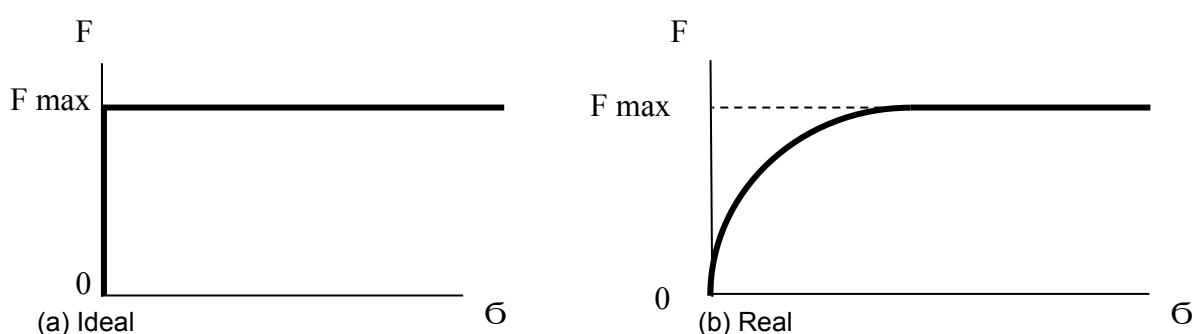
6.1 Desenvolvimento da análise teórica – considerações iniciais

Para o desenvolvimento da análise teórica foram tomadas como referência as equações de Johansen, formuladas no EUROCODE 5, que tem sido largamente utilizadas para prever o modo de falha de conexões de madeira em condições ambientais. Os cálculos são feitos a partir da espessura da madeira, do momento de escoamento do conector e diâmetro do mesmo, assim como, da força aplicada na madeira. Muito se tem produzido com relação a pesquisas de ligações de madeira e concreto utilizando-se conectores metálicos. No entanto, os trabalhos de referência, apesar do relativo tempo de publicação, ainda continuam atuais e citados em inúmeras pesquisas.

6.1.1 Teoria do escoamento de Johansen – teoria europeia de escoamento

De acordo com *Timber Engineering STEP 1* (1995), uma suposição importante para a derivação da equação de carga final de Johansen, é que o conector e a madeira devem se comportar como materiais rígidos ideais. Isso significa que, quando a carga é aplicada, agindo sobre o conector na madeira, nenhum movimento vai ser detectado até que a carga alcance o valor máximo, conforme mostrado na figura 6.1 (a). Quando a carga alcança o valor máximo a taxa de embutimento da força é constante. Entretanto, a madeira não se comporta como um material rígido. Uma curva realística de carga aplicada na madeira é mostrada na figura 6.1 (b). Tipicamente, enquanto a carga aumenta a taxa de embutimento aumenta. Quando a carga alcança seu valor máximo a taxa de embutimento se torna constante.

Figura 6.1– Aplicação de carga na madeira



Fonte: Do autor.

6.1.1.1 Nomenclatura para as equações de Johansen

As variáveis usadas nas equações de Johansen são descritas e listadas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1- Lista das variáveis utilizadas por Johansen

VARIÁVEIS	DESCRIÇÃO	UNIDADE
T	Espessura da madeira	mm
f_h	Tensão incorporada	kN/mm ²
$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$	Fração característica da força de embutimento	[-]
D	Diâmetro do conector	mm

M_y	Momento característico de escoamento do conector	kN mm
F	Força resistente característica por plano de cisalhamento por conector	kN
$F_{ax,Rk}$	Força de axial de tração característica do conector	kN
Subscrito 1	Membros laterais	[-]
Subscrito 2	Membros centrais	[-]
Subscrito k	Valor característico	[-]
Subscrito d	Valor de projeto	[-]

Fonte: Do autor.

Nas expressões de Johansen, o primeiro termo do lado direito é a capacidade de carga de acordo com sua teoria, enquanto que o segundo termo $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ é a contribuição do efeito corda. A contribuição para a capacidade de carga devido ao efeito corda deve ser limitada aos seguintes percentuais da parte de Johansen:

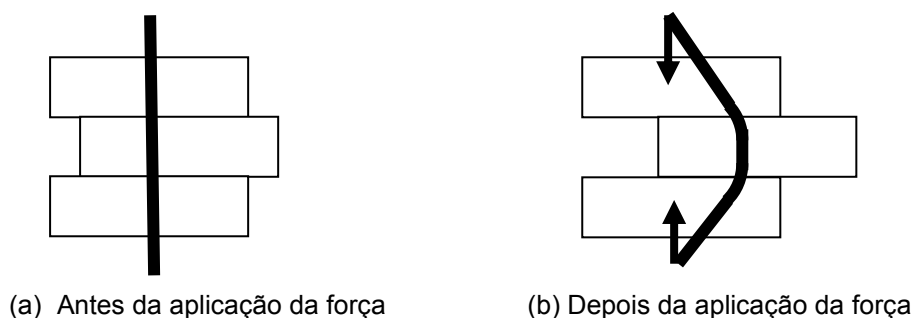
- Pregos com seção circular 15%;
- Pregos com seção quadrada 25%;
- Outros pregos 50%;
- Parafusos (auto-atarraxantes) 100%;
- Parafusos (com rosca soberba) 25%;
- Cavilha 0%.

6.1.1.2 Equações de Johansen

As equações de Johansen podem ser classificadas em duas grandes categorias chamadas de conexões madeira/madeira (ou produtos de madeira) e conexões aço/madeira. Para conexões madeira/madeira, os membros estruturais são constituídos somente de produtos de madeira, enquanto, nas conexões aço/madeira, placas de aço são usadas ou como membros laterais ou centrais na conexão da estrutura. Dentro de cada categoria as equações são subdivididas por conexões com um único plano de corte ou com duplo plano de corte. Thelandersson e Hans (2003) e Timber Engineering STEP 1 (1995), chegaram a equações semelhantes as equações de Johansen, enquanto, o EUROCODE 5 (2004), chegou a equações ligeiramente diferentes. O EUROCODE 5 (2004) identificou a importância da

consideração do efeito corda à resistência da conexão e, assim, incluiu as funções do seu efeito nas equações originais de Johansen. O efeito corda é o termo usado para descrever o efeito de aperto dos conectores nas conexões de madeira enquanto estão sujeitos a flexão, ver figura 6.2

Figura 6.2 - Efeito corda nas conexões com conectores metálicos

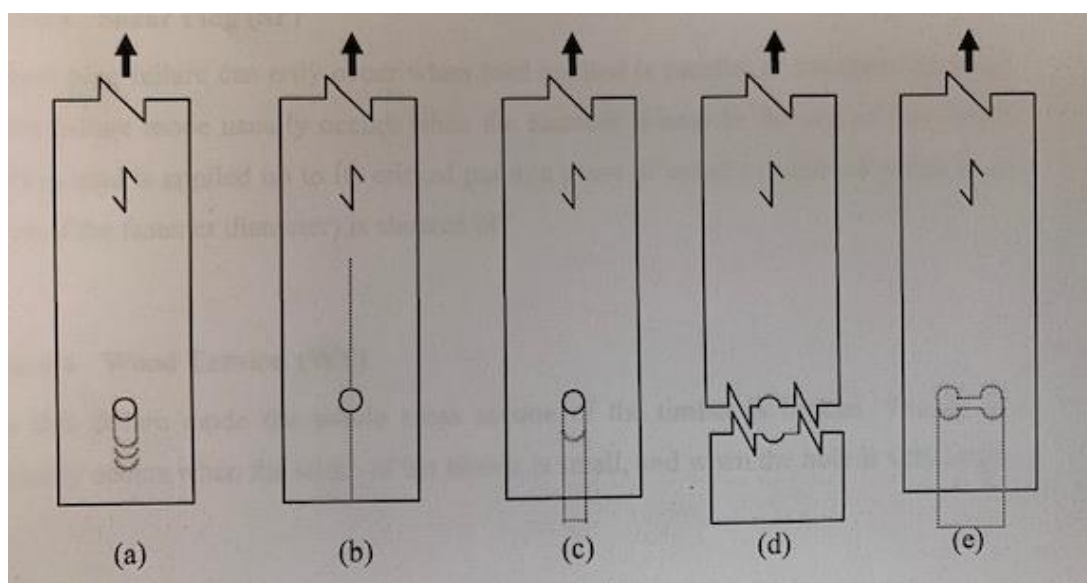


Fonte: Do autor.

6.1.1.3 Modo potencial de falha da madeira

De acordo com Quenneville e Mohammad (2000), existem quatro modos de falha que podem ocorrer quando a madeira é submetida a cargas maiores que as máximas suportadas, ou seja, sua carga última. Esses modos de falha são: embutimento (a), rompimento (b), cisalhamento na conexão (c), corte na madeira (d), arrancamento (e). Esses modos de falha são mostrados na figura 6.3.

Figura 6.3 - Modos de falha na madeira segundo Quenneville e Mohammad (2000)



↙ Direção das fibras ↑ Direção da força

Fonte: Do autor.

A falha de corte na madeira figura 6.3 (d), geralmente ocorre quando a secção da peça é pequena.

Passa-se a descrição de cada modo de falha a seguir:

(a) Embutimento:

Esse fenômeno ocorre quando a carga é aplicada e o conector começa a se deslocar para dentro da madeira. A madeira é um material relativamente macio e vai absorver a força com o esmagamento das fibras. Esse modo de falha pode ocorrer quando a carga aplicada é paralela ou normal a direção das fibras e, também, quando a distância entre o conector e o final da madeira, na direção da força, é razoavelmente grande. Quando a carga aplicada é perpendicular a direção das fibras, a deformação por embutimento é menor que a provocada quando a direção da carga é paralela as fibras. Isso se deve a fragilidade da resistência da madeira no sentido das fibras.

(b) Rompimento:

Geralmente ocorre ao longo da linha mais fraca, paralela à direção das fibras, e é causada, principalmente, pela tensão perpendicular a fibra. Quando a carga aplicada alcança o valor crítico da madeira ela se divide ao longo da direção das fibras.

(c) Cisalhamento na conexão:

Só pode ocorrer quando a carga aplicada é paralela à direção das fibras. Esse modo de falha normalmente ocorre quando o conector está próximo a borda da madeira. Quando a carga é aplicada até o ponto crítico, uma parte da madeira – geralmente da mesma largura do diâmetro do conector – é arrancada.

(d) Corte na madeira:

Nesse modo de falha, toda a seção transversal da madeira é rompida. Essa falha geralmente ocorre quando a largura da madeira é pequena ou quando o furo do conector é muito largo.

(e) **Arrancamento:**

Esse modo de falha é uma combinação do embutimento com o cisalhamento. Quando a carga é aplicada, a madeira, na linha dos conectores, é comprimida, sofre um embutimento e cisalha. Essa falha só acontece com conectores múltiplos.

Por outro lado, o EUROCODE 5, como já foi exposto anteriormente, também considera que o estado-limite da ligação pode ser alcançado pelo embutimento do pino na madeira ou pela flexão do pino com a formação de uma ou mais rótulas plásticas. Essas suposições fornecem seis modos de rupturas para ligações com um plano de cisalhamento e quatro modos de ruptura para ligações com dois planos de cisalhamento, que é o abordado nesse trabalho. Esses modos são mostrados na figura 6.4.

6.1.1.4 Modos de ruptura

Os **modos de ruptura Im e Is** representam o embutimento do pino na peça principal (índice m) e lateral(is) respectivamente (índice(s) s).

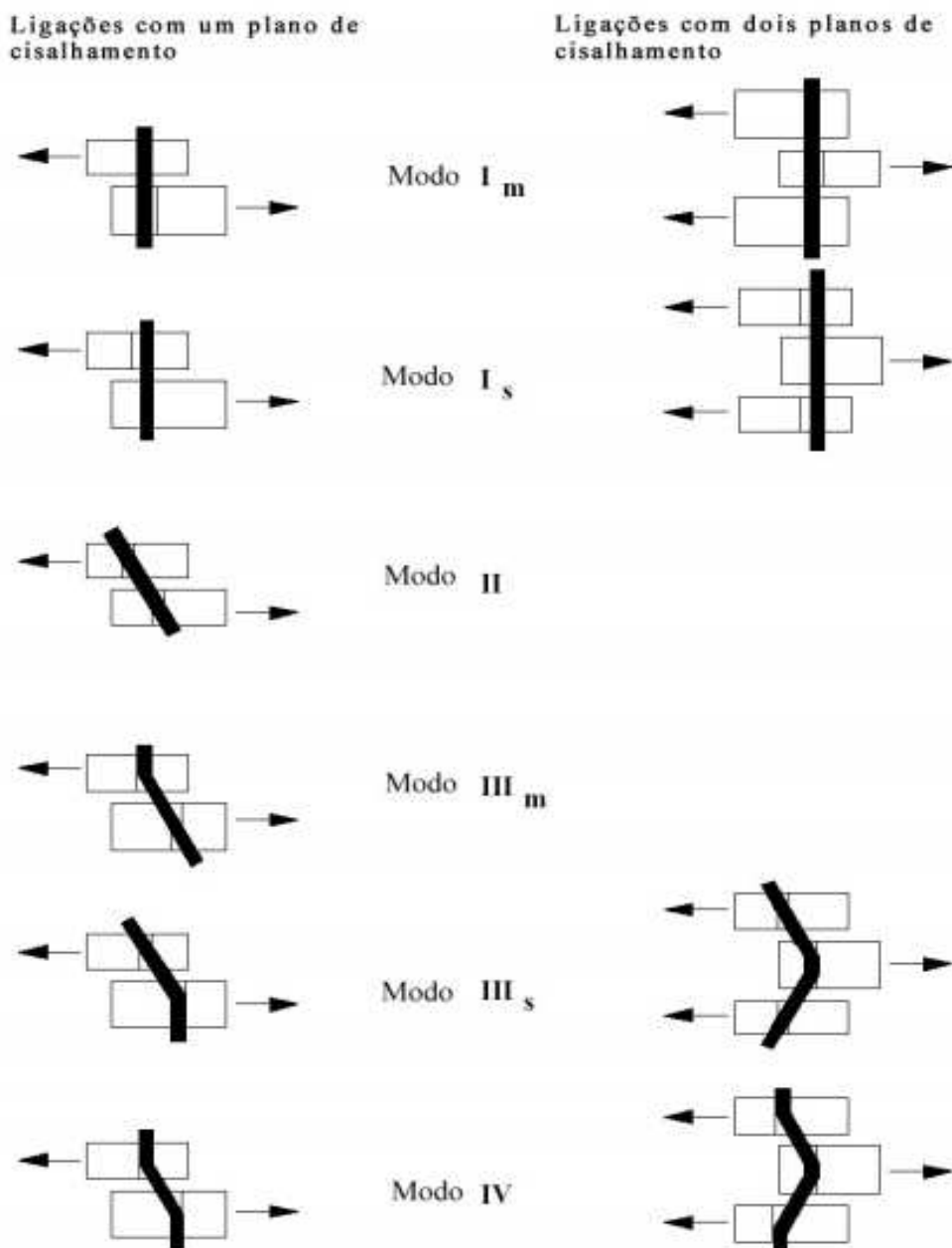
O **modo de ruptura II** representa a rotação do pino sem flexão e o embutimento do pino em ambas as peças.

O **modo de ruptura III_m** é o embutimento do pino na peça principal e a flexão do pino na(s) peça(s) lateral(is).

O **modo de ruptura III_s** representa o embutimento do pino na(s) peça(s) lateral(is) e a flexão do pino na peça principal.

O **modo de ruptura IV** representa a flexão do pino nas peças principal e lateral(is).

Figura 6.4 - Modos de ruptura das ligações segundo Eurocode 5



Fonte: Do autor.

Portanto, dos modos de ruptura listados acima, os que se mostram aplicáveis nessa pesquisa, por se tratar de dois planos de corte, são os modos de falha I_m , I_s , III_s , IV.

No modo de ruptura I_m , para ligações com dois planos de cisalhamento, o pino de aço se comportou como corpo rígido, não se deformou, e provocou um esmagamento da madeira na peça principal. O fator determinante do modo foi a

resistência ao embutimento das peças laterais ser maior que a da peça principal e a elevada capacidade resistente do pino ao escoamento.

No modo de ruptura **Is**, para ligações com dois planos de cisalhamento, o pino de aço também se comportou como corpo rígido, não se deformou, e provocou um esmagamento da madeira nas peças laterais. O fator determinante do modo foi a resistência ao embutimento das peças laterais ser menor que a da peça principal e a elevada capacidade resistente do pino ao escoamento.

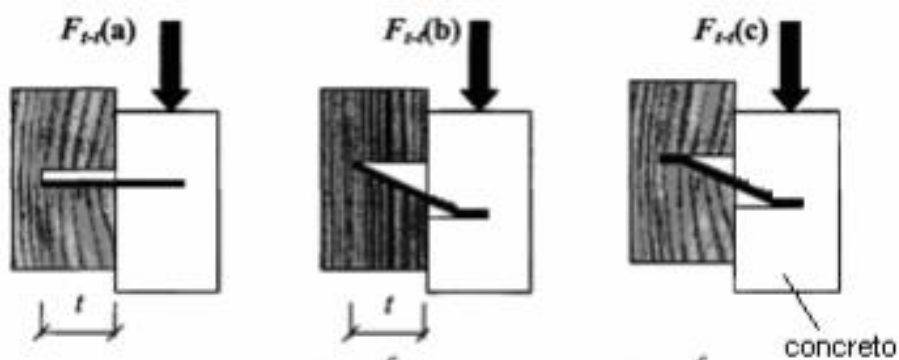
No modo de ruptura **IIIs**, para ligações com dois planos de cisalhamento, o pino de aço escoou, provocou a formação de uma rótula plástica na ligação com a peça principal, com pequeno esmagamento, e um esmagamento da madeira nas peças laterais. O fator determinante do modo foi a resistência ao embutimento das peças laterais ser menor que a capacidade resistente do pino e a capacidade de resistência da peça principal ser maior que a do aço, provocando uma rótula plástica e pequeno esmagamento da madeira.

No modo de ruptura **IV**, para ligações com dois planos de cisalhamento, o pino de aço escoou e provocou a formação de três rótulas plásticas nas ligações com a peça principal e laterais, com pequeno esmagamento da madeira em todas elas. O fator determinante do modo foi a capacidade resistente do pino não suportar a força aplicada e provocar a formação das três rótulas plásticas e pequeno esmagamento da madeira tanto na peça principal quanto nas laterais.

É importante salientar que, no caso da pesquisa em tela, uma das peças é de concreto armado. A estratégia adotada foi de considerar para o concreto o comportamento análogo ao da peça de madeira, no entanto, considerando a resistência à compressão do concreto, ou seja, o seu f_{ck} , com o valor verificado através de ensaios de compressão. Outras alternativas para os modos de falha foram apresentadas em pesquisas realizadas sobre o tema, entre as quais a de Carvalho (2008), que enriquecem as possibilidades de análise para os casos de ligações de concreto com madeira.

Segundo Carvalho (2008), citando estudos desenvolvidos por Dias (2005), para as ligações madeira-concreto, dos seis modos de ruptura apresentados pelo EUROCODE, somente ocorreram os três modos mostrados na figura 6.5, devido às restrições promovidas pelo concreto.

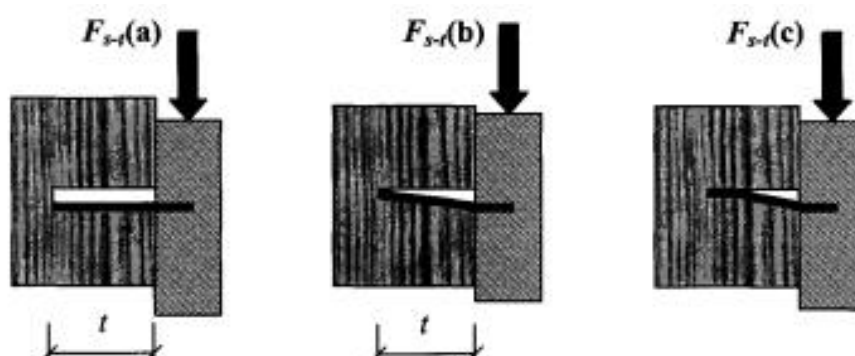
Figura 6.5 – Modos de ruptura para ligações madeira-concreto



Fonte: Dias (2005).

Para Dias (2005, *apud* CARVALHO, 2008), a principal limitação desse modelo de madeira-madeira, para avaliar o comportamento concreto-madeira, é a consideração do comportamento elasto-plástico perfeito para ambos os materiais. A plasticidade no concreto é limitada e ele mostra um comportamento frágil, usualmente resultante em esmagamento. Na realidade, os resultados experimentais mostraram que o concreto sob o pino é danificado, diminuindo sua resistência. Uma alternativa é considerar o comportamento do concreto como completamente rígido, e adotar os modelos para ligações entre peças de aço espessas e madeira. Neste caso, três diferentes modos de ruptura podem ser citados, conforme mostra a figura 6.6.

Figura 6.6 – Modos de ruptura para ligações madeira-aço



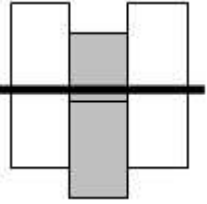
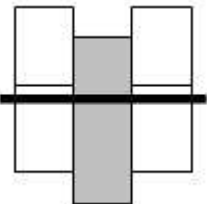
Fonte: Dias (2005).

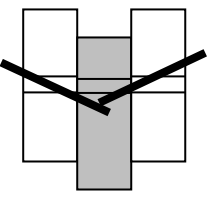
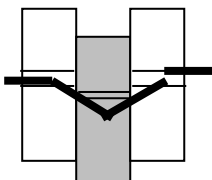
Segundo a autora, a consideração de engastamento perfeito do pino, no concreto, não representa totalmente a realidade, uma vez que sempre existe algum

dano localizado. O uso desses modelos desconsidera esses fenômenos, superestimando a capacidade resistente do concreto. Argumenta que, diante das considerações apontadas, Dias (2005), desenvolveu um estudo com objetivo de comparar os resultados teóricos, calculados a partir dos modelos propostos, com resultados experimentais. Dias (2005) executou ensaios de cisalhamento de acordo com a EN 26891(1991) e utilizou barras de aço de 8,0 mm e de 10,0 mm de diâmetro. O autor concluiu que o modelo aço-madeira foi o que apresentou resultados mais próximos aos experimentais. Além disto, os pinos mostraram uma grande capacidade de deformação plástica, para todas as amostras. O modo de ruptura foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço em dois pontos, com a formação de duas rótulas plásticas e esmagamento da madeira. Não foi observado nenhum movimento axial do pino com relação ao concreto e à madeira. Os danos que o pino provocou no concreto com alta resistência foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira. Nestes casos, o concreto atuou como um engaste perfeito e o esmagamento da madeira apresentou uma importância muito maior.

As equações de Johansen nesse trabalho, foram retiradas do EUROCODE 5 (2004). Dentre elas, as que são relevantes para essa pesquisa são mostradas no Quadro 6.2 a seguir:

Quadro 6.2 - Equações de Johansen com dois planos de corte ligações madeira/madeira

Modo de Falha	Equações	Modo de ruptura
	$F_{V,RK} = f_{h,1,k} t_1 d$ <p>(embutimento do pino na peça principal)</p>	Im (E6.1)
	$F_{V,RK} = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d$ <p>(embutimento do pino nas peças laterais)</p>	Is (E6.2)

	$F_{V,RK} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ <p>(embutimento do pino nas peças) laterais e a flexão do pino na peça principal</p>	IIIs (E6.3)
	$F_{V,RK} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ <p>(flexão do pino nas peças principal e laterais)</p>	IV (E6.4)

Fonte: Do autor.

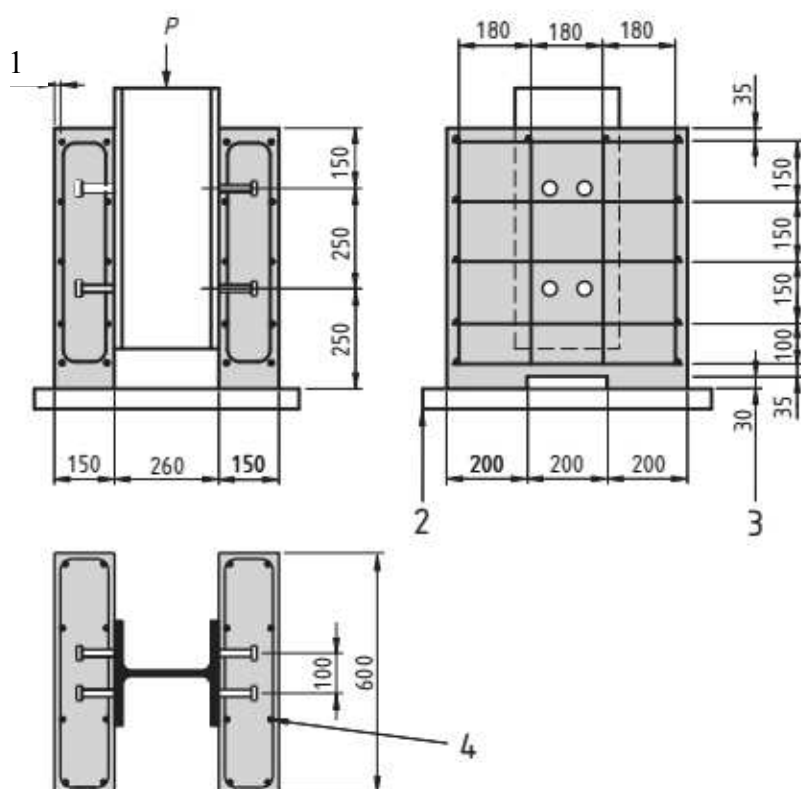
Segundo a Eurocode 5 (2004), nas expressões (E6.3 e E6.4), o primeiro termo do lado direito é a capacidade resistente de acordo com a teoria de escoamento de Johansen, enquanto o segundo termo $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ é a contribuição do efeito de cabo (ou corda). A contribuição para a capacidade de carga devido ao efeito do cabo deve ser limitada a 25% quando se usa parafusos passantes com porca e arruela e 100% para parafusos autoatarraxantes.

6.2 Ensaios experimentais de cisalhamento direto

Para o ensaio experimental, dada a ausência de um padrão para analisar esse caso particular de ligação de madeira com concreto, os modelos experimentais seguiram as recomendações do EUROCODE 4 e 5 e os procedimentos de ensaio de cisalhamento direto padrão, preconizados pela norma europeia EN 26891.

Para a armação da laje foram utilizadas barras de aço CA-50 com 10 mm de diâmetro e recobrimentos em conformidade com a norma.

Figura 6.7 – Modelo de Teste padrão de cisalhamento direto (EUROCODE 4)



AC1

Onde,

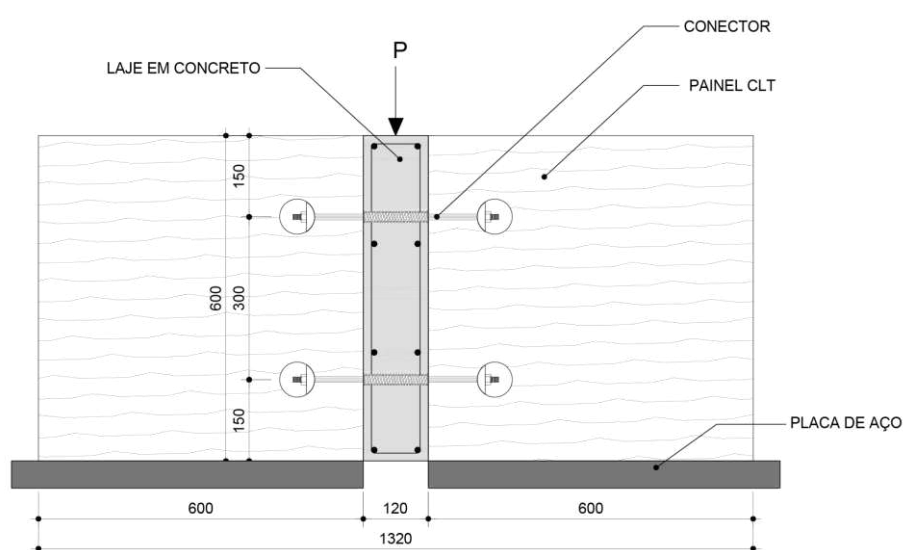
- 1 Cobrir 15mm
- 2 Em argamassa ou gesso
- 3 Vazio opcional
- 4 Reforço: barras de aço com 10mm diâmetro resultando numa ligação forte com $450 \leq f_{ck} \leq 550 \frac{N}{mm^2}$

Existem três modalidades de modelos para ensaios de cisalhamento direto em estruturas mistas de concreto e madeira:

- i) Componente central de madeira e componentes de concreto nas laterais;
- ii) Componente central de concreto e componentes de madeira nas laterais;
- iii) Apenas dois componentes, sendo um de madeira e outro de concreto.

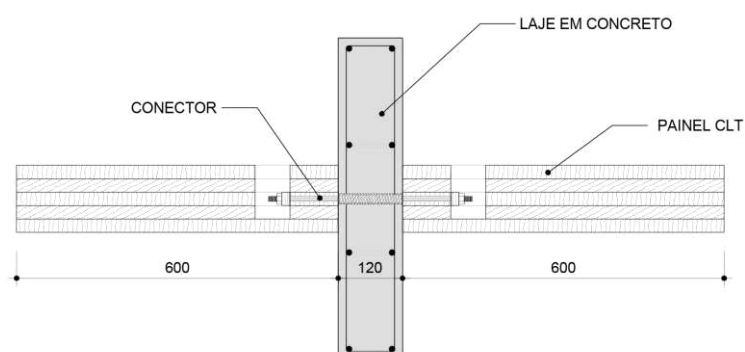
O arranjo do modelo adotado foi na modalidade com centro de concreto e nas laterais painéis de madeira laminada colada cruzada (CLT/concreto/CLT), tendo em vista que representa com bastante realidade a ligação entre os painéis CLT com a laje de concreto. Para execução dos ensaios foi montado o modelo em conformidade com o que mostram as figuras 6.8, 6.9 e 6.10.

Figura 6.8 - Seção longitudinal do modelo de teste de cisalhamento de ligação de laje de concreto com painéis de madeira CLT



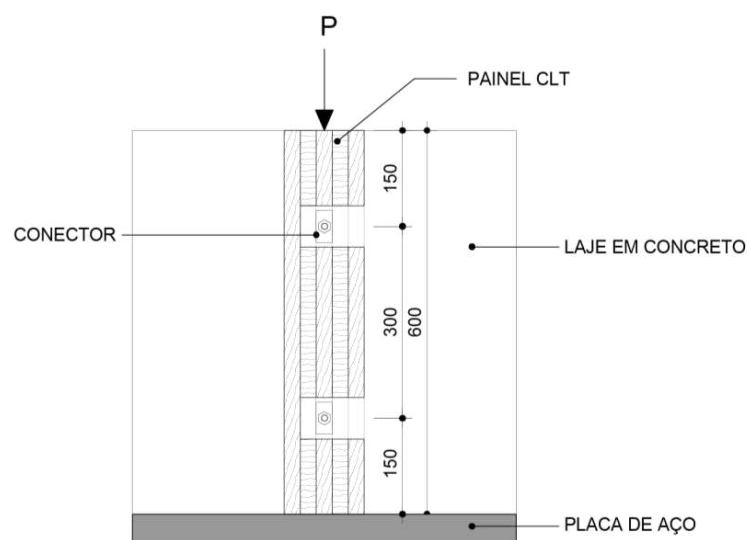
Fonte: Do autor.

Figura 6.9 - Planta do modelo de teste de cisalhamento de ligação de laje de concreto com painéis CLT



Fonte: Do autor.

Figura 6.10 - Seção transversal do modelo de teste de cisalhamento de ligação de laje de concreto com painéis de madeira CLT

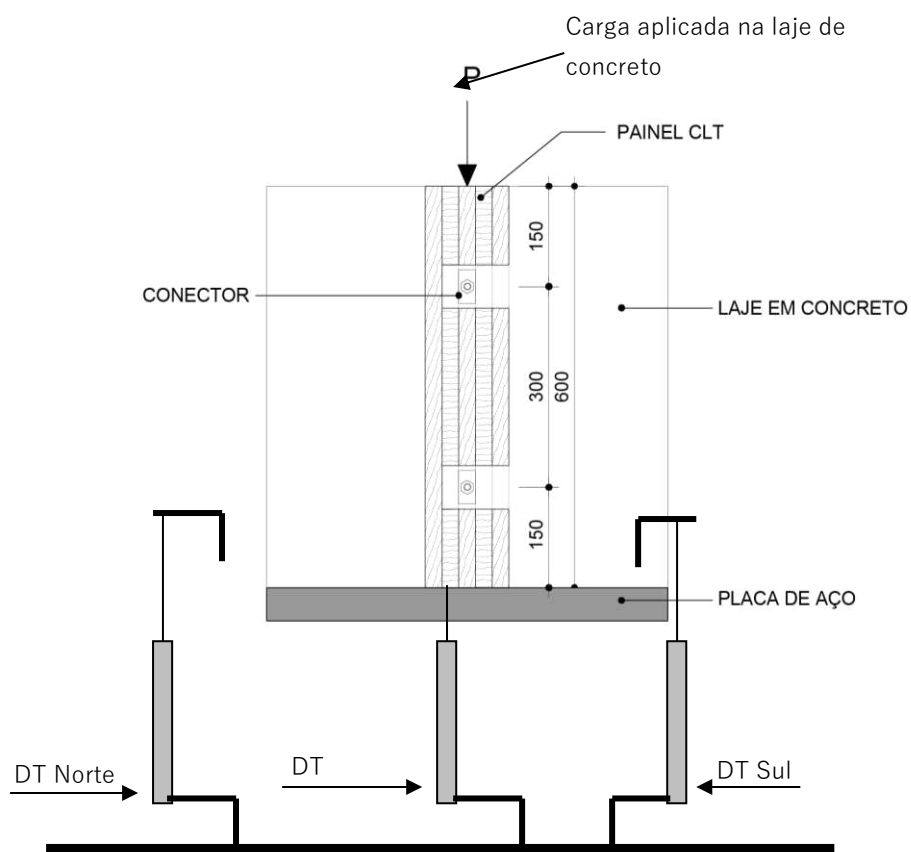


Fonte: Do autor.

Os ensaios de CLT/CLT/CLT, ou seja, de painéis CLT com CLT seguiram a mesma montagem aqui apresentada, substituindo a laje de concreto pelo painel de CLT.

6.2.1 Instrumentação

Para obtenção dos resultados dos ensaios foram utilizados três transdutores de deslocamento (DTs). Os DTs foram posicionados em três pontos distintos, ou seja, ao sul, ao centro e ao norte do modelo. Esses posicionamentos foram preparados de forma a medir os deslocamentos relativos entre a laje de concreto e os painéis de CLT. Pode-se verificar o posicionamento dos DTs nas figuras 6.11 e 6.12.

Figura 6.11 - Posicionamento dos DTs na laje de concreto

Fonte: Do autor.

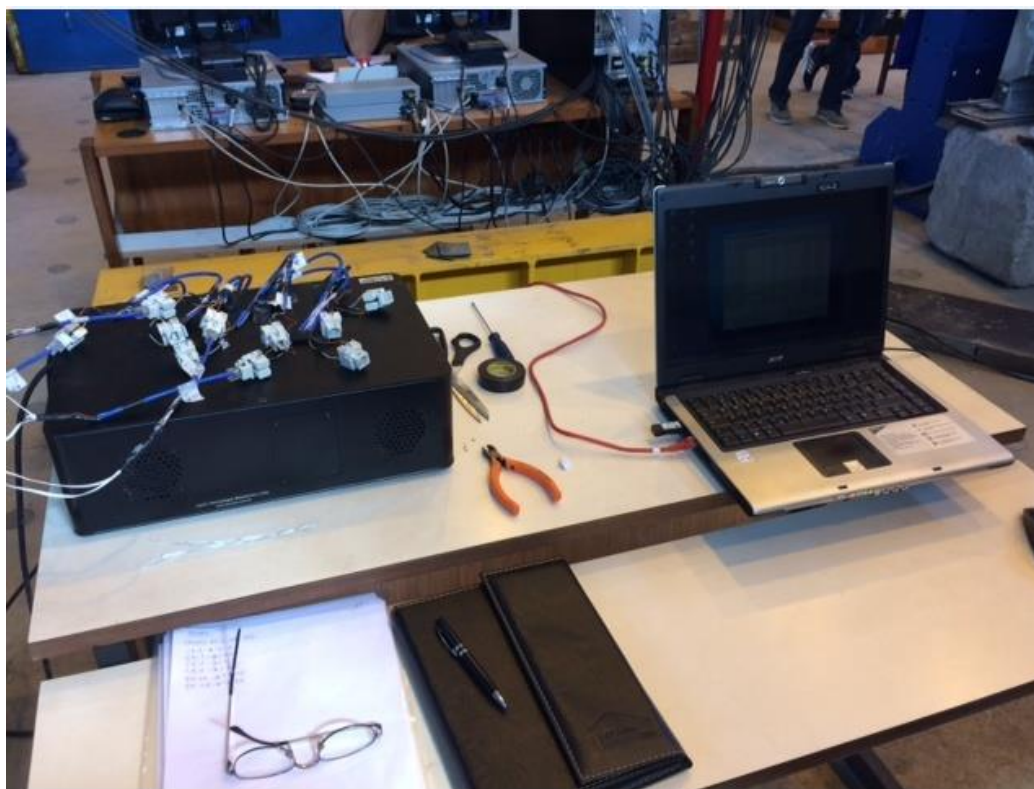
Figura 6.12 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento

Fonte: Do autor.

Para a aquisição de dados relativos aos DTs foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados (SAD) de 32 canais da Lynx Tecnologia Eletrônica. Esse Sistema de Aquisição de Dados é composto por uma placa aquisitora ADS2000 e duas placas condicionadoras AI-2161 de 16 canais. O programa LynxAqDados 7.02.11 para ambientes Microsoft Windows™ foi responsável pela leitura e gravação dos dados, enquanto o programa LynxAqDAnalysis 7.0.11 permitiu a criação de diagramas e a exportação de dados para outros programas como o Microsoft Excel™. A aquisição de dados referentes ao atuador hidráulico foi feita com o sistema da própria MTS, e, posteriormente, os resultados sincronizados com o sistema da Lynx. Todos os dados foram coletados com uma taxa de amostragem de 2 Hz.

Os dois sistemas de aquisição de dados são vistos nas figuras 6.13 e 6.14.

Figura 6.13 - Sistema de aquisição de dados (SAD)



Fonte: Do autor.

Figura 6.14 - Sistema de aquisição de dados da MTS

Fonte: Do autor.

6.2.2 Determinação da força máxima (Estimada)

Passa-se a descrever a definição da força máxima estimada do ensaio, em função da força máxima estimada de cada componente da ligação.

A NBR 7190:1997, recomenda que o carregamento deve ser aplicado de acordo com o diagrama de carga mostrado na figura 6.16 e que a carga limite deve ser determinada pelo ensaio de um corpo de prova com carregamentos e descarregamentos sucessivos, até que seja alcançada uma deformação específica residual total de 5%. Pela inexistência de corpo de prova para a realização deste procedimento - na preparação dos modelos não foi prevista essa atividade - optou-se pela determinação da força máxima estimada teórica de cada componente da ligação como se mostra a seguir.

A) Conector (barra de aço ASTM A193 B7))

Força máxima de cisalhamento: 9425 libras = 42,69 kN

Para 4 planos de corte: $F_{total} = 4 \times 42,69 = \mathbf{170,76 \text{ kN}}$

B) Embutimento do Concreto:

Perímetro/2 = 19,63 mm, $A = 2827,75 \text{ mm}^2$

Com $f_c = 39 \text{ Mpa}$, tem-se: $F = 39 \text{ MPa} \times 2827,75 = 110.282 \text{ N}$

Para 2 conectores \Rightarrow 2 embutimentos: $F_{total} = 2 \times 110,28 \text{ kN} = \mathbf{220,5 \text{ kN}}$

C) Embutimento da madeira

Perímetro/2 = 19,63 mm, $A = 2.827,75 \text{ mm}^2$

Com $f_{e,0} = 13,91 \text{ Mpa}$, tem-se: $F = 13,91 \times 2.827,75 = 39.334 \text{ N}$

Para 2 conectores e 4 embutimentos: $F_{total} = 4 \times 39,33 \text{ kN} = \mathbf{157,32 \text{ kN}}$

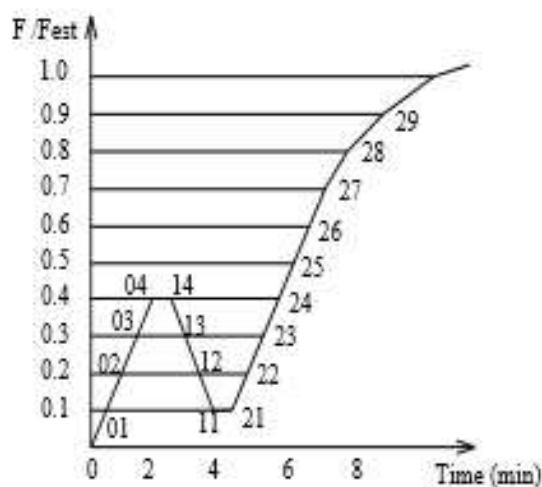
Adotou-se, portanto, a força máxima de **150 kN** para a programação do ensaio de cisalhamento direto.

6.2.3 Diagrama de carga para ensaio de cisalhamento direto

Os procedimentos de ensaio foram preparados e realizados tendo como referência a EN 26891 (1991), EN 1994-1-1:2004, EN 1995-1-1:2003 e a NBR 7190:1997.

A norma EN 26891 (1991), preconiza a adoção de um diagrama de carregamento monotônico, de 0 a 0,4 da força estimada, estacionando por 30 segundos e depois regredindo a 0,1, mais 30 segundos estacionada e, logo após, retomada do carregamento com controle de carga até 70 % da carga estimada. A partir daí, com controle de deslocamento até a ruptura ou deslocamento de 15 mm, o que acontecer primeiro. O procedimento é mostrado na figura 6.15.

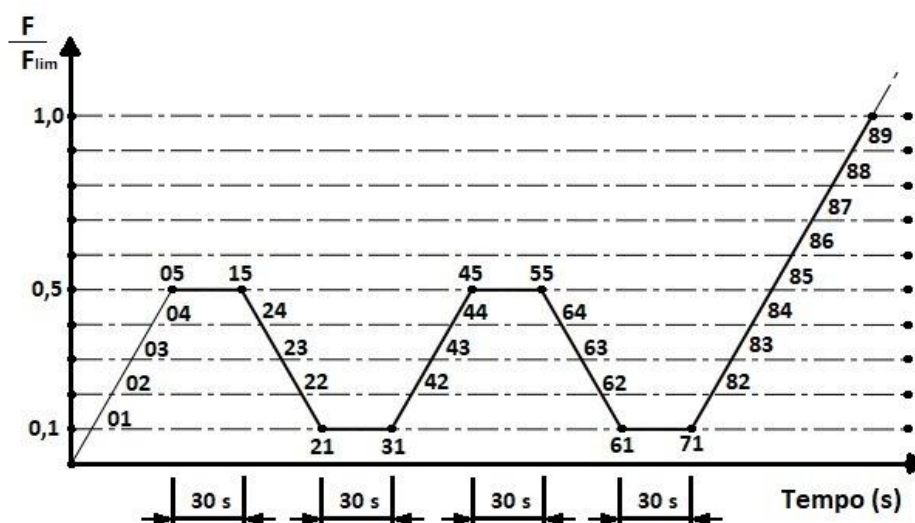
Figura 6.15 – Diagrama de carregamento para ensaio de acordo com EN 26891



Fonte: Do autor.

Não obstante, a norma brasileira NBR 7190 (1997), aponta que o carregamento deve ser aplicado em dois ciclos até 0,5 da carga estimada, conforme mostra a figura 6.16. Com esse procedimento ditado pela norma brasileira, considera-se que a acomodação inicial da ligação após o primeiro carregamento contribui para qualidade e confiabilidade dos dados produzidos para cálculo do módulo de deslizamento. Embora as equações permaneçam as mesmas sugeridas pela EN 26891, optou-se por adotar o diagrama de carregamento da NBR 7190.

Figura 6.16- Programa de aplicação de carga de acordo com a NBR 7190:1997



Fonte: Do autor.

O módulo de deslizamento (K_{ser}) passa, então, a ser calculado a partir dos valores da força e deslocamento nos pontos $0,1 F_{est}$ e $0,5F_{est}$, utilizando a equação

$$K_{ser} = 0,4 \frac{F_{est}}{V_{i,mod}} \quad (E6.5)$$

sendo F_{est} a força estimada e $V_{i,mod}$ obtido através da equação

$$V_{i,mod} = \frac{4}{3} (V_{0,4} - V_{0,1}) \quad (E6.6)$$

Onde $V_{0,4}$ e $V_{0,1}$ representam o valor dos deslocamentos, obtidos para $0,4 F_{est}$ e $0,1 F_{est}$, respectivamente, segundo a EN 26891.

Tendo como referência a NBR 7190, que preconiza a adoção de dois ciclos de $0,1$ a $0,5$ da força estimada, adotaram-se os valores do último ciclo de carregamento:

$$V_{i,mod} = \frac{4}{3} (V_{0,5} - V_{0,1}) \quad (E6.7)$$

Assim, a equação (E6.7) passa a ser:

$$K_{ser} = \frac{3}{4} \left(\frac{0,4 F_{est}}{V_{0,5} - V_{0,1}} \right) \quad (E6.8)$$

É importante salientar que os valores de $V_{0,5}$ e $V_{0,1}$, na equação E6.10, são obtidos em conformidade com a EN 26891 através dos valores aferidos no ensaio.

6.2.4 Plano de Ensaio

Tomando como base os dados calculados na determinação da força máxima tem-se:

$$F_{est} = 150 \text{ kN}$$

$$0,5 F_{est} = 75 \text{ kN}$$

$$0,1 F_{est} = 15 \text{ kN}$$

Velocidade de aplicação da força= 0,5 kN/s.

6.2.5 Realização dos ensaios de cisalhamento direto

Os ensaios dos modelos aqui propostos, tanto de centrais de concreto quanto de centrais de madeira, foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG. Foram preparados dois blocos de concreto, com uma chapa de aço espessa sobre eles, que servissem de apoio para os modelos, conforme Figura 6.17.

Pretendia-se, nesses ensaios, instrumentar os conectores com extensômetros elétricos para aferição das forças atuantes nos conectores. Tendo em vista que nos pré-ensaios realizados, durante a primeira etapa deste trabalho, não foram produzidos resultados coerentes, provavelmente em função da dificuldade de instalação dos extensômetros no conector e do diâmetro do furo, resolveu-se abandonar a ideia e aferir somente os resultados de força máxima admitida e a rigidez da ligação através do módulo de deslizamento, com medições de força e deslocamento provenientes da própria MTS. Para obtenção dos resultados dos ensaios foram utilizados três transdutores de deslocamento (DTs). A aquisição de dados referentes ao atuador hidráulico foi feita com o sistema da própria MTS, e, posteriormente, os resultados sincronizados com o sistema da Lynx. Todos os dados foram coletados com uma taxa de amostragem de 2 Hz.

Figura 6.17 - Montagem para o ensaio experimental

Fonte: Do autor.

O ensaio se deu em duas etapas distintas, uma com os modelos com laje de concreto no centro e outra somente com painéis de madeira. Em cada etapa, em função da existência de seis corpos de prova, foram realizados dois ensaios experimentais por dia. Para cada dia de ensaio com os modelos de centro de concreto armado, verificou-se a resistência a compressão do concreto. Esta opção, de seis ensaios para cada modalidade, corrobora com o prescrito nas normas e permite uma avaliação estatística dos resultados.

Antes da aplicação da força até a ruptura do modelo, seguindo as recomendações da NBR 7190, foram realizados dois ciclos de força. O primeiro ciclo iniciou-se com a força igual a zero e foi até uma força com valor igual a 50% da força máxima prevista (75 kN), estacionando por 30 segundos e retornando até o valor de 10% da força máxima prevista (15 kN). Mais um período de 30 segundos e iniciou-se o segundo ciclo de um valor de 10% da força máxima até 50 % novamente. Novo período de estacionamento de 30 segundos e descarregamento até 10% da força estimada. Finalmente, após mais 30 segundos, foi aplicado o carregamento monotônico até a ruptura do modelo. A velocidade de carregamento foi de 0,5 kN/s da carga estimada/minuto.

Durante a realização dos ensaios verificou-se que, em função da alta resistência dos conectores, assim como, do grande deslocamento observado, não

seria necessário chegar à carga última de rompimento de algum dos elementos da ligação. A norma EN 26891 indica que o carregamento continue até a ruptura do modelo ou deslocamento de 15 mm, o que acontecer primeiro. O experimento mostrava-se bastante dúctil, atingindo deslocamentos superiores a 30 mm. Assim, optou-se por interromper os ensaios quando o deslocamento ultrapassasse a 35 mm, embora o valor apontado pela EN 26891 - força máxima alcançada para deslocamento de 15 mm - já houvesse sido atingida. Observou-se, também, que a rigidez da ligação era maior para os modelos de madeira e concreto do que os de madeira e madeira. Pode-se observar esse fenômeno nos gráficos de força/deslocamento plotados adiante.

Foi detectado, por outro lado, que a laje de concreto não se deformou, não sofreu embutimento quando da aplicação da força. Os painéis de madeira, assim como, os conectores, sofreram grandes deformações. Embora o aço utilizado nos conectores seja de alta resistência, as observações corroboram com a conclusão do estudo de DIAS (2005), ou seja, os danos que o pino provocou no concreto com alta resistência foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira e nos conectores.

Observou-se, também, que a madeira, de um modo geral, sofreu um severo embutimento e os conectores apresentaram uma significativa flexão na linha de contato da peça principal de concreto com a madeira. Em alguns modelos, os conectores apresentaram uma tênue flexão nas peças laterais no local da fixação do parafuso.

6.3 Apresentação e análise dos resultados

Passa-se a descrever e analisar a seguir, os resultados dos ensaios realizados das ligações de CLT/concreto/CLT e CLT/CLT/CLT.

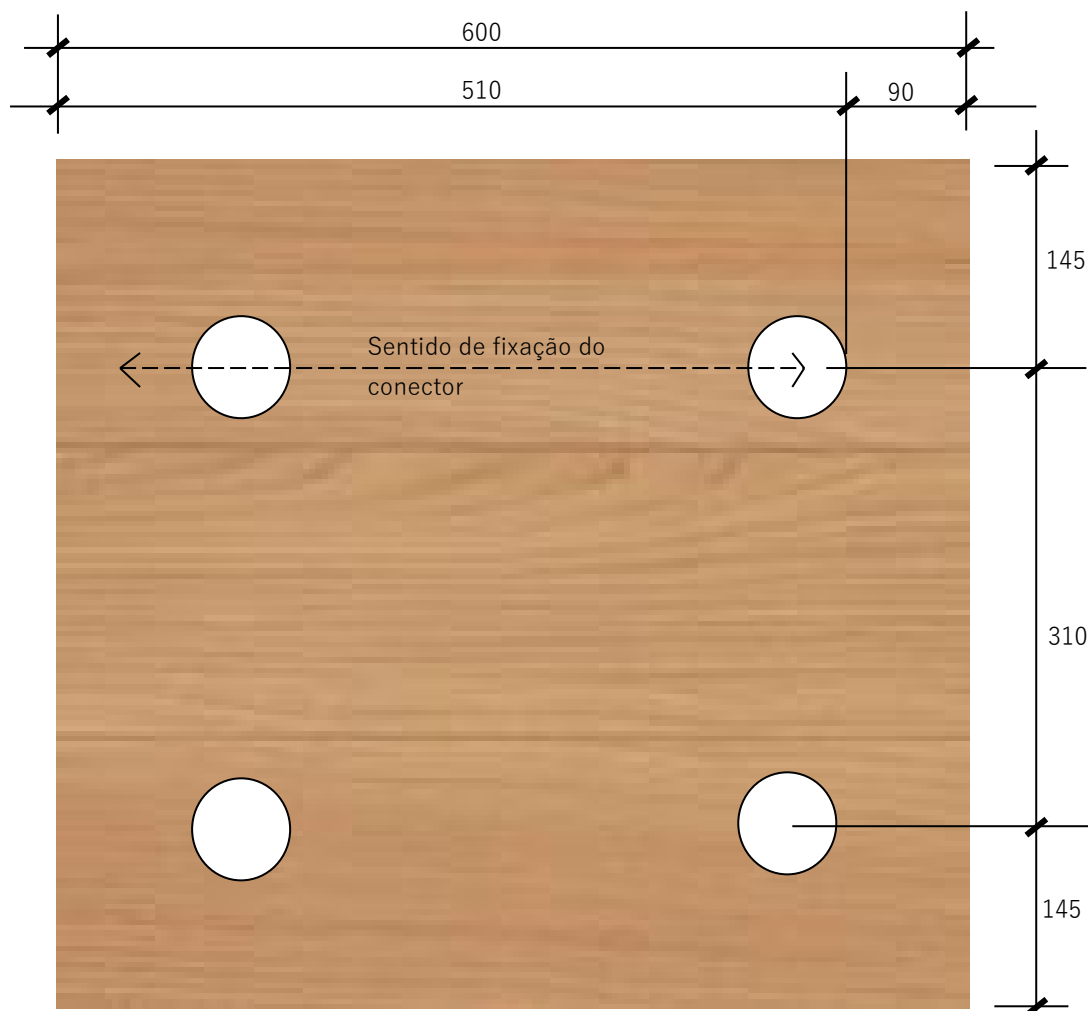
6.3.1 Ensaios modelos madeira/concreto/madeira

Foram realizados 6 ensaios com os modelos CLT/concreto/CLT, que foram identificados como Modelo 1, Modelo 2, Modelo 3, Modelo 4, Modelo 5 e Modelo 6. Descreve-se a seguir os ensaios.

6.3.1.1 Ensaio modelo 1 – CLT/CONCRETO/CLT

Para ancoragem do conector na madeira foi adotada a medida de 90 mm conforme mostra-se na figura 6.18.

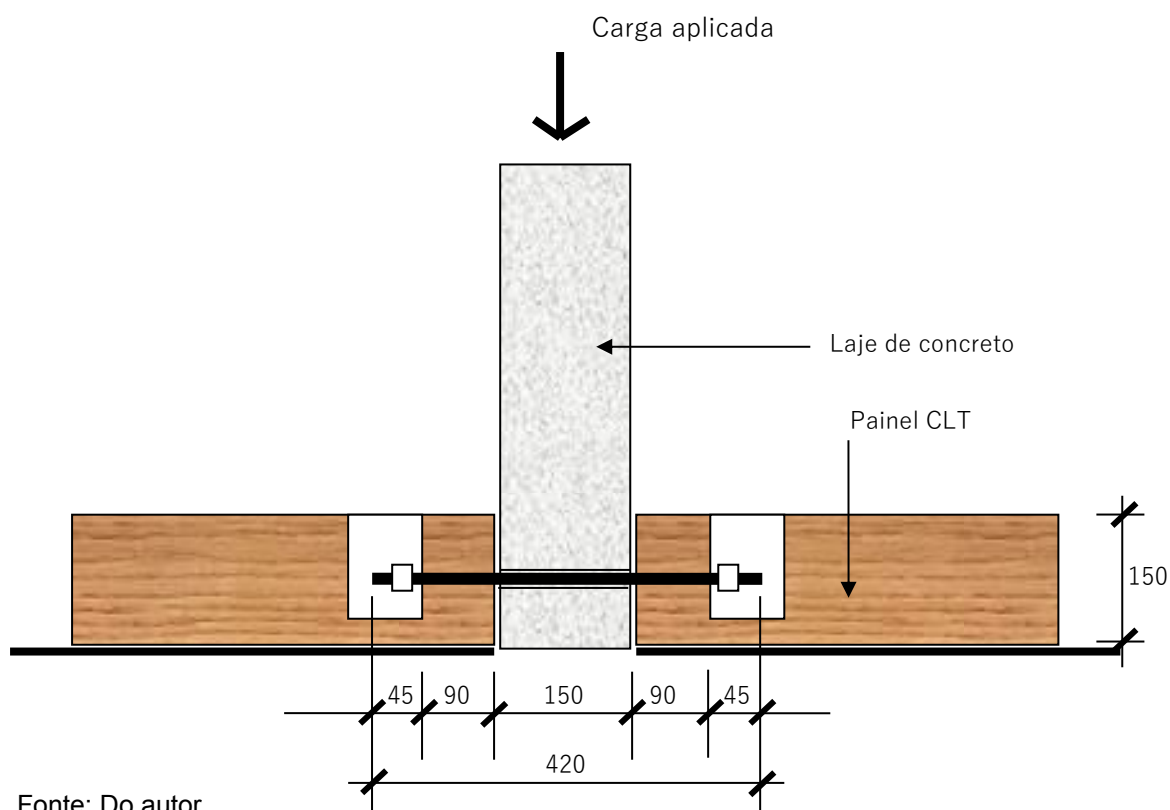
Figura 6.18 – Dimensões do painel de madeira CLT (dimensões em mm)



Fonte: Do autor.

Para o concreto a medida de ancoragem foi de 150mm. Mostra-se a ancoragem na figura 6.19.

Figura 6.19 – Posicionamento e dimensões do conector de aço (vista lateral)



Fonte: Do autor.

O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991). Pode-se ver o início do ensaio na Figura 6.20.

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190. Por outro lado, a norma EN 26891 indica que o carregamento continue até a ruptura do modelo ou deslocamento de 15 mm, o que acontecer primeiro.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados alguns estalos na ligação da laje com a madeira, sobretudo após alcance da carga de 150 kN.

Figura 6.20 - Ensaio de cisalhamento direto



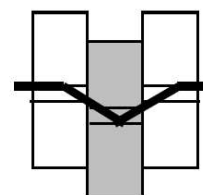
Fonte: Do autor.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço, figura 6.21, com a formação de uma ou duas rótulas plásticas de cada lado da ligação e esmagamento da madeira (**modo de ruptura IV**).

Figura 6.21 - Detalhe das rótulas plásticas do conector (modo de ruptura IV)



Tênue rótula plástica no conector no local da fixação com a porca na madeira



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação à madeira, provocando o fenômeno de arrancamento do pino, caracterizando novamente o modo de ruptura IV. Verifica-se o embutimento do anel metálico no furo da madeira, Figura 6.22, resultado do efeito de arrancamento do conector.

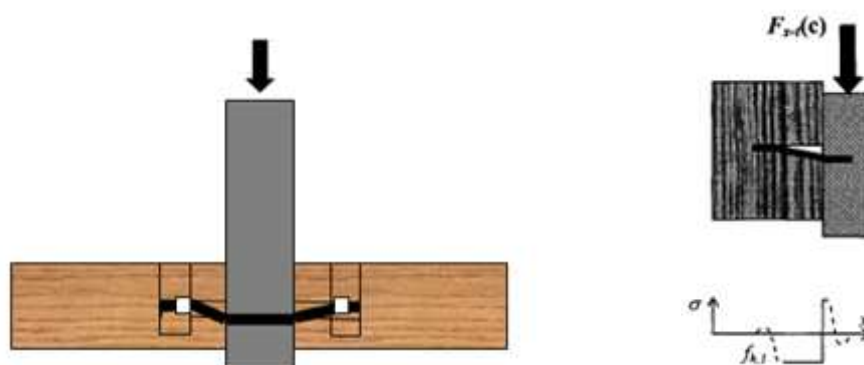
Figura 6.22 - Penetração do anel de aço



Fonte: Do autor.

Os danos que o conector provocou no concreto, com alta resistência, foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira. Nestes casos, o concreto atuou como um engaste perfeito e o esmagamento da madeira apresentou uma importância muito maior. É importante salientar que, como o concreto atuou como um engaste perfeito, duas rótulas plásticas se formaram de cada lado da ligação, ou seja, em vez de três rótulas indicadas no **modo de ruptura IV**, na realidade foram quatro rótulas efetivas, Figura 6.23. Essa observação corrobora com o resultado verificado por Dias (2005).

Figura 6.23 – Formação das quatro rótulas plásticas e observação de Dias (2005)



Fonte: Do autor.

Aparentemente o **modo de ruptura Is** também foi atingido.

Outra observação importante a ser registrada, é que o conector provocou um dano muito maior no painel CLT quando a lâmina de madeira estava com as fibras na posição paralela ao conector e à aplicação da força. Verifica-se o exposto nas figuras 6.24 e 6.25, que mostram o resultado do ensaio do lado direito e esquerdo do modelo, com posições diferentes das fibras.

Figura 6.24 – Embutimento e arrancamento no painel de madeira, lado direito e esquerdo



Fonte: Do autor.

Figura 6.25 - Detalhe do esmagamento lado direito da peça de madeira paralelo às fibras

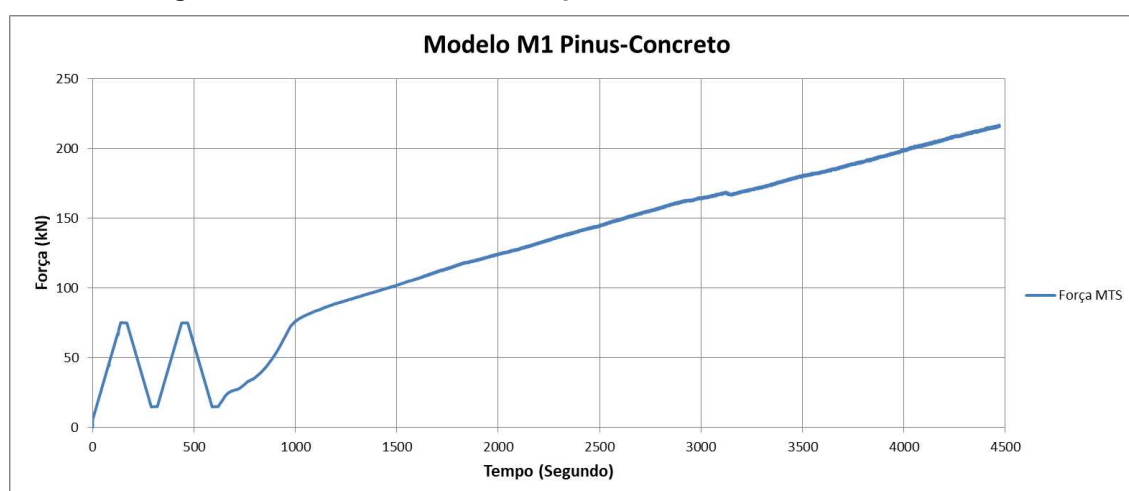


Fonte: Do autor.

Apresenta-se, como exemplo, gráficos dos resultados dos ensaios do modelo 1 (CLT/concreto/CLT) nas figuras 6.26 a 6.27. Os gráficos dos resultados de ensaios dos modelos subsequentes são bastante similares e estão apresentados no apêndice A.

Observando o gráfico da Figura 6.26 nota-se que o diagrama de carregamento foi bem representado.

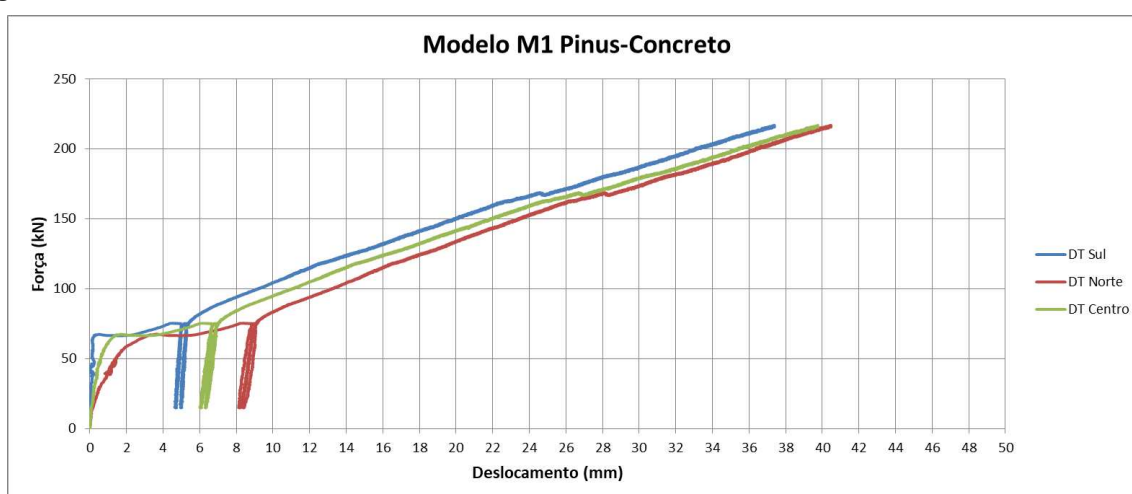
Figura 6.26 – Gráfico força x tempo modelo M1 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

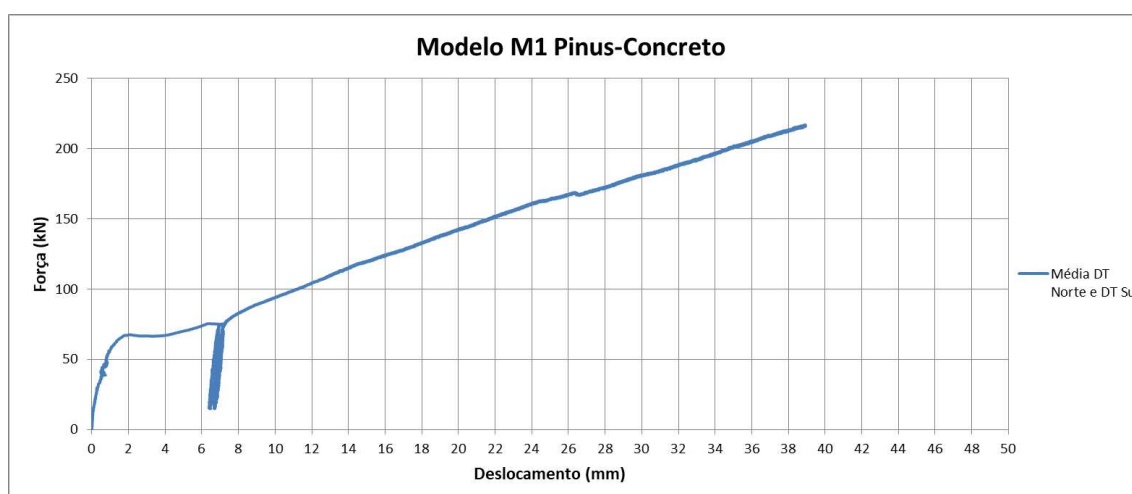
Na Figura 6.27, no gráfico força x deslocamento, pode-se observar que houve um deslocamento elevado no primeiro ciclo de carregamento. Neste deslocamento estão embutidos os deslocamentos de acomodação e a plastificação da ligação, indicando que a carga estimada foi maior que a efetiva. Os deslocamentos dos lados sul e norte, diferentes, indicam uma pequena excentricidade na aplicação da carga ou apoios irregulares.

Figura 6.27– Gráfico força x deslocamento de todos os DTs, modelo M1 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

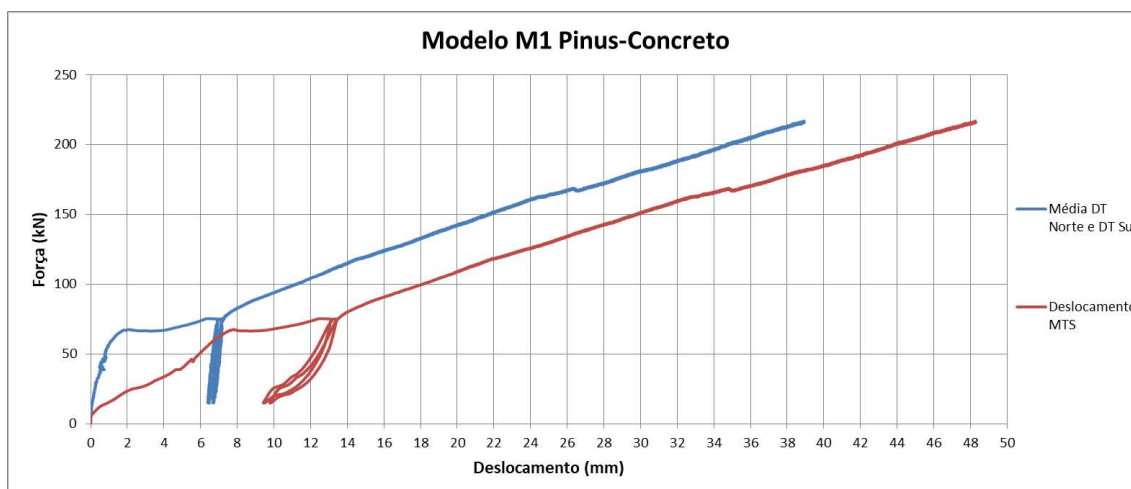
Figura 6.28 – Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte e sul, modelo M1 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

Na Figura 6.29, é apresentado um gráfico entre a força aplicada e o deslocamento relativo médio medido pelos DTs e o deslocamento da cabeça do pistão do cilindro hidráulico, medido pelo sensor da MTS. Nota-se que são bastante diferentes (média de 6 mm). Isto significa, provavelmente, a acomodação do modelo e a deformação de todo o sistema de aplicação de carga.

Figura 6.29 – Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M1 – madeira/concreto



Fonte: Do autor.

Considerando que não houve ruptura da ligação, a força máxima de cisalhamento foi determinada quando o deslizamento relativo médio atingiu 15 mm. Já o módulo de deslizamento foi determinado, no último ciclo, pela equação E6.10 transcrita a seguir. Estes resultados estão apresentados, para todos os ensaios dos modelos, na Tabela 6.1.

$$K_{ser} = \frac{3}{4} \left(\frac{0,4 F_{est}}{V_{0,5} - V_{0,1}} \right)$$

6.3.1.2 Ensaio Modelo 2 – CLT/CONCRETO/CLT

Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no concreto o parafuso passante com a distância de 150 mm.

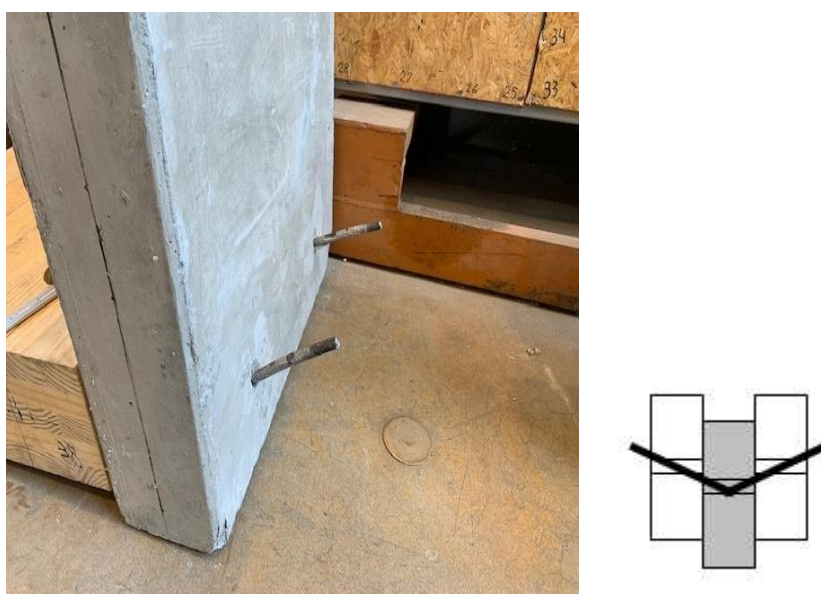
O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados alguns estalos na ligação da laje com a madeira, sobretudo após alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo **modo de ruptura III s**, ou seja, escoamento das barras de aço com a formação de uma rótula plástica em cada lado da ligação e embutimento do pino nas peças laterais. Pode-se verificar figura 6.30.

Figura 6.30 – Rótulas plásticas nos conectores, modelo M2



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do conector com relação à madeira, provocando o fenômeno de arrancamento do conector. Verifica-se o embutimento do anel metálico no furo da madeira, figura 6.32, resultado do efeito de arrancamento.

Figura 6.31- Ensaio sendo realizado



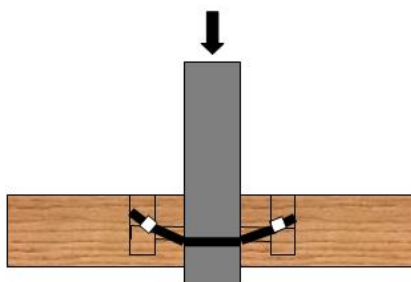
Figura 6.32 - Penetração do anel de aço



Fonte: Do autor.

Os danos que o conector provocou no concreto com alta resistência foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira. Nestes casos, o concreto atuou como um engaste perfeito e o esmagamento da madeira apresentou uma importância muito maior. Verifica-se a formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira em cada lado da ligação na ilustração da Figura 6.33, que difere, em parte, do previsto no **modo de ruptura III s.**

Figura 6.33 – Formação de rótula plástica e esmagamento da madeira



Fonte: Do autor.

Figura 6.34 – Embutimento e arrancamento no modelo M2 de madeira, lado direito e esquerdo



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 2 de CLT/concreto/CLT estão no apêndice A.

6.3.1.3 Ensaio Modelo 3 – CLT/CONCRETO/CLT

Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no concreto o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados alguns estalos na ligação com a madeira, sobretudo após alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo **modo de ruptura III s**, ou seja, escoamento das barras de aço com a formação de uma rótula plástica em cada lado da ligação e embutimento do pino nas peças laterais. Pode-se verificar nas figuras 6.35, 6.36 e 6.37.

Figura 6.35 – Rótulas plásticas nos conectores, modelo M3

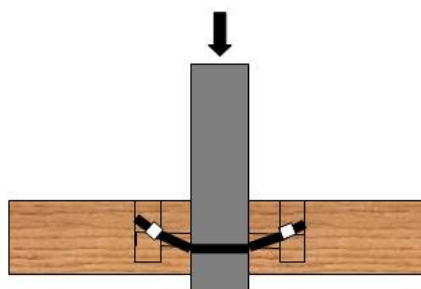


Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação à madeira, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Os danos que o pino provocou no concreto com alta resistência foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira. Nestes casos, o concreto atuou como um engaste perfeito e o esmagamento da madeira apresentou uma importância muito maior. Verifica-se a formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira em cada lado da ligação na ilustração da Figura 6.36, que difere, em parte, do previsto no **modo de ruptura III s.**

Figura 6.36 – Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira do lado direito e esquerdo da ligação



Fonte: Do autor.

Figura 6.37 – Embutimento e arrancamento no modelo M3 de madeira, lado direito e esquerdo



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 3 de CLT/concreto/CLT estão no apêndice A.

6.3.1.4 Ensaio Modelo 4 – CLT/CONCRETO/CLT

Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no concreto o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

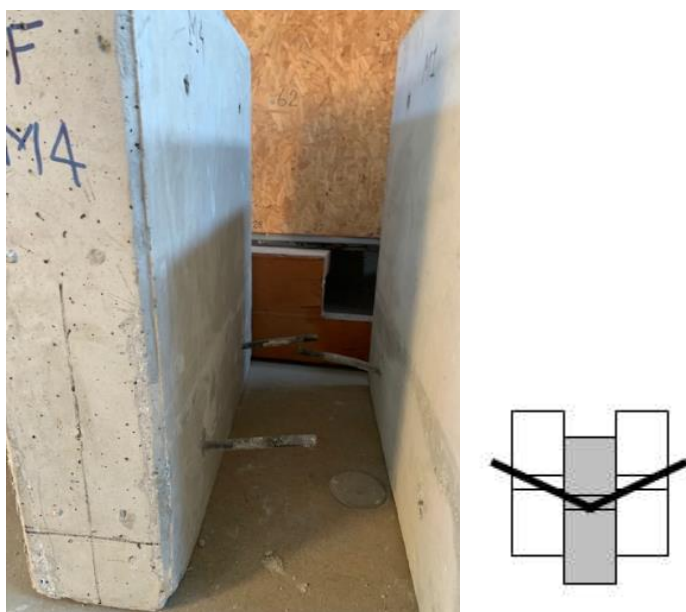
O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados alguns estalos na ligação com a madeira, sobretudo após alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo **modo de ruptura III s**, ou seja, escoamento das barras de aço com a formação de uma rótula plástica em cada lado da ligação e embutimento do pino nas peças laterais. Pode-se verificar o exposto nas figuras 6.38 e 6.39 e 6.40.

Figura 6.38– Rótulas plásticas nos conectores, modelo M4

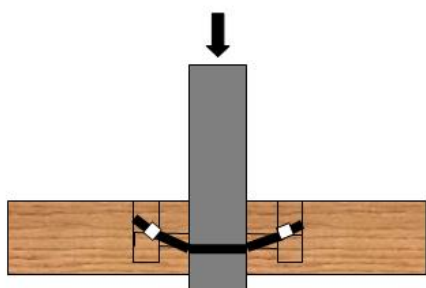


Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação à madeira, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Os danos que o pino provocou no concreto com alta resistência foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira. Nestes casos, o concreto atuou como um engaste perfeito e o esmagamento da madeira apresentou uma importância muito maior. Verifica-se a formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira em cada lado da ligação na ilustração da Figura 6.39, que difere, em parte, do previsto no **modo de ruptura III s.**

Figura 6.39 – Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira do lado direito e esquerdo da ligação



Fonte: Do autor.

Figura 6.40 – Embutimento e arrancamento no modelo M4 de madeira, lado direito e esquerdo



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 4 de CLT/concreto/CLT estão no apêndice A.

6.3.1.5 Ensaio modelo 5 – CLT/CONCRETO/CLT

Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no concreto o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

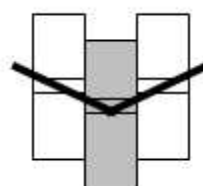
O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados alguns estalos na ligação com a madeira, sobretudo após alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo **modo de ruptura III s**, ou seja, escoamento das barras de aço com a formação de uma rótula plástica em cada lado da ligação e embutimento do pino nas peças laterais. Pode-se verificar o exposto nas figuras 6.41, 6.42 e 6.43.

Figura 6.41– Rótulas plásticas nos conectores, modelo M5

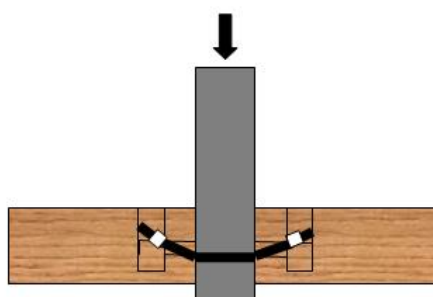


Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação à madeira, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Os danos que o pino provocou no concreto com alta resistência foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira. Nestes casos, o concreto atuou como um engaste perfeito e o esmagamento da madeira apresentou uma importância muito maior. Verifica-se a formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira em cada lado da ligação na ilustração da Figura 6.42, que difere, em parte, do previsto no **modo de ruptura III s.**

Figura 6.42 – Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira



Fonte: Do autor.

Figura 6.43 – Embutimento e arrancamento no modelo M5 de madeira, lado direito e esquerdo



Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 5 de CLT/concreto/CLT estão no apêndice A.

6.3.1.6 Ensaio modelo 6 – CLT/CONCRETO/CLT

Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no concreto o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

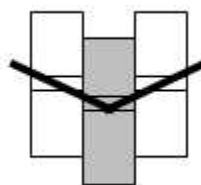
O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados alguns estalos na ligação com a madeira, sobretudo após alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo **modo de ruptura III s**, ou seja, escoamento das barras de aço com a formação de uma rótula plástica em cada lado da ligação e embutimento do pino nas peças laterais. Pode-se verificar o exposto nas figuras 6.44, 6.45 e 6.46.

Figura 6.44 - Rótulas plásticas nos conectores, modelo M6

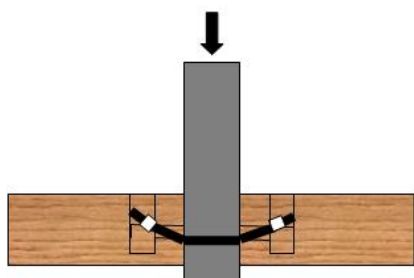


Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação à madeira, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Os danos que o pino provocou no concreto com alta resistência foram pequenos e podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os danos na madeira. Nestes casos, o concreto atuou como um engaste perfeito e o esmagamento da madeira apresentou uma importância muito maior. Verifica-se a formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira em cada lado da ligação, na ilustração da Figura 6.45, que difere, em parte, do previsto no **modo de ruptura III s.**

Figura 6.45 – Formação de uma rótula plástica e esmagamento da madeira



Fonte: Do autor.

Figura 6.46 – Embutimento e arrancamento no modelo M6 de madeira, lado direito e esquerdo



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 6 de CLT/concreto/CLT estão no apêndice A.

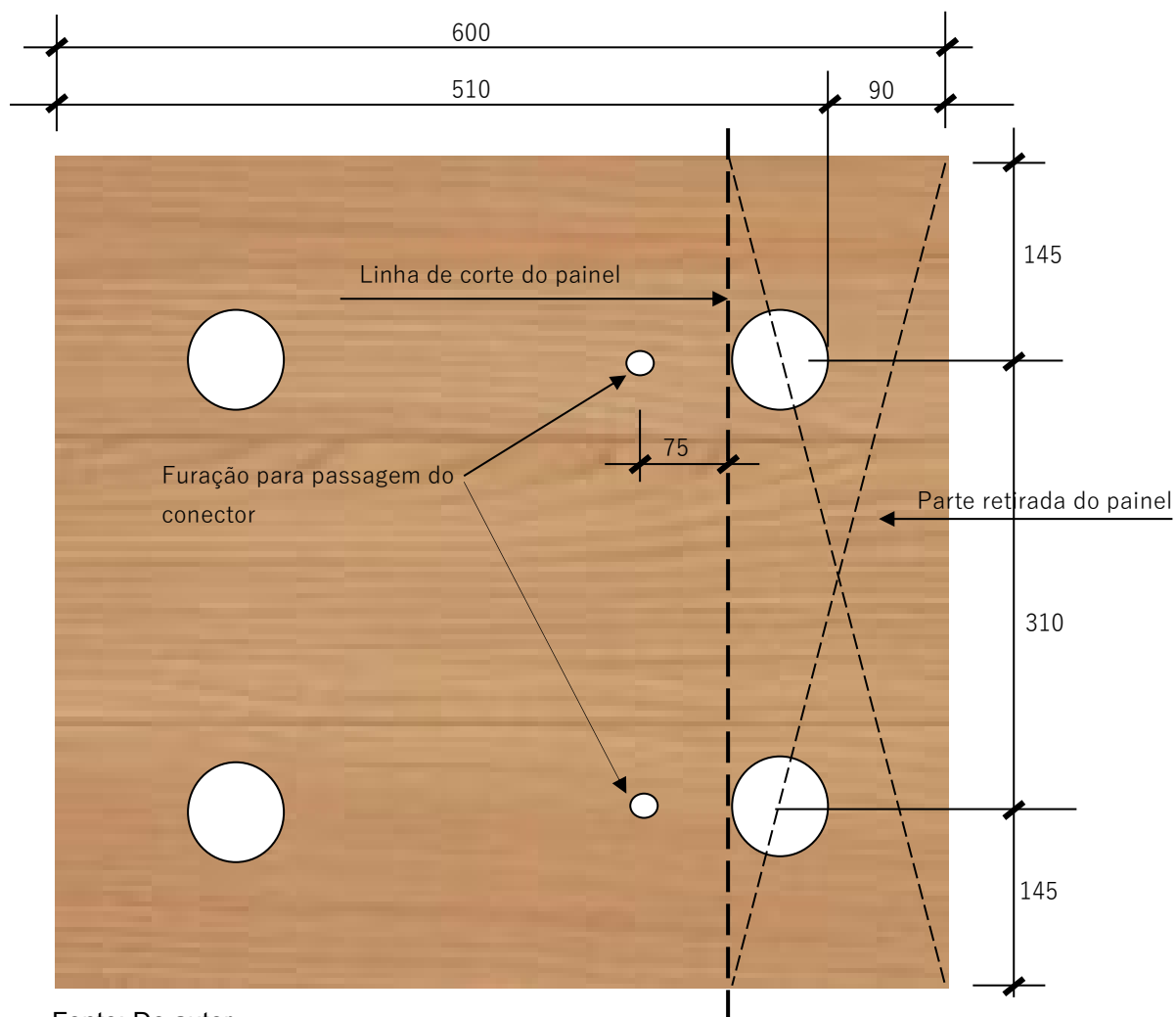
6.3.2 Ensaios modelos madeira/madeira/madeira

Os ensaios nos modelos de madeira/madeira/madeira, seguiram os mesmos procedimentos adotados para os ensaios de madeira/concreto/madeira. Passa-se a descrição dos ensaios a seguir.

6.3.2.1 Ensaio modelo 1 – CLT/CLT/CLT

Para o ensaio madeira/madeira/madeira foi feita uma adaptação no painel original. Realizou-se um corte de um lado do painel e efetuou-se as furações para passagem do conector, conforme mostrado na figura 6.47.

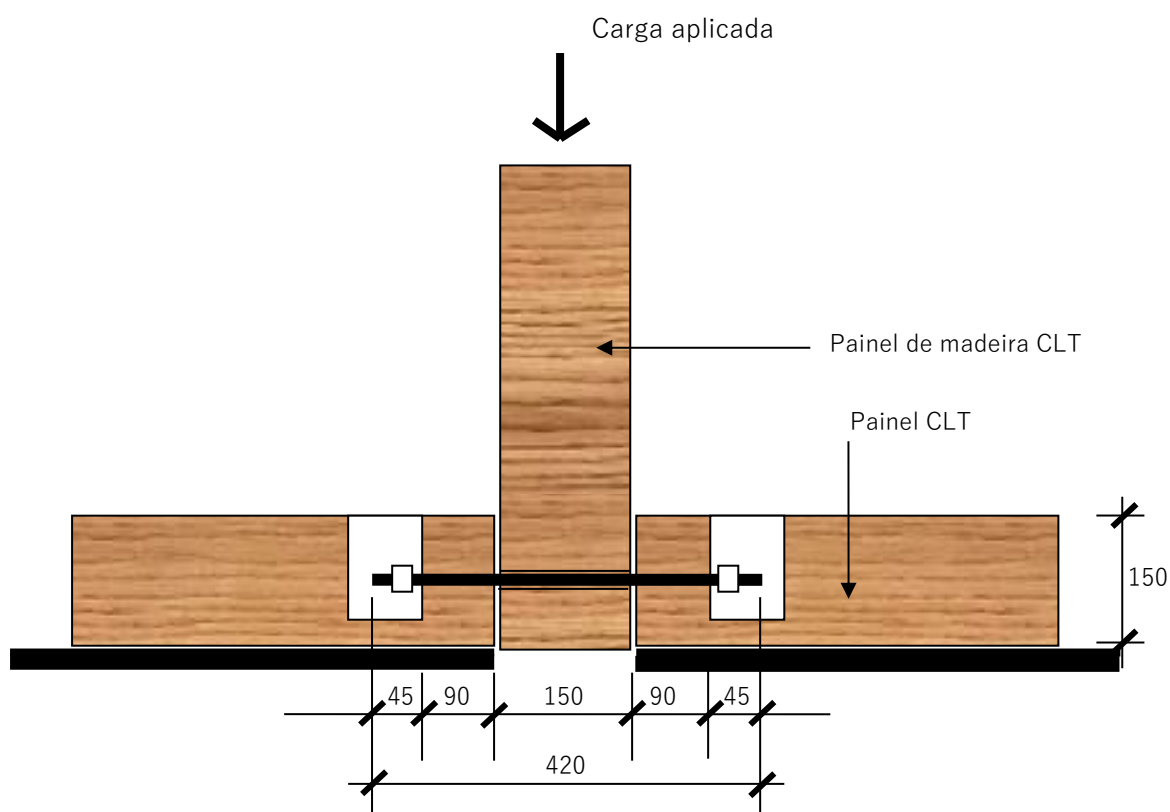
Figura 6.47 – Dimensões do painel de madeira CLT (dimensões em mm)



Fonte: Do autor.

Segundo o EUROCODE 5, o menor valor para ancoragem do conector metálico na madeira deve ser o máximo valor obtido com $0,5d^2$ ou $10d$, onde d é o diâmetro do parafuso. Por se tratar de uma ligação com parafuso passante e fixação com porcas, foi adotada a distância média entre os dois valores (90 mm). Mostra-se a ancoragem na Figura 6.48.

Figura 6.48 – Posicionamento e dimensões do conector de aço (vista lateral)



Fonte: Do autor.

Como o painel central foi cortado para adaptação ao ensaio, houve necessidade de colocação de um calço de madeira sobre este para posicionamento no pórtico de reação e atuador hidráulico, conforme se verifica na Figura 6.49.

O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991). Podemos ver o início do ensaio na Figura 6.49.

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190. Por outro lado, a norma EN 26891 indica que o carregamento continue até a ruptura do modelo ou deslocamento de 15 mm, o que acontecer primeiro. O experimento, executado de forma similar com os modelos madeira/concreto/madeira, mostrava-se bastante dúctil, atingindo, logo de início, durante os dois ciclos de carga e descarga, deslocamentos superiores a 15 mm. Assim, da mesma maneira que os ensaios de madeira/concreto/madeira, optou-se por interromper os ensaios quando o deslocamento ultrapassasse a 30 mm, embora o valor apontado pela EN 26891 - força máxima alcançada para deslocamento de 15 mm - já houvesse sido atingida.

Figura 6.49 - Ensaio de cisalhamento direto modelo madeira/madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados muitos estalos na ligação, muito antes do alcance da carga de 150 kN.

Na ligação madeira e madeira observou-se um severo embutimento tanto nas peças laterais como na principal, conforme se pode observar na Figura 6.50.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço, com formação de uma rótula plástica, **modo de falha III s**, ou três rótulas plásticas, **modo de falha IV** e esmagamento da madeira, inclusive no painel central. Pode-se verificar o exposto nas Figuras 6.50, 6.51 e 6.52.

Figura 6.50- Embutimento do conector na peça principal



Fonte: Do autor.

Figura 6.51 - Embutimento e arrancamento no modelo M1 de madeira, lado direito e esquerdo



Fonte: Do autor.

Figura 6.52 - Detalhe das rótulas plásticas do conector e esmagamento no painel central



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação aos painéis laterais, provocando o fenômeno de arrancamento do pino. Verifica-se o deslocamento do painel na Figura 6.53 e embutimento do anel metálico no furo da madeira, figura 6.54, resultado do efeito de arrancamento do conector.

Figura 6.53 - Deslocamento do painel



Figura 6.54 - Embutimento do anel de aço



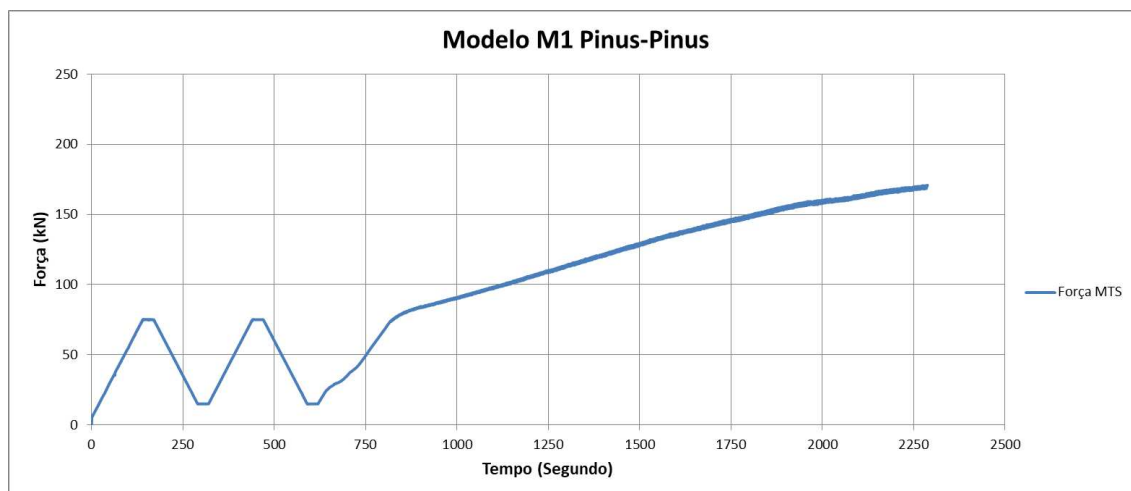
Fonte: Do autor.

Segundo a Eurocode 5 (2004), nas expressões (E6.3 e E6.4), o primeiro termo do lado direito é a capacidade de carga de acordo com a teoria de escoamento de Johansen, enquanto o segundo termo $F_{ax}, R_k / 4$ é a contribuição do efeito corda. A contribuição para a capacidade de carga devido ao efeito do cabo deve ser limitada 25% quando se usa parafusos passantes com porca e arruela e 100% para parafusos autoatarraxantes.

Apresenta-se, como exemplo, gráficos dos resultados dos ensaios do modelo 1 (CLT/CLT/CLT) nas figuras 6.26 a 6.27. Os gráficos dos resultados de ensaios dos modelos subsequentes são bastante similares e estão apresentados no apêndice A.

Observando o gráfico da Figura 6.55 nota-se que o diagrama de carregamento foi bem representado.

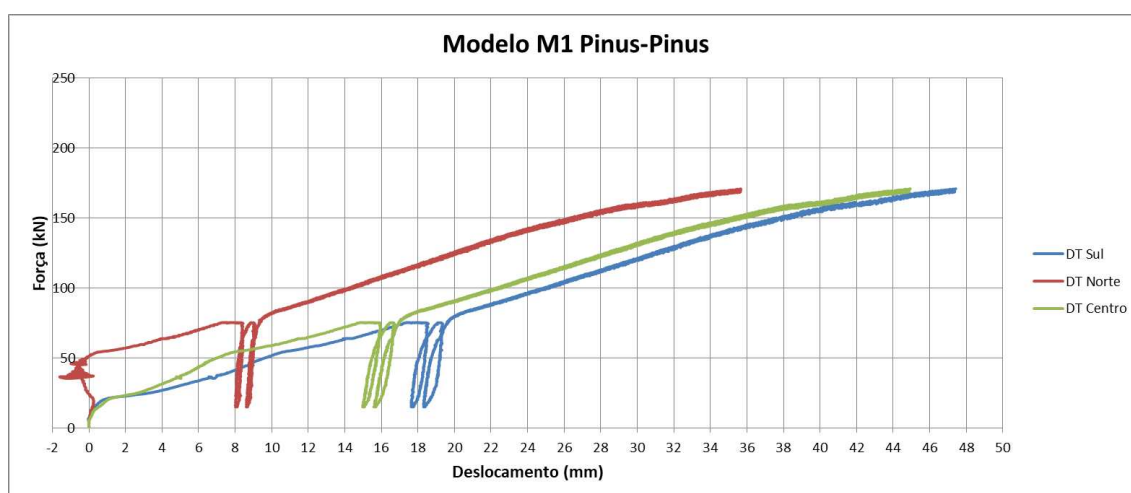
Figura 6.55 – Gráfico força x tempo modelo M1 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

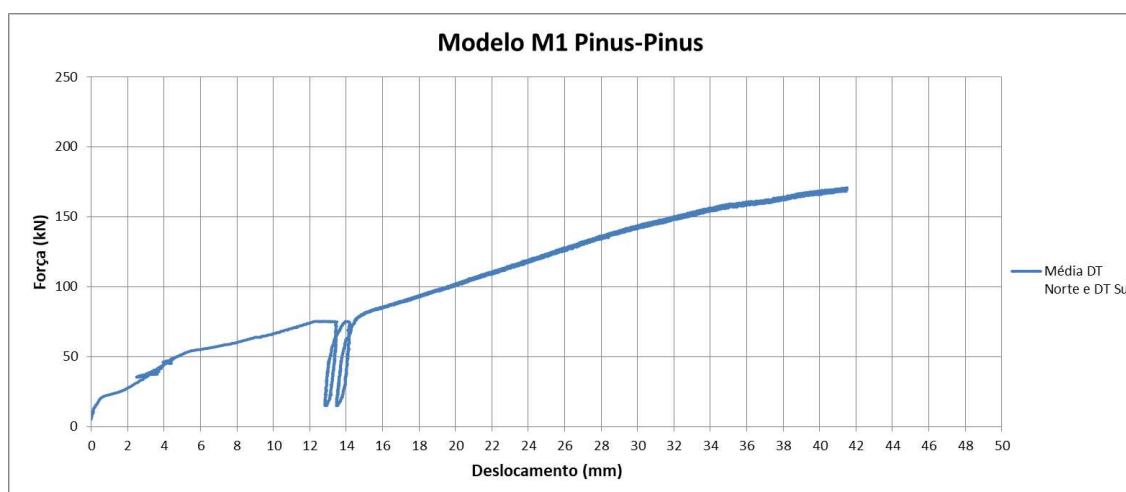
Na Figura 6.56, no gráfico força x deslocamento, pode-se observar que houve um deslocamento muito elevado no primeiro ciclo de carregamento. Neste deslocamento estão embutidos os deslocamentos de acomodação e a plastificação da ligação, indicando que a carga estimada foi maior que a efetiva. Os deslocamentos dos lados sul e norte, diferentes, indicam uma excentricidade na aplicação da carga ou apoios irregulares.

Figura 6.56 – Gráfico força x deslocamento de todos os DTs, modelo M1 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

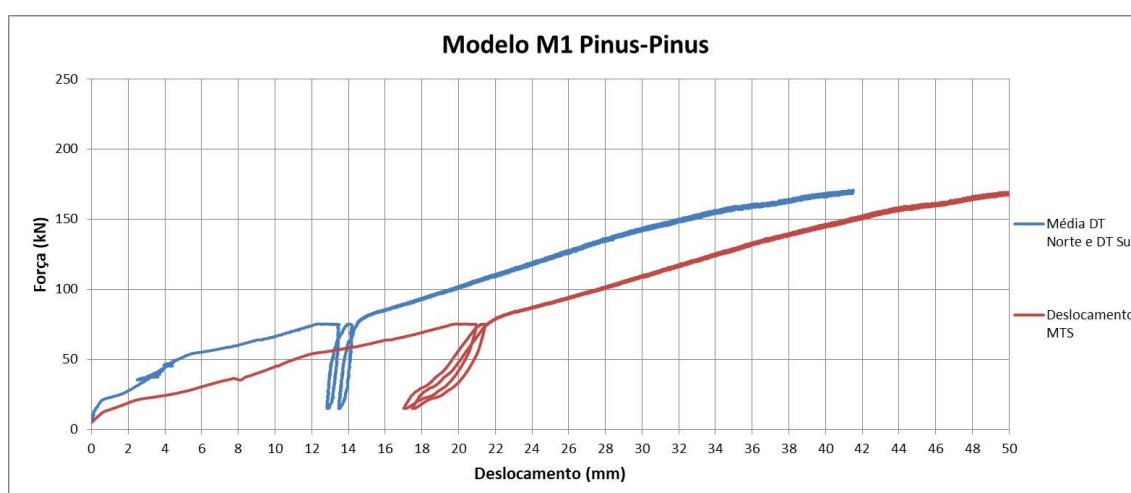
Figura 6.57–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte e sul, modelo M1 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

Na Figura 6.58, é apresentado um gráfico entre a força aplicada e o deslocamento relativo médio medido pelos DTs e o deslocamento da cabeça do pistão do cilindro hidráulico, medido pelo sensor da MTS. Nota-se que são bastante diferentes (média de 7 mm). Isto significa, provavelmente, a acomodação do modelo e a deformação de todo o sistema de aplicação de carga.

Figura 6.58 – Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M1 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

Considerando que não houve ruptura da ligação, a força máxima de cisalhamento foi determinada quando o deslizamento relativo médio atingiu 15 mm. Já o módulo de deslizamento foi determinado, no último ciclo, pela equação E6.10

transcrita a seguir. Estes resultados estão apresentados, para todos os ensaios dos modelos, na Tabela 6.1.

$$K_{ser} = \frac{3}{4} \left(\frac{0,4 F_{est}}{V_{0,5} - V_{0,1}} \right)$$

6.3.2.2 Ensaio modelo 2 – CLT/CLT/CLT

Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no painel central o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

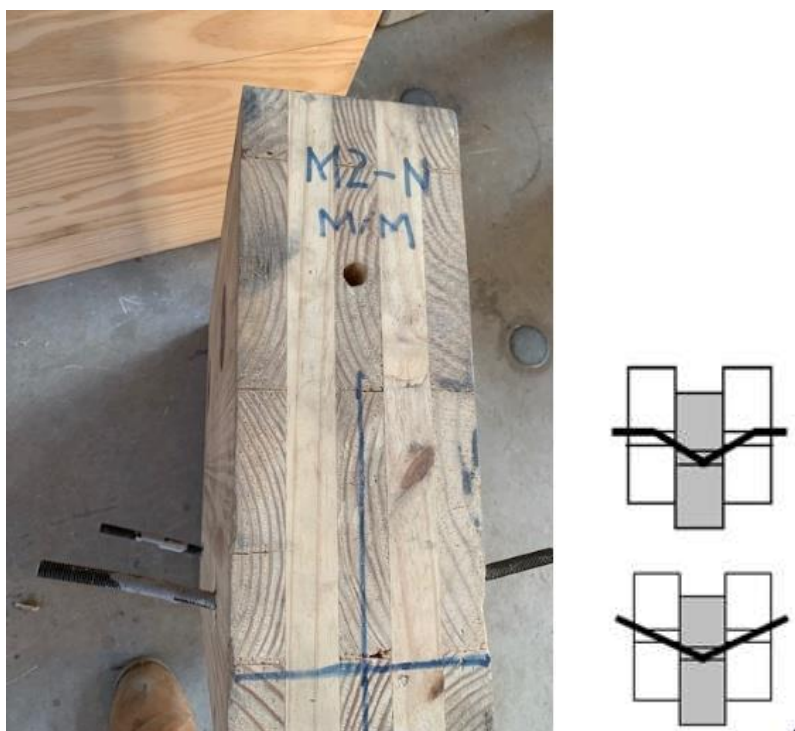
O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

A carga foi aplicada de acordo com o diagrama de carregamento da NBR 7190.

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados muitos estalos na ligação com o painel central, muito antes do alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço, com formação de uma rótula plástica, **modo de falha III s**, ou três rótulas plásticas, **modo de falha IV** e esmagamento da madeira, inclusive no painel central. Pode-se verificar o exposto nas Figuras 6.59 e 6.60.

Figura 6.59 – Rótulas plásticas nos conectores e modos de falha



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação aos painéis laterais, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Verifica-se o esmagamento da madeira na Figura 6.60.

Figura 6.60 – Embutimento e arrancamento no modelo M2 de madeira, lado direito e esquerdo



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 2 de CLT/CLT/CLT estão no apêndice A.

6.3.2.3 Ensaio modelo 3 (CLT/CLT/CLT)

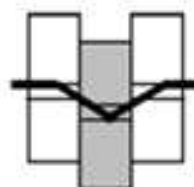
Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no painel central o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados muitos estalos na ligação com o painel central, muito antes do alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço, com formação de três rótulas plásticas, **modo de falha IV** e esmagamento da madeira, inclusive no painel central. Pode-se verificar o exposto nas Figuras. 6.61 e 6.62.

Figura 6.61 – Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M3 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação aos painéis laterais, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Verifica-se o esmagamento da madeira no painel lateral na Figura 6.62.

Figura 6.62 – Embutimento e arrancamento no modelo M3 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 3 de CLT/CLT/CLT estão no apêndice A.

6.3.2.4 Ensaio modelo 4 (CLT/CLT/CLT)

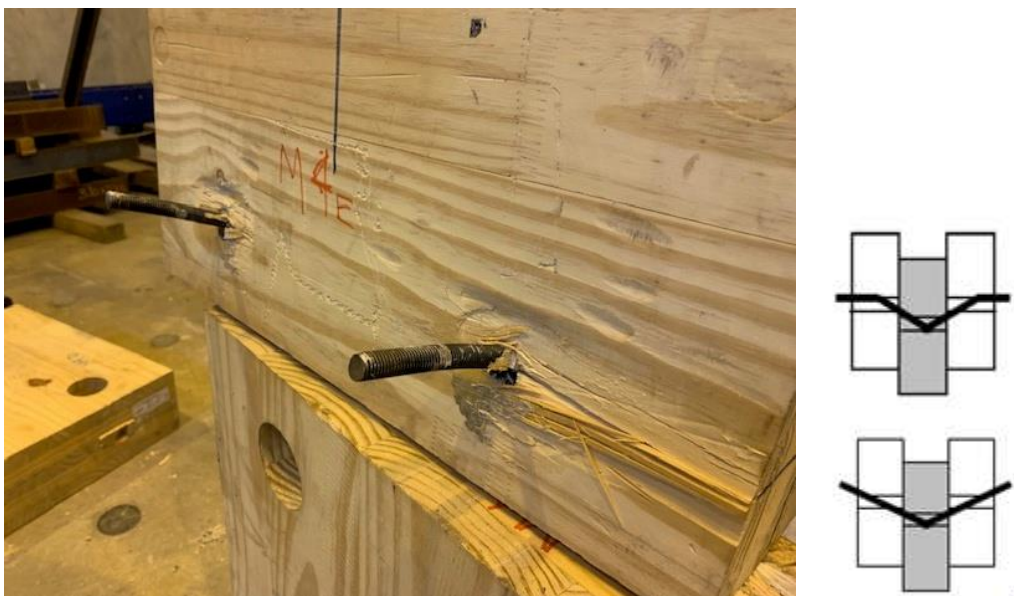
Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no painel central o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados muitos estalos na ligação com o painel central, muito antes do alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço, com formação de uma rótulas plástica, **modo de falha III** e com formação de três rótulas plásticas **modo de falha IV** e esmagamento da madeira, inclusive no painel central. Pode-se verificar o exposto nas Figuras 6.63 e 6.64.

Figura 6.63 – Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M4 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação aos painéis laterais, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Verifica-se o esmagamento da madeira na Figura 6.64.

Figura 6.64 – Embutimento e arrancamento no modelo M4 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 4 de CLT/CLT/CLT estão no apêndice A.

6.3.2.5 Ensaio modelo 5 (CLT/CLT/CLT)

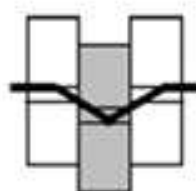
Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no painel central o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados muitos estalos na ligação com o painel central, muito antes do alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço, com formação de três rótulas plásticas, **modo de falha IV** e esmagamento da madeira, inclusive no painel central. Pode-se verificar o exposto nas Figuras. 6.65 e 6.66.

Figura 6.65 – Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M5 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Figura 6.66 – Embutimento e arrancamento no modelo M5 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação aos painéis laterais, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Verifica-se o esmagamento da madeira na Figura 6.67.

Figura 6.67 – Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M5 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 5 de CLT/CLT/CLT estão no apêndice A.

6.3.2.6 Ensaio modelo 6 (CLT/CLT/CLT)

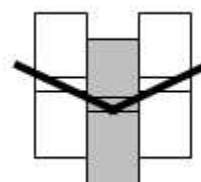
Da mesma forma que o ensaio do modelo 1 a distância de ancoragem adotada foi de 90 mm e no painel central o parafuso passante com a distância de ancoragem de 150 mm.

O procedimento foi iniciado em conformidade com o previsto na NBR 7190 (1997) e EN 26891 (1991).

Após a aplicação dos dois ciclos de carga e durante o carregamento subsequente, foram registrados muitos estalos na ligação com o painel central, muito antes do alcance da carga de 150 kN.

Concluído o ensaio, verificou-se que o modo de falha foi caracterizado pelo escoamento das barras de aço, com formação de uma rótula plástica, **modo de falha IIIs** e esmagamento da madeira, inclusive no painel central. Pode-se verificar o exposto nas Figuras 6.68 e 6.69

Figura 6.68 – Esmagamento da madeira e rótulas plásticas no modelo M6 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Foi observado um movimento axial do pino com relação aos painéis laterais, provocando o fenômeno de arrancamento do pino.

Verifica-se o esmagamento da madeira na Figura 6.69.

Figura 6.69 – Embutimento e arrancamento no modelo M6 de madeira/madeira



Fonte: Do autor.

Os gráficos com os resultados dos ensaios do modelo 6 de CLT/CLT/CLT estão no apêndice A.

6.4 Força máxima e módulo de deslizamento dos ensaios de cisalhamento direto

Na Tabela 6.1 estão apresentados os resultados dos ensaios dos modelos CLT/CONCRETO/CLT. Na 2ª coluna encontra-se a força máxima correspondente ao deslocamento de 15 mm, como o modelo tem 2 parafusos e cada parafuso 2 cortes,

para cisalhamento, a força para um corte é $F_{max}/4$ (3ª coluna da Tabela). Para o cálculo do módulo de deslizamento, utilizando as fórmulas da EN 26891, na 5ª coluna encontram-se os deslocamentos correspondente a 0,1 e 0,4 da força estimada. Na 6ª coluna estão os valores do módulo de deslizamento e na 7ª coluna o módulo de deslizamento para um corte. Já na Tabela 6.2 estão apresentados os resultados dos ensaios dos modelos CLT/CLT/CLT. As especificações das colunas são idênticas à Tabela 6.1

Tabela 6.1 - Resultado dos ensaios dos modelos – CLT/CONCRETO/CLT

FORÇA, para 15 mm (kN)			MÓDULO DE DESLIZAMENTO (kN/mm)			
CP	F_{max} (kN)	$F_{max}/4$	Força: $F_{est} = 150kN$	Deslizamento V (mm)	$K_s = \frac{0,4 F_{est}}{4/3(v_{0,4} - v_{0,1})}$	$k_s/4$
CP1	119,25	29,81	0,1 F_{est}	0,165	53,76	13,44
			0,4 F_{est}	1,002		
CP2	98,26	24,57	0,1 F_{est}	0,149	47,42	11,85
			0,4 F_{est}	1,098		
CP3	113,83	28,46	0,1 F_{est}	0,329	56,89	14,22
			0,4 F_{est}	1,120		
CP4	98,19	24,55	0,1 F_{est}	0,329	47,47	11,87
			0,4 F_{est}	1,127		
CP5	110,70	27,68	0,1 F_{est}	0,139	53,19	13,30
			0,4 F_{est}	0,985		
CP6	116,10	29,03	0,1 F_{est}	0,120	55,69	13,92
			0,4 F_{est}	0,928		

Fonte: Do autor.

Tabela 6.2 - Resultado dos ensaios dos modelos – CLT/CLT/CLT

FORÇA, para 15 mm			MÓDULO DE DESLIZAMENTO (kN/mm)			
CP	F_{max} (kN)	$F_{max}/4$	Força: $F_{est} = 150kN$	Deslizamento V (mm)	$K_s = \frac{0,4 F_{est}}{4/3(v_{0,4} - v_{0,1})}$	$k_s/4$
CP1	80,94	20,23	0,1 F_{est}	0,242	24,42	6,10
			0,4 F_{est}	2,085		
CP2	85,76	21,44	0,1 F_{est}	0,175	29,26	7,31
			0,4 F_{est}	1,713		
CP3	72,08	18,02	0,1 F_{est}	0,265	23,96	5,99
			0,4 F_{est}	2,143		
CP4	90,40	22,60	0,1 F_{est}	0,115	31,58	7,89
			0,4 F_{est}	1,540		
CP5	100,89	25,22	0,1 F_{est}	0,127	35,49	8,87

			0,4 F_{est}	1,395		
CP6	75,07	18,77	0,1 F_{est}	0,131	25,27	6,32
			0,4 F_{est}	1,912		

Fonte: Do autor.

O valor característico para um corte das ligações CLT/CONCRETO/CLT e CLT/CLT/CLT, foi determinado pelo intervalo de confiança com nível de significância de 95%. Os valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação e valor característico para os ensaios de cisalhamento direto estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valores estatísticos dos resultados dos ensaios dos modelos

Valor estatístico	Modelo CLT/CONCRETO/CLT	Modelo CLT/CLT/CLT
Média (kN)	27,35	21,06
Desvio Padrão (kN)	2,27	2,65
Coeficiente de Variação (%)	8,3	12,9
Valor Característico (kN)	24,96	18,27

Fonte: Do autor.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS FINAIS

7.1 Resistência característica dos resultados experimentais e as equações de Johansen

Para comparar os resultados experimentais com o método de cálculo da Eurocode 5 (2004), serão inicialmente transcritas as equações de Johansen. Elas servem para calcular a capacidade de carga característica de um conector para um corte no cisalhamento.

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(g)} \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & \text{(h)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases}$$

Com

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$$

Onde:

- $F_{V,Rk}$ é a capacidade de carga característica de um conector, para um corte.
- t_i é a espessura das peças a serem ligadas, sendo t_2 a espessura da peça central (para o modelo CLT/CONCRETO/CLT o t_2 é a espessura do concreto igual a 150 mm e para o modelo CLT/CLT/CLT é igual a 90 mm) e t_1 as peças laterais (para o modelo CLT/CONCRETO/CLT o t_1 é a espessura das placas de CLT igual a 90 mm e para o modelo CLT/CLT/CLT é igual a 90 mm).
- $f_{h,i,k}$ é a resistência característica de embutimento em cada peça i . Para o modelo CLT/CONCRETO/CLT o $f_{h,2,k}$ é a resistência característica ao

embutimento do concreto igual a 57,24 MPa e o $f_{h,1,k}$ é a resistência característica ao embutimento do CLT na direção 2L (com as 5 laminas normais às fibras) igual a 14,49 MPa. Para o modelo CLT/CLT/CLT o $f_{h,2,k}$ é a resistência característica ao embutimento do CLT na direção 3L (com 3 laminas paralela às fibras) igual a 16,17 MPa mm e o $f_{h,1,k}$ é a resistência característica ao embutimento do CLT na direção 2L (as 5 laminas normais às fibras) igual a 14,49 MPa.

- d é o diâmetro do parafuso 12,7 mm (1/2 polegadas).
- $M_{y,Rk}$ é o momento característico de escoamento do parafuso igual a 187,74 kN.mm.
- β é a relação entre a resistência de embutimento das peças a serem ligadas.
- $F_{ax,Rk}$ é o resistência característica ao arrancamento do parafuso igual a 25,582 kN.

No modo de ruptura IIIs (equação j), o primeiro termo do lado direito é a capacidade de carga de acordo com a teoria de escoamento de Johansen, enquanto o segundo termo $F_{ax,Rk}/4$ é a contribuição do efeito corda do parafuso. Segundo a Eurocode 5, a contribuição para a capacidade de carga devido ao efeito corda deve ser limitada, no caso de parafusos em 25% e para parafusos autoatarraxantes 100%.

Na Tabela 7.1, é apresentado os cálculos para os 2 tipos de modelos ensaiados.

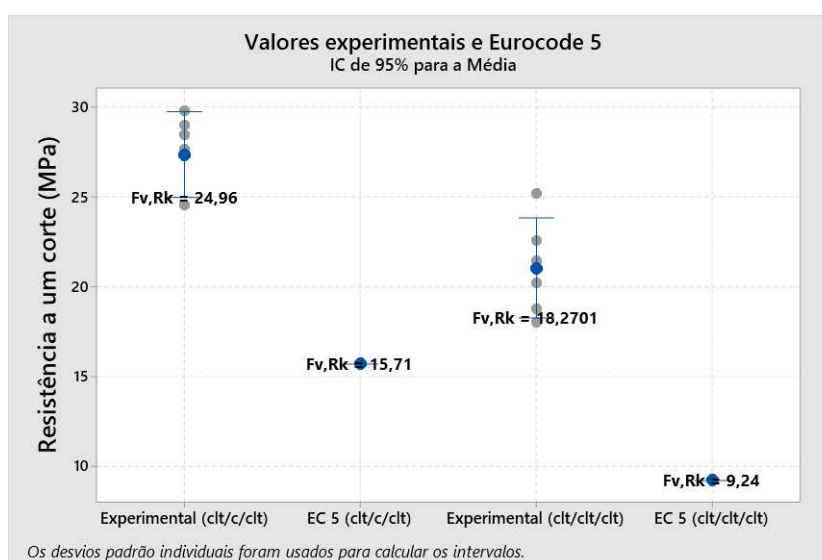
Tabela 7.1 – Contribuição do efeito corda

Contribuições	Modelo CLT/Concreto/CLT		Modelo CLT/CLT/CLT			
	β	Contribuição de cada parcela	Efeito corda	β	Contribuição de cada parcela	Efeito corda
β	3,54			1,12		
g		16,56			16,56	
h		54,52			9,24	
j		9,32	6,40		8,90	6,40
k		12,08	6,40		9,82	6,40
		Fv,Rk	15,71kN		Fv,Rk	9,24 kN

Fonte: Do autor.

No gráfico da Figura 7.1 é mostrado, para efeito de comparação, os resultados experimentais, incluindo os seus valores característicos e o valor determinado pela Eurocode 5 (2004), para os dois tipos de modelos. Essa discrepância nos resultados pode estar associada ao fato do parafuso estar colado ao modelo em todo o seu comprimento, assim o efeito de corda poderia ser considerado 100% da força característica de arrancamento. Mesmo assim, embora os valores aumentem, a resistência característica da ligação está limitada pela resistência ao embutimento da madeira.

Figura 7.1 – Resistência característica da ligação a um corte, experimental e Eurocode 5



Fonte: Do autor.

A discrepância desses resultados, mostrados na Figura 7.1, além da contribuição observada do efeito da colagem do parafuso no painel, também corrobora com o contemplado por Cunha (2012a). Nos ensaios por ele realizados, os valores obtidos pela metodologia preconizada pelo EC5 revelaram-se conservadores quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente. Branco (2009), também observou que o comportamento mecânico de estruturas mistas, tais como os elementos compostos de madeira e laje de concreto, é mais frequentemente influenciado pelo módulo de deslizamento da junção do que pela capacidade máxima de carga de ruptura da junta. Constatou que o método de projeto, de acordo com o EC5 para essas conexões, é baseado em coeficientes de modificação aplicados ao

módulo de deslizamento semelhante às conexões de madeira com madeira. Para a capacidade de suporte de cargas não é dado ou sugerido nenhum método simplificado. Demonstrou que o modelo de escoamento europeu, utilizado no EC5, é capaz de prever com confiabilidade o modo de falha da ligação. No entanto, como também considerado nessa pesquisa, os resultados dos testes por ele constatados, mostram valores significativamente diferentes dos obtidos usando o procedimento definido no EC5.

7.2 Resultados de ensaio do módulo de deslizamento e as diversas equações empíricas

Na Tabela 7.2, é apresentado na segunda coluna os resultados experimentais do módulo de deslizamento calculado com as fórmulas da EN 26891, para os dois tipos de modelos. Na terceira coluna os valores determinados pela fórmula apresentada pela Eurocode 5 (2004), equação E7.1, considerando parafuso autoatarrachante.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot \emptyset}{23} \quad (E7.1)$$

Onde:

ρ_m é a densidade média equivalente entre as peças de madeira em kg/m^3 , calculada por $\rho_m = \sqrt{\rho_{m1} \times \rho_{m2}}$, sendo $\rho_{m,1}$ e $\rho_{m,2}$ as densidades das madeiras a serem unidas. Quando a conexão é entre madeira e concreto usa-se o ρ_m da madeira e multiplica-se por 2.

\emptyset o diâmetro do parafuso em mm.

Na quarta coluna os valores determinados com a fórmula apresentada por Turrini (1983).

$$K_{ser} = 0,08 E \cdot d$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade do CLT na direção 3L, para o modelo CLT/CONCRETO/CLT e na direção 2L para o modelo CLT/CLT/CLT, em GPa
- d é o diâmetro do parafuso em mm.

Na quinta coluna os valores determinadas com a fórmula apresentada por Cecotti (1995).

$$K_{ser} = 0,125 E.d$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade do CLT na direção 3L, para o modelo CLT/CONCRETO/CLT e na direção 2L para o modelo CLT/CLT/CLT, em GPa
- d é o diâmetro do parafuso em mm.

Na sexta coluna os valores determinadas com a fórmula apresentada por Turrini e Piazza (1983).

$$K_{ser} = 0,16 E_{cm} d$$

Sendo:

- E_{cm} o módulo de elasticidade do CLT na direção 3L, para o modelo CLT/C/CLT e na direção 2L para o modelo CLT/CLT/CLT, em GPa
- d o diâmetro do parafuso em mm.

Na sétima coluna os valores determinados com a fórmula apresentada por Branco (2003).

$$K_{ser} = 0,15 E_{co,m}^{0,9} x d^{0,95}$$

Sendo:

- $E_{co,m}$ o módulo de elasticidade do CLT na direção 3L, para o modelo CLT/C/CLT e na direção 2L para o modelo CLT/CLT/CLT, em GPa
- d o diâmetro do parafuso em mm.

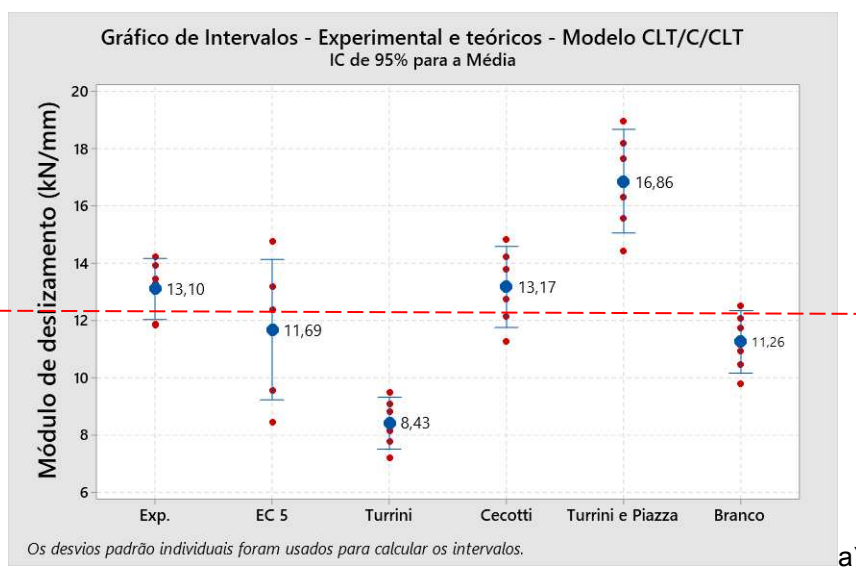
Tabela 7.2 – Valores do módulo de deslizamento preconizados por diversos autores

Tipo de modelo	EN 26891 (kN/mm)	EC 5 (kN/mm)	Turrini (kN/mm)	Cecotti (kN/mm)	Turrini e Piazza (kN/mm)	Branco (kN/mm)
Modelo CLT/C/CLT	13,44	14,78	9,49	14,82	18,97	12,53
	11,85	13,17	9,10	14,22	18,20	12,07
	14,22	9,56	7,78	12,15	15,55	10,48
	11,87	12,39	8,83	13,80	17,66	11,75
	13,30	8,46	7,22	11,27	14,43	9,79
	13,92	11,76	8,16	12,74	16,31	10,93
Modelo CLT/CLT/CLT	6,10	7,39	5,59	8,74	11,19	7,79
	7,31	6,58	4,98	7,78	9,96	7,02
	5,99	4,78	4,58	7,15	9,15	6,50
	7,89	6,20	4,87	7,60	9,73	6,87
	8,87	4,23	3,76	5,88	7,52	5,45
	6,32	5,88	4,74	7,41	9,48	6,71

Fonte: Do autor.

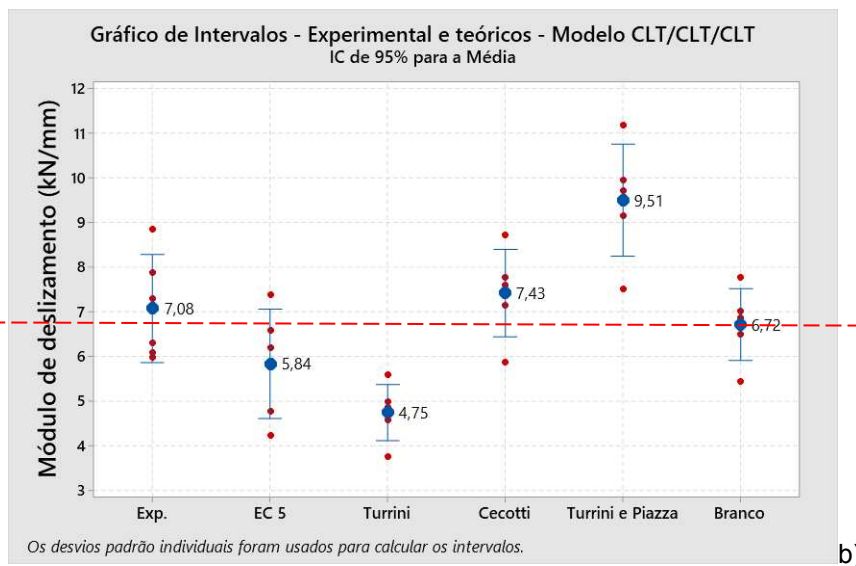
Nas Figuras 7.2 e 7.3 são mostrados os gráficos “Box-plotts” com os valores do módulo de deslizamento experimental, para cada proposta dos autores e para cada tipo de modelo. Numa análise simplificada, pode-se observar, que os módulos de deslizamento para as equações de EC 5, Cecotti e Branco tiveram um comportamento similar, já que é possível obter uma reta constante dentro do intervalo de confiança, como mostrado na Figura 7.2, para os dois tipos de modelos. As equações de Turrini e Cecotti fornecem valores muito diferentes.

Figura 7.2 - Gráfico com IC do módulo de deslizamento experimental e das equações dos autores, para modelo CLT/CONCRETO/CLT



Fonte: Do autor.

Figura 7.3 – Gráfico com IC do módulo de deslizamento experimental e das equações dos autores, para modelo CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

Para avaliar estatisticamente a diferença dos valores experimentais do módulo de deslizamento com as equações dos autores, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de um fator com nível de confiança de 95%. Foram utilizados os resultados da comparação de Tukey para testar formalmente se a diferença entre um par de grupos é estatisticamente significativa. Na Tabela 7.3 são mostrados os resultados

dessa análise entre os valores do módulo de deslizamento experimental e as equações dos autores.

Tabela 7.3 – Valor médio do Módulo de Deslizamento (ANOVA)

Tipo modelo	Valores	EN 26891 (kN/mm)	EC 5 (kN/mm)	Turrini (kN/mm)	Cecotti (kN/mm)	Turrini e Piazza (kN/mm)	Branco (kN/mm)
CLT/C/CLT	Média	13,10	11,69	8,43	13,17	16,86	11,26
	Des.Pad.	1,012	2,33	0,86	1,35	1,72	1,04
	IC	11,87;	10,46;	7,20;	11,94;	15,63;	10,03;
		14,33	12,92	9,66	14,40	18,09	12,49
Agrupamento	B	B	C	B	A	B	
CLT/CLT/CLT	Média	7,08	5,84	4,75	7,43	9,51	6,72
	Des. Pad.	1,15	1,16	0,60	0,93	1,20	0,76
	IC	6,25;	5,01;	3,93;	6,60;	8,68;	5,89;
		7,91	6,67	5,58	8,26	10,34	7,55
Agrupamento	B	B	C	B	A	B	

Fonte: Do autor.

As médias dos agrupamentos com as mesmas letras, indicam que as séries de valores (experimental e equações autores) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O estudo estatístico dos resultados indicou, na Tabela 7.3, que é possível afirmar que os valores obtidos pelas equações da EC 5, Cecotti e Branco não diferem dos valores experimentais com nível de significância de 95%. Esta afirmação é válida para ambos os modelos.

Por outro lado, indicou que há diferença estatisticamente significativa entre os resultados experimentais e os das equações de Turrini e Piazza, como pode ser observado na Tabela com as letras diferentes no teste de Tukey.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O propósito desse trabalho foi o desenvolvimento de um conector de aço, de concepção simples, para utilização em um sistema construtivo misto, composto de painéis de CLT e lajes de concreto pré-fabricadas, ambientalmente sustentável e que permita aos arquitetos e engenheiros, uma grande liberdade na solução estrutural para edifícios de andares múltiplos, sobretudo, com montagem rápida e aplicável a tipologias arquitetônicas variadas.

Na montagem dos modelos durante os ensaios, no que tange a fixação do conector no painel de CLT, não se observou nenhuma intercorrência, as operações ocorreram de forma simples sem nenhum comprometimento dos objetivos propostos.

Os resultados obtidos permitem concluir que:

- A solução adotada para o sistema de ligação embutido apareceu adaptável a diversas soluções de projeto tais como, de topo, de canto, em T, etc;
- O projeto do conector, com sua concepção simples, mostrou-se de fácil instalação e ajustável a variadas demandas de uso nas ligações entre painéis CLT e lajes de concreto, assim como, nas ligações de CLT com CLT;
- Os resultados dos ensaios, para a capacidade de resistência ao corte, mostraram que a metodologia preconizada pelo EUROCODE 5 revelou-se conservadora e que, em geral, podemos deduzir que as propriedades de resistência das conexões mistas de madeira e concreto devem ser avaliadas por ensaios;
- Os resultados dos ensaios, para verificação da rigidez das conexões mistas de concreto e madeira, corroboraram com a metodologia proposta pelo EC5 e com algumas equações de autores;
- Os painéis de madeira laminada colada cruzada fabricados no Brasil, especificamente os produzidos para essa pesquisa e fabricados pela CROSSLAM/BRASIL, pelos resultados dos ensaios de caracterização

realizados, mostraram-se adequados e eficientes para o uso estrutural, em conformidade com a demanda desse trabalho.

Como recomendações para trabalhos futuros propõe-se:

- Tendo em vista a alta resistência do conector utilizado, avaliar a influência do uso de conector mais esbelto e de ligas metálicas diferentes;
- Avaliar e testar novos projetos de conexão utilizando-se a mesma tipologia de conector metálico embutido.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BENEVOLO, Leonardo. **História da Arquitetura Moderna**. São Paulo: Perspectiva, 1976.

BLASS, H.J., *et al.* **Timber Engineering STEP 1**: Basis f design, material properties, structural components and joints”. 1º edition. The Netherlands: Centrum Hout, 1995.

BLASS, H.J.;BIENHAUS, A.; KRÄMER, V. Effective bending capacity of dowel-type fasteners. *In*: PROCEEDINGS PRO 22, INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON JOINTS IN TIMBER STRUCTURES, 2001. p. 71–80.

BRANCO, Jorge M.; CRUZ, Paulo J.S.; Piazza Maurício. Experimental Analysis of Laterally Loaded Nailed Timber-to-Concrete Connections. **Construction and Building Materials**, v.23, n.1, p.400-410, 2009.

CAPRETTI S, Ceccotti A, Senno M. On the experimental determination of strength and deformation characteristics of timber–concrete composite joints. *In*: 5TH WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING (WCTE). Montreux, Switzerland, 1998. p. 774.

CARVALHO, Eliene Pires. Influence of Test Specimen on Experimental Characterization of Timber : concrete Composite Joints. **Construction and Building Materials**, v.24, n.8, p.1313-1322.DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.036

CARVALHO, Eliene Pires. **Avaliação do Comportamento mecânico ao Cisalhamento de Conectores de Barras de Aço com Ganchos em Vigas Mistas de Madeira Laminada Colada e Concreto**.158f.Tese (Doutorado em Engenharia) -

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em : <http://hdl.handle.net/1843/PASA-8A2JDT>. Acesso em: maio 2022.

CASSOL - Pré-fabricados, catálogo, 2015.

CECCOTTI, A. Timber–concrete composite structures. *In*: BLASS HJ et al., editors. **Timber engineering STEP 1**. Lecture E13; 1995.

CLT. Cross laminated Timber. **Handbook**. US Edition: FPInovations and Binational Softwood Lumber Council, 2013. Disponível em: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5577290/PDFs/CLT%20Handbook/CLT_USA-Complete-document-Think_Wood.pdf. Acesso em : maio 2022.

CUNHA, João. **Ligações Estruturais de Madeira Laminada Colada Cruzada (CLT) Utilizando Parafusos Autoperfurantes**. Dissertação (Mestrado) - ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2012a. Disponível em : <https://hdl.handle.net/1822/21153>. Acesso em: maio 2022.

CUNHA, J.; *et al.* Structural Joints Of Cross Laminated Timber (Clt) With Self-Drilling Screws ,. *In*: XXXV JORNADAS SUL AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL. **Anais...**RJ, setembro 2012b. (structures: general rules and rules for buildings).

DIAS, A.M.P.G. **Mechanical behaviour of timber–concrete joints**. PhD thesis; 2005. ISBN 90-9019214-X.

DUARTE, Renata S. **Avaliação do Comportamento de Ligações com Parafusos Auto-Atarraxantes em Vigas de MLC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira**: retratibilidade. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992. 33p. (Série técnica, 10).

EN 1994-1-1:2004. **Eurocode 4**: design of composite steel and concrete. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

EN 1994-1-1:2004. **Eurocode 4**: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

EN 1995-1-1:2003. **Eurocode 5**: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

EN 1995-1-1:2004. **Eurocode 5**: design of timber structures – Part 1.1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

EN 1995-2:2004. **Eurocode 5**: design of timber structures – part 2: bridges. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (E).

EN 26891:1991. **Timber structures** – joints made with mechanical fasteners – general principles for the determination of strength and deformation characteristics. ISO 6891-1983 (E). European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

EN 383: 1993 .**Timber structures** – test methods – determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (E).

EN 409:1993. **Timber structures** – test methods – determination of the yield moment for dowel type fasteners – nails, European committee for standardization, Brussels, Belgium, (E).

ESPINOZ,A O.; *et al.* Cross-Laminated Timber: Status and research Needs in Europe.**Bioresources**, v.11, n.1,p. 281-295. 2016.

EUROCODE 4 - (draft 2000) – Desing of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1 : General Rules an Rules for Buildings, Brussels.

EUROCODE 5- partes 1 e 2 (drafts 2002 e 2003) – Desing of timber structures – General rules and rules for builings, European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

FOLIENSTE, Greg C.; LEICESTER, Robert H. Evaluation of mechanical joint systems in timber structures. *In*: PROCEEDINGS OF THE 25TH FOREST PRODUCTS RESEARCH CONFERENCE, Clayton, Victorid, Australia, Nov. 18-21, 1996.

GELFI P., E. **Giuriani** Stud shear connectors in wood–concrete composite beams. *In*: PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON TIMBER ENGINEERING, Stockholm, Sweden, 13–15 September, RILEM Publications S.A.R.L, 1999.

JOHANSEN, K.W. Theory of Timber Connections. **International Association of Bridge and Structural Engineering Publications**, v. 9, p.249-62.1949.

JOHNSON RP, Anderson D. **Designer’s handbook to Eurocode 4 – Part 1.1:** Design of composite steel and concrete structures. London; 1993.

JULAR Madeiras. **Catálogo**. Lisboa, 2014.

KLH. Made For Building. Built for Living. **Catálogo**. [s.l]:[s.n], 2014. Disponível em: <https://www.klhuk.com/>. Acesso em : maio 2022.

MANTILLA, Carrasco E.V. **Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensões nas Vigas Retas de Madeira Laminada Colada**. Tese (Doutorado). Universidade de São Carlos, São Carlos, 1989.

MASCIA N, Soriano J. Comportamento mecânico de ligações flexíveis em vigas mistas de concreto-madeira. *In*: VII EBRAMEM (MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA), **Anais...** S. Carlos, Brasil, 2000.

MIOTTO José Luiz. Produção e Avaliação de Vigas de Madeira Laminada Colada Confeccionadas com Lâminas de Eucalipto. **Revista Tecnológica - Edição Especial ENTECA**, p. 35-45, 2009.

MOODY, R. C. *et al.* Glued structural members. *In*: **Wood Handbook** – Wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, chapter 11, 24 p.)

MORESCHI, João Carlos. **Propriedades da Madeira**. Apostila editada pelo Ministério de Educação e do Desporto, Setor de Ciências Agrárias da UFPR, Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba, fevereiro 2005.

MUSZYNSKI, L. The CLT talk. *In*: 2015 SMALL LOG CONFERENCE (PowerPoint Presentation), **Anais...** Forest Business Network, Coeur d'Alene, ID, 2015.p. 245–54

PIGOZZO, Júlio César. **Estudos e Aplicações de Barras de Aço Coladas, como Conectores em Placas Mistas de Madeira e Concreto para tabuleiros de Pontes**. Tese (Doutorado) -Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004. Disponível em:
<http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/1358>. Acesso em: maio 2022.

PLACKER, H. Brettsperrholzwlichst global. **Holzkurier**, p. 12-13. 2015.

QUENNEVILLE, J.; MOHAMMAD, M. On the failure modes and strength of steel-wood-steel bolted timber connection. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 24, n.4, 2000. (ProQuest Science Journals.)

ROTHOBLAAS. **Chapas e Ligadores para Madeira**: catálogo. Cortaccia (BZ): OTHO BLAAS SRL, 2015. Disponível em: <https://www.rothoblaas.pt/produtos/fixacao/angulares-e-placas>. Acesso em: maio 2022.

SANTOS, Roberto Eustaquio dos. A cultura do concreto armado no Brasil: educação e deseducação dos produtores do espaço construído. *In*: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE HISTÓRIA DA EDUCAÇÃO. **Anais** ...Goiânia: Universidade Católica de Goiânia, 2006

SMITH, Ian; FOLIENSTE, Greg. Load and Resistance Factor Design of Timber Joints: International Practice and Future Direction. **Journal of Structural Engineering**, Jan. 2002, p. 48-59.

SORIANO J, Mascia N. Mechanical behaviour of flexible connections in the timber–concrete composite beams. Joints in timber structures. *In*: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, Aicher S., Reinhardt H.-W. (editors)., Stuttgart, Germany, p. 291–300.

STANDARDS AUSTRALIA/NEW ZEALAND – Draft Australian/New Zealand Standard: AS BBBB. **Timber** – Methods for evaluation of mechanical joint systems. Australia, Apr. 1997.

THELANDERSSON, S.; HANS, J. **Timber Engineering**. Wiley, New York, 2003.

TURRINI, G.; PIAZZA M. Una tecnica di recupero statico dei solai in legno. **Revista técnica. Recuperare**, n. 5, 6, 7, 1983.

VASCONCELOS, Augusto Carlos. **O Concreto no Brasil**: Recordes - Realizações - História. São Paulo: Copiare, 1985.

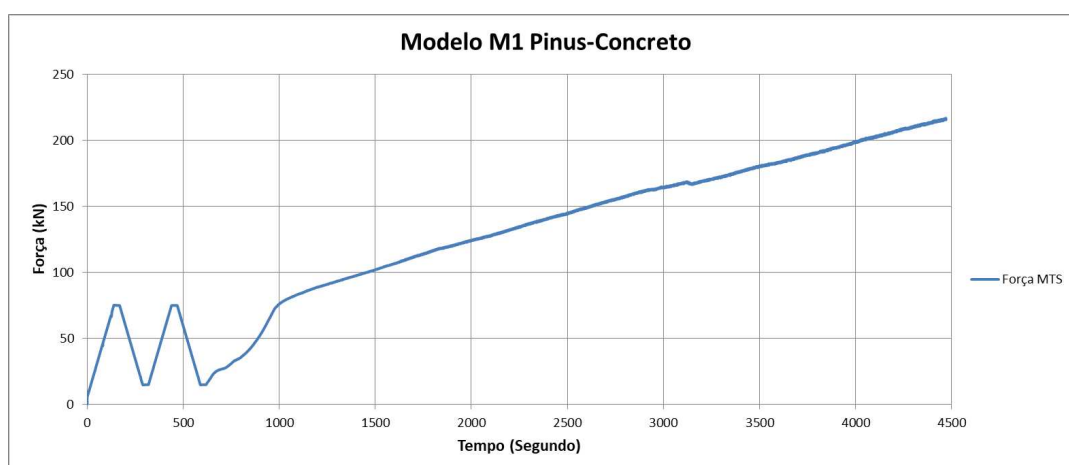
APÊNDICE A1

São mostrados a seguir, os gráficos plotados dos resultados aferidos nos ensaios realizados com os modelos de centro de concreto e laterais de madeira laminada colada cruzada.

1.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS MODELOS CLT/CONCRETO/CLT

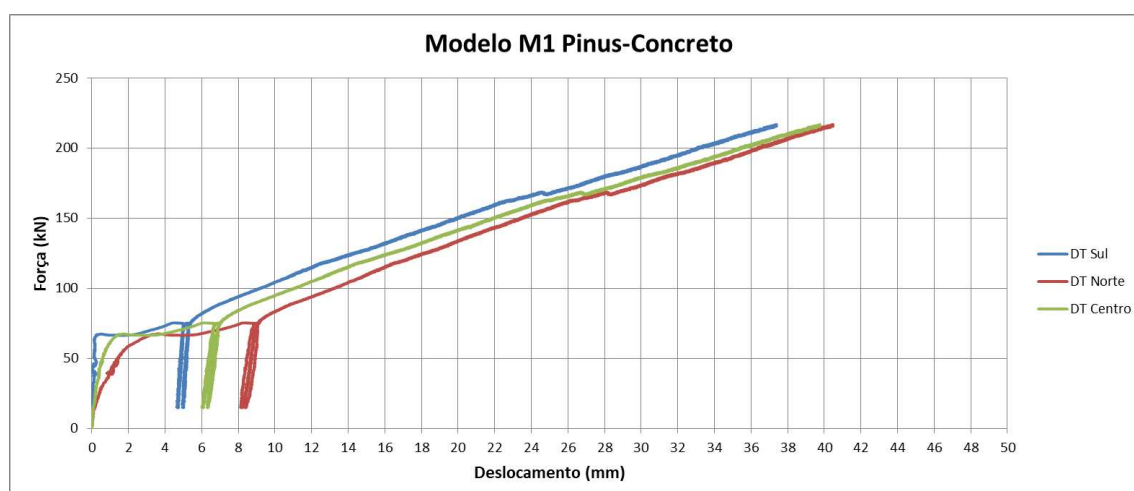
1.1.1. MODELO M1

Figura A.1–Gráfico força x tempo modelo M1 – CLT/concreto/CLT



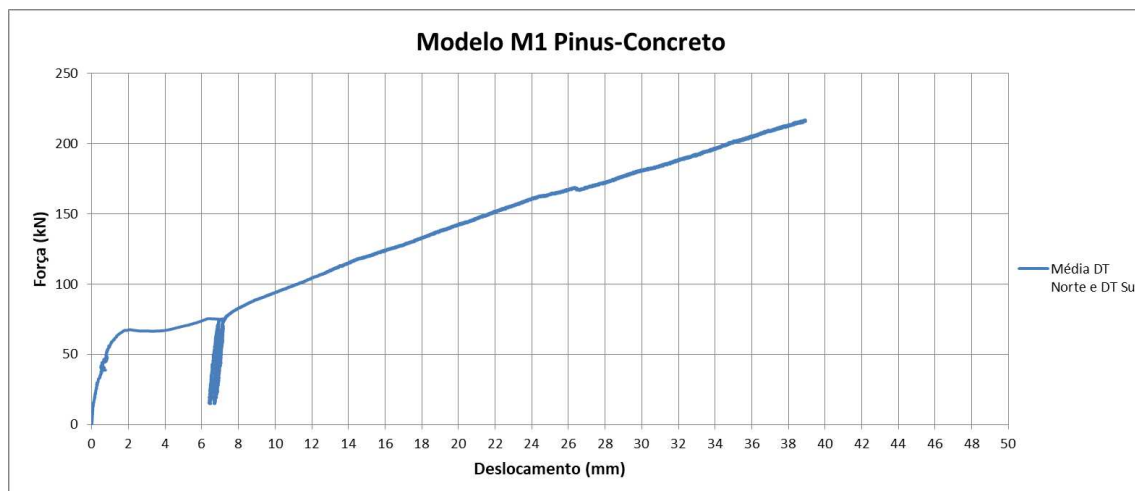
Fonte: Do autor.

Figura A.2–Gráfico força x deslocamento de todos os DTs, modelo M1 – CLT/concreto/CLT



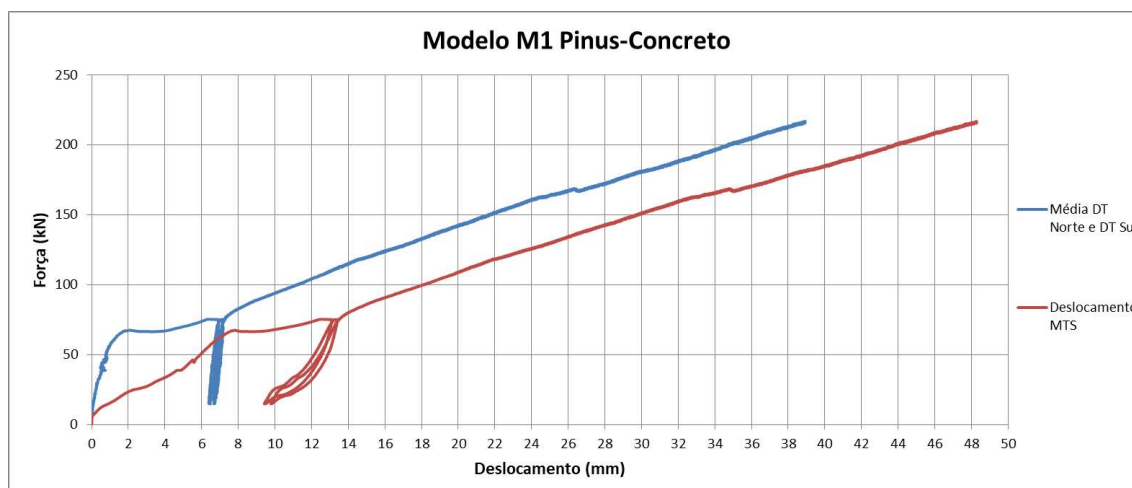
Fonte: Do autor

Figura A.3—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte e sul, modelo M1 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

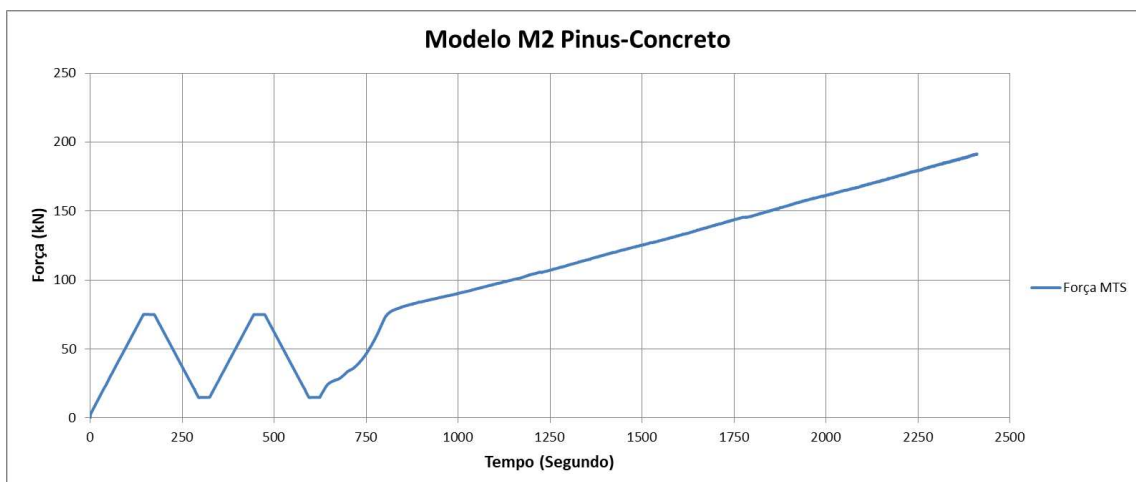
Figura A.4—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M1 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

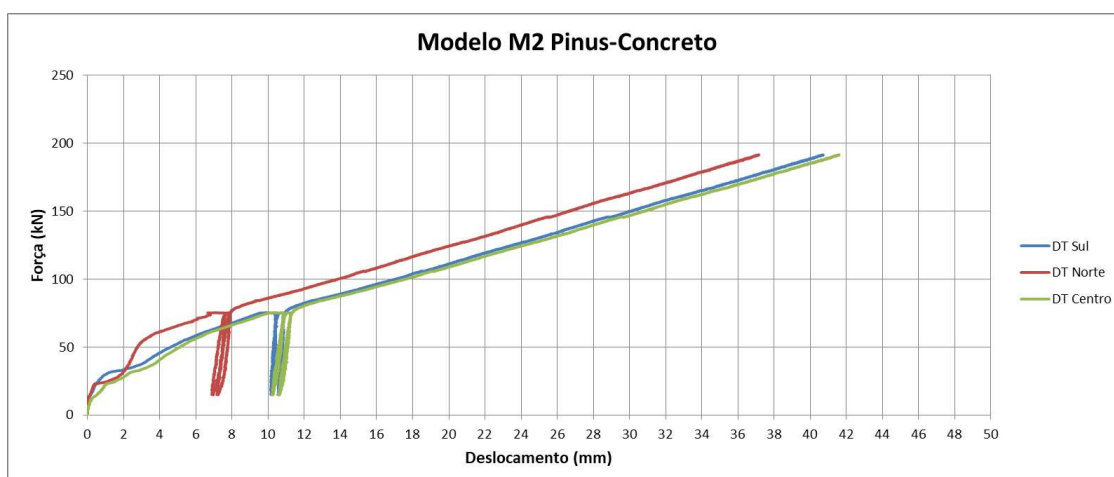
1.1.2 MODELO M2

Figura A.5–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M2 – CLT/concreto/CLT



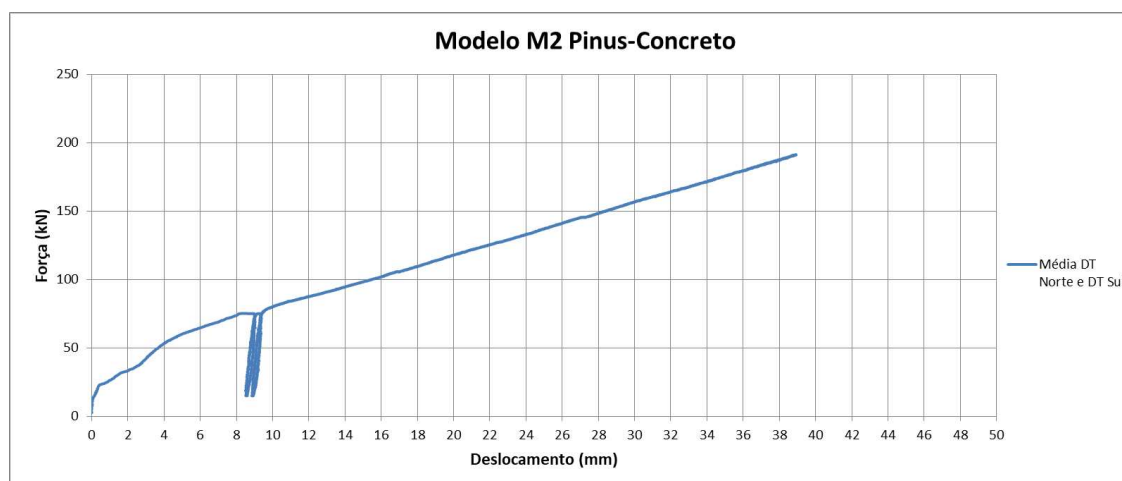
Fonte: Do autor.

Figura A.6–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M2 – CLT/concreto/CLT



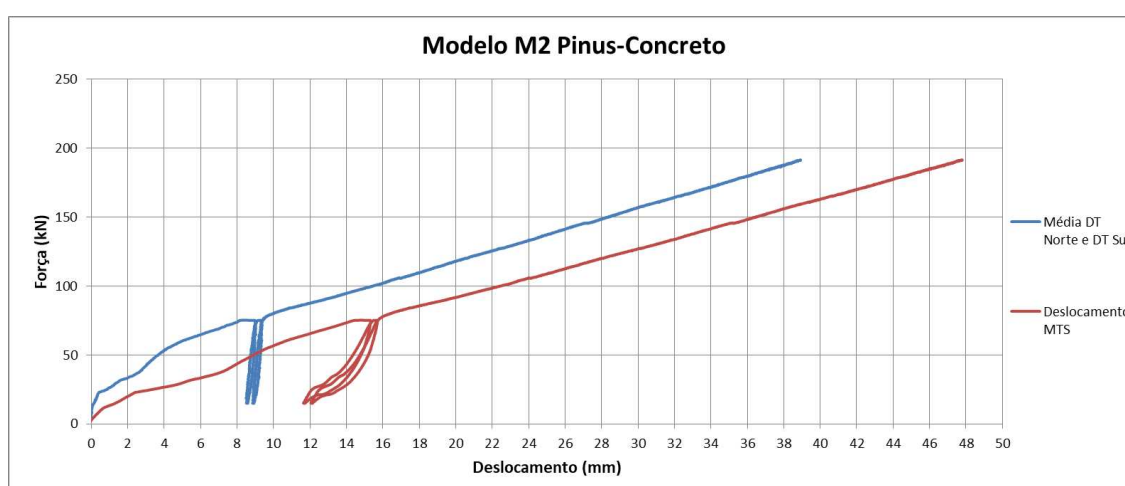
Fonte: Do autor.

Figura A.7–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M2 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

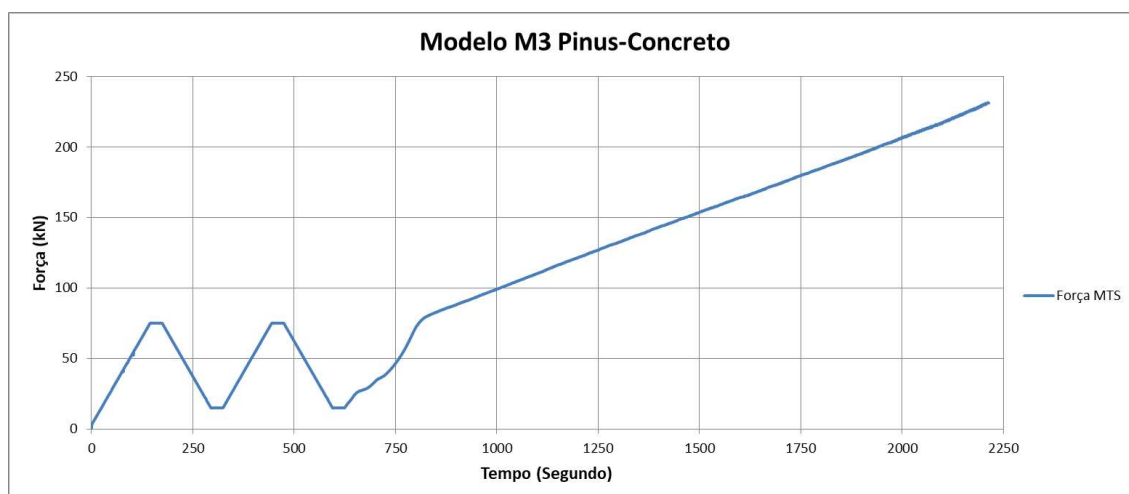
Figura A.8–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M2 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

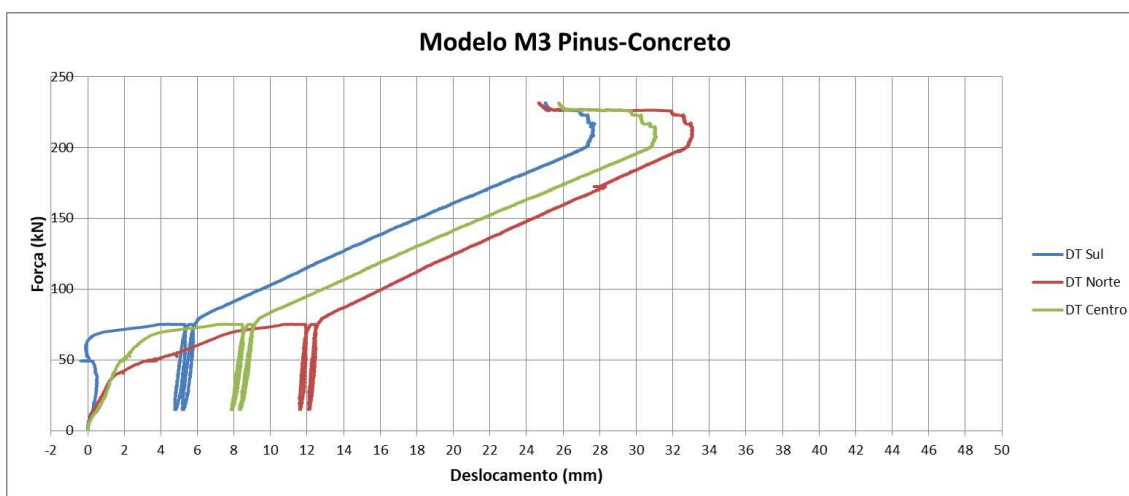
1.1.3 MODELO M3

Figura A.9–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M3 – CLT/concreto/CLT



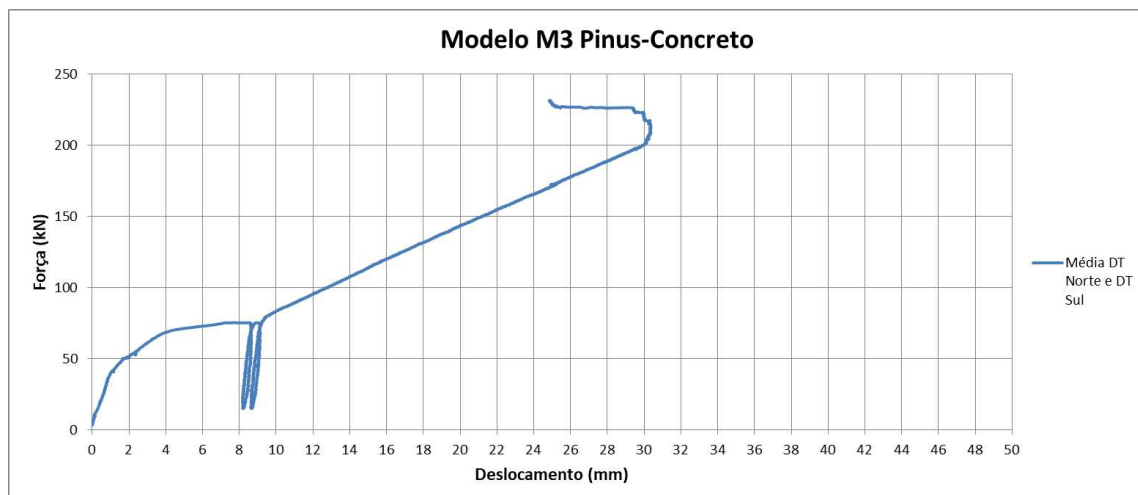
Fonte: Do autor.

Figura A.10–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M3 – CLT/concreto/CLT



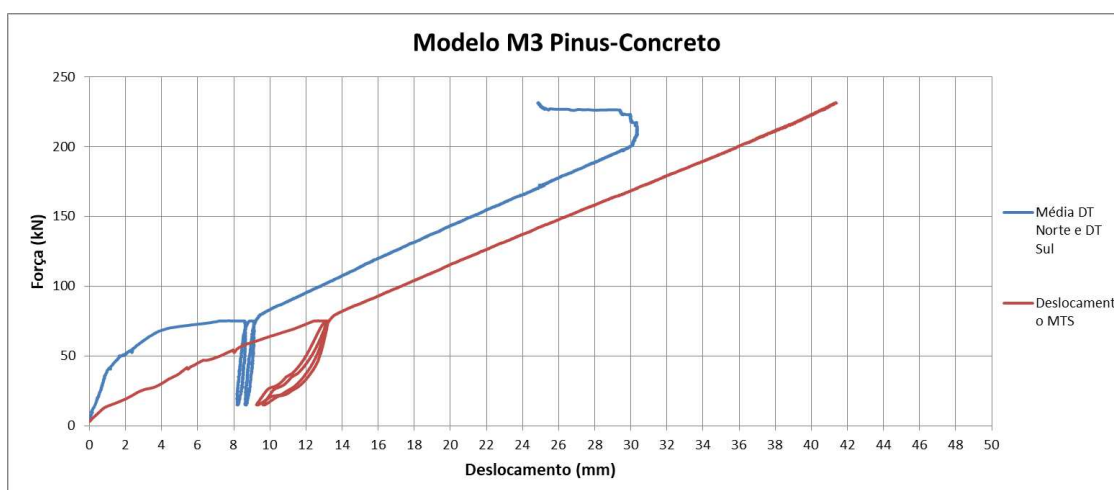
Fonte: Do autor.

Figura A.11–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M3 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

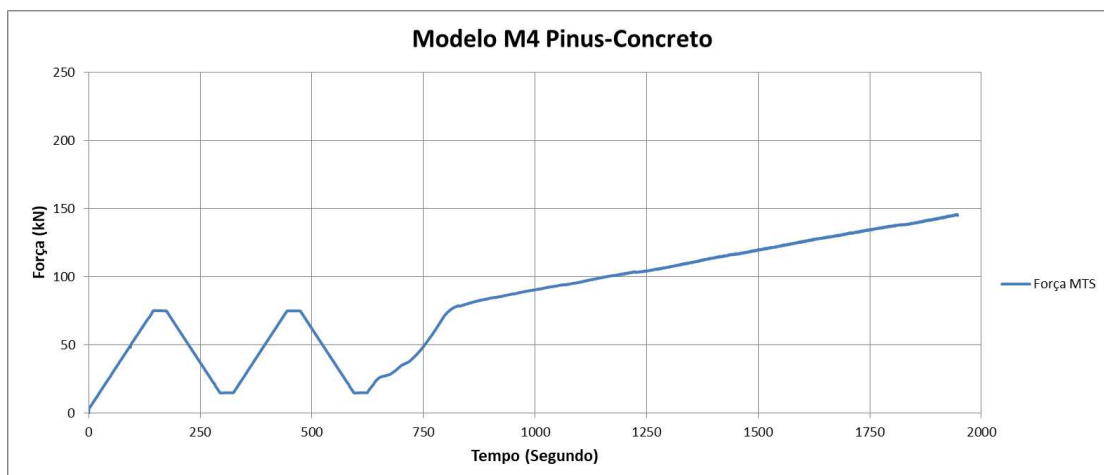
Figura A.12–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M3 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

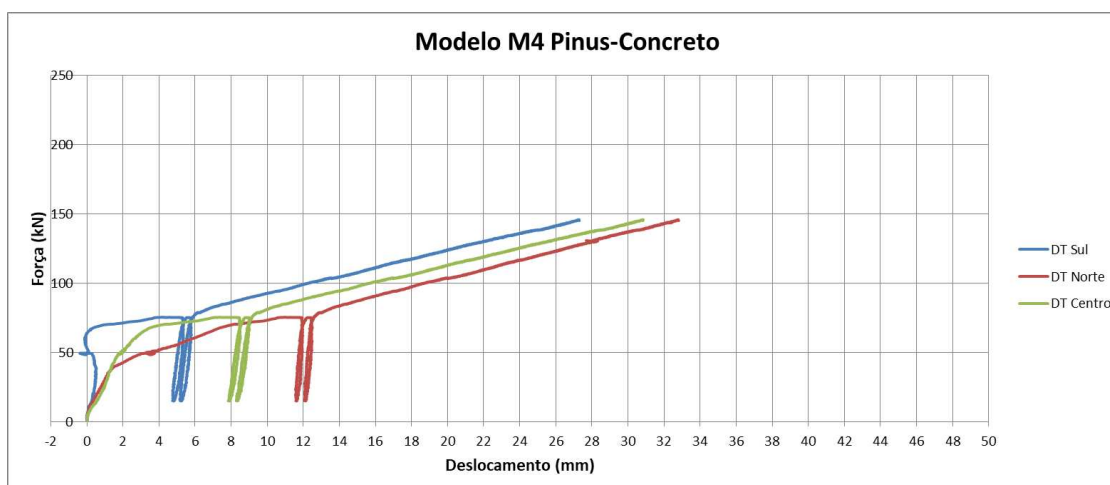
1.1.4 MODELO M4

Figura A.13–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M4 – CLT/concreto/CLT



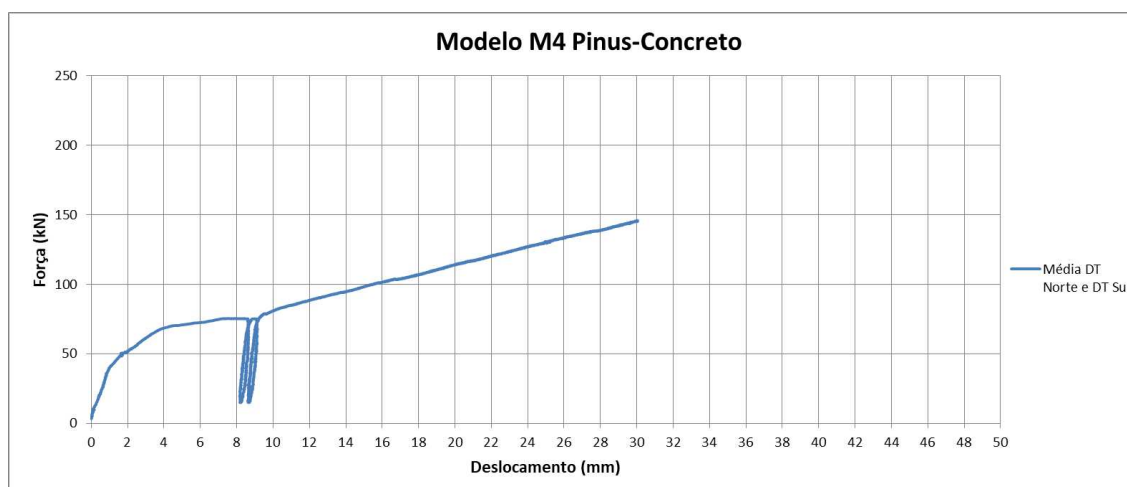
Fonte: Do autor.

Figura A.14–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M4 – CLT/concreto/CLT



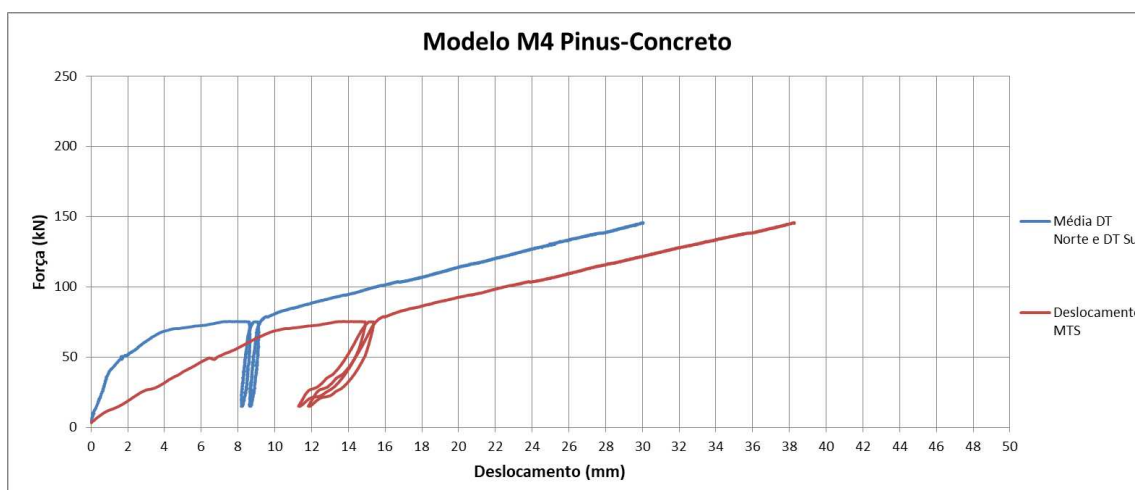
Fonte: Do autor.

Figura A.15—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte, modelo M4 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

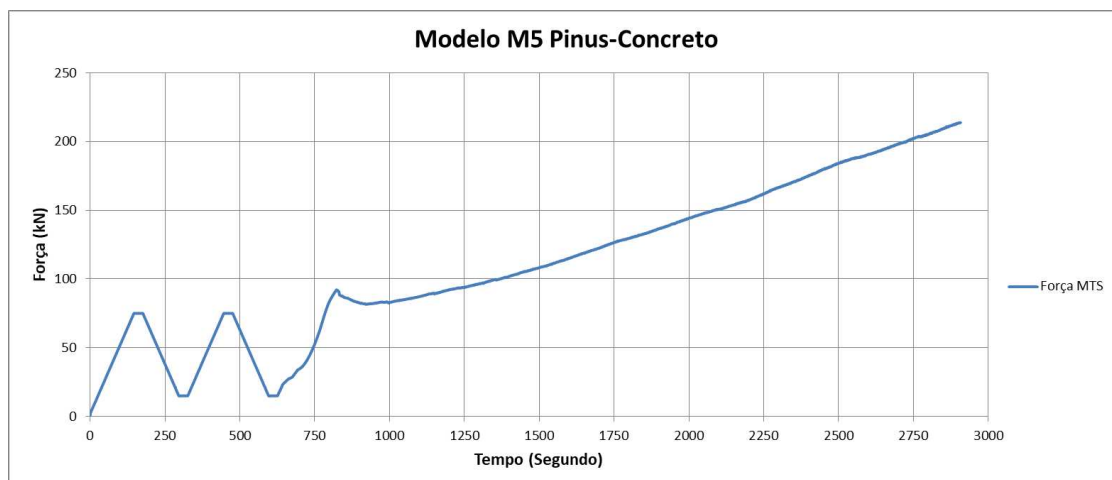
Figura A.16—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M4 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

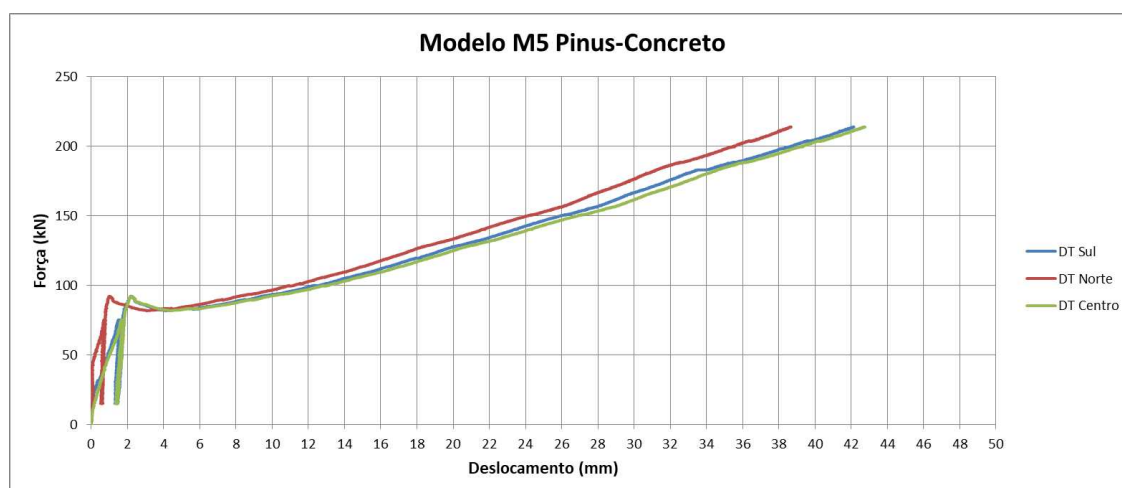
1.1.5 MODELO M5

Figura A.17–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M5 – CLT/concreto/CLT



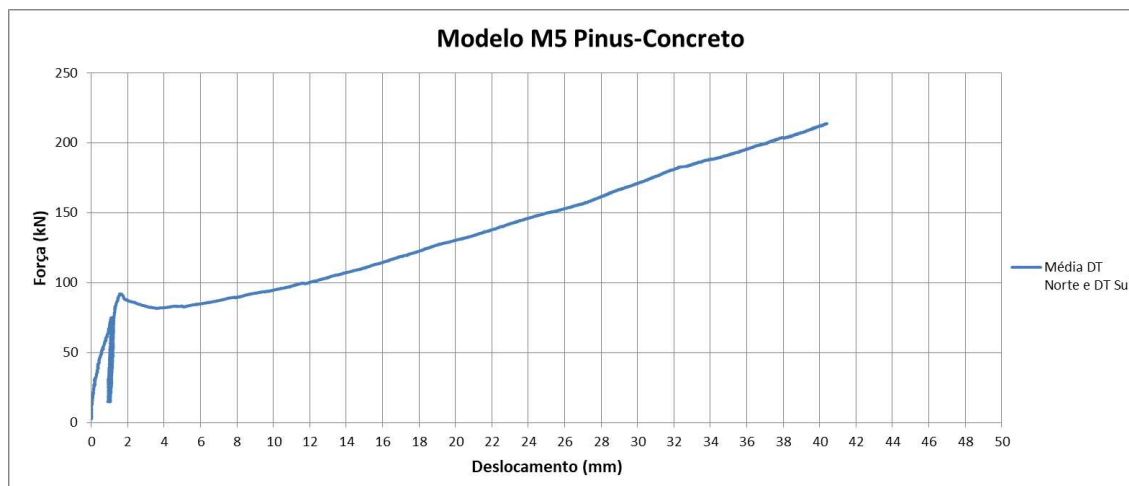
Fonte: Do autor.

Figura A.18–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M5 – CLT/concreto/CLT



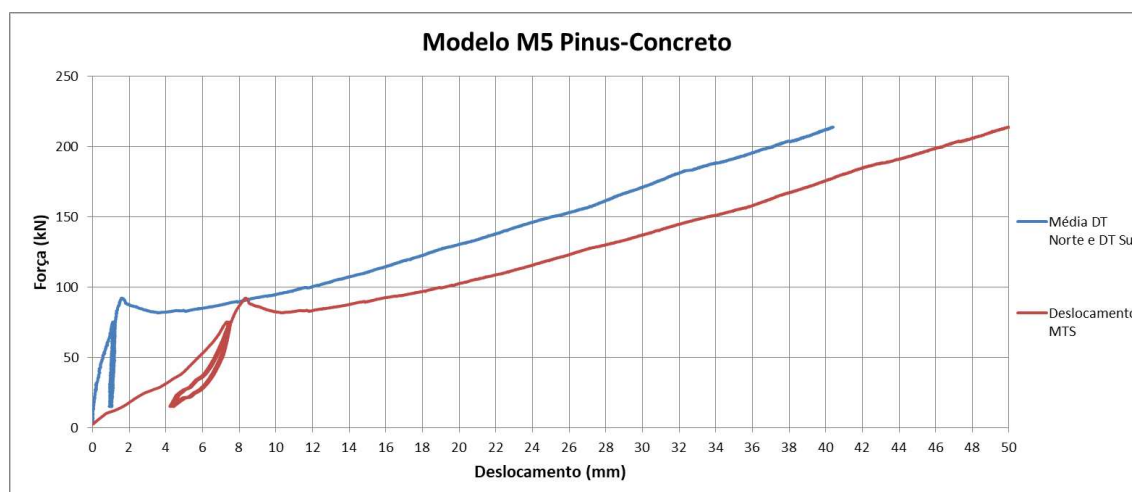
Fonte: Do autor.

Figura A.19–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M5 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

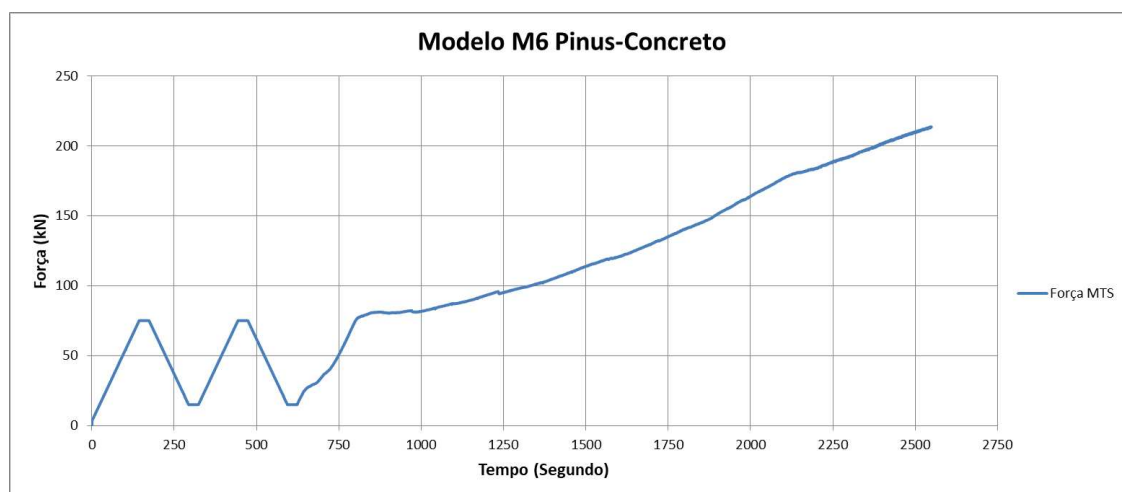
Figura A.20–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M5 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

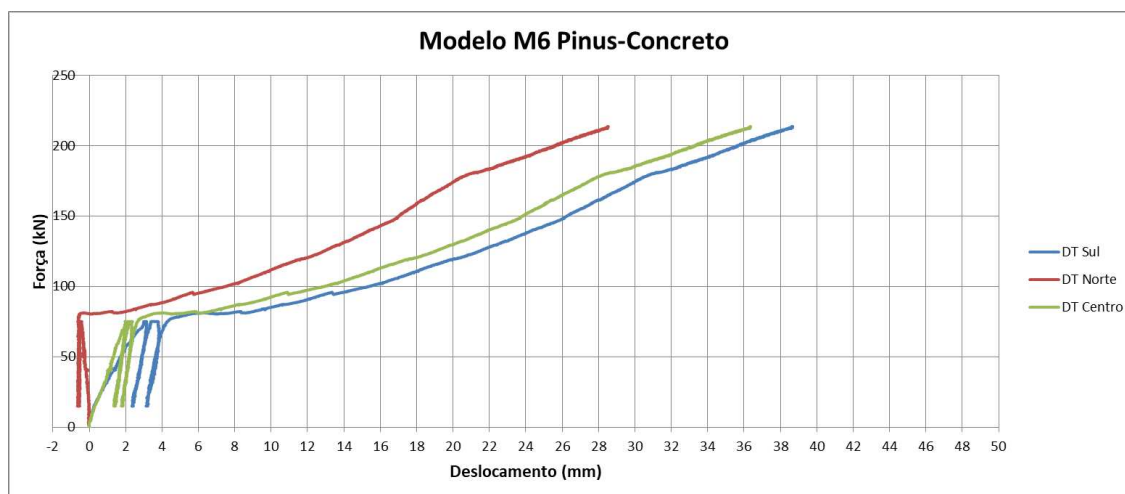
1.1.6 MODELO M6

Figura A.21–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M6 – CLT/concreto/CLT



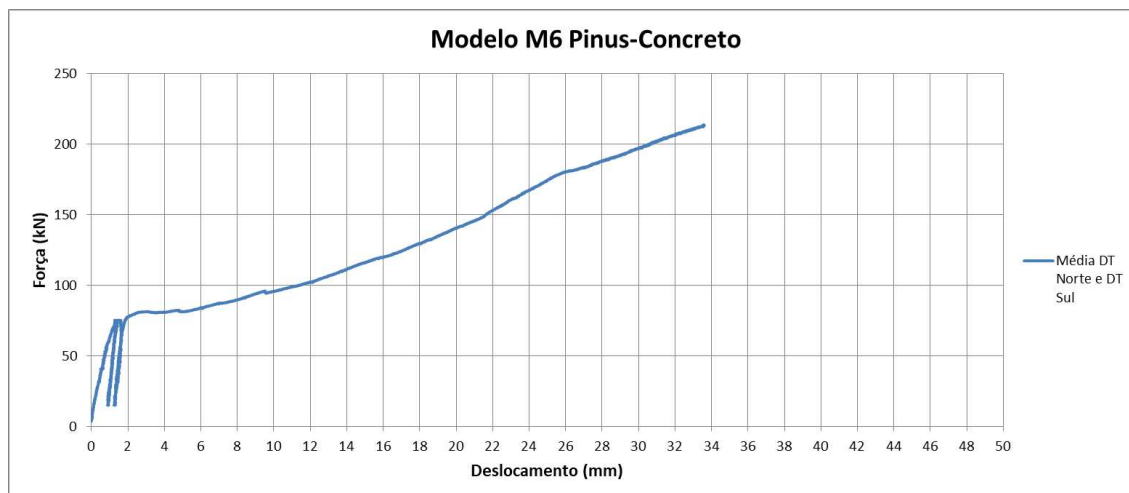
Fonte: Do autor.

Figura A.22–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M6 – CLT/concreto/CLT



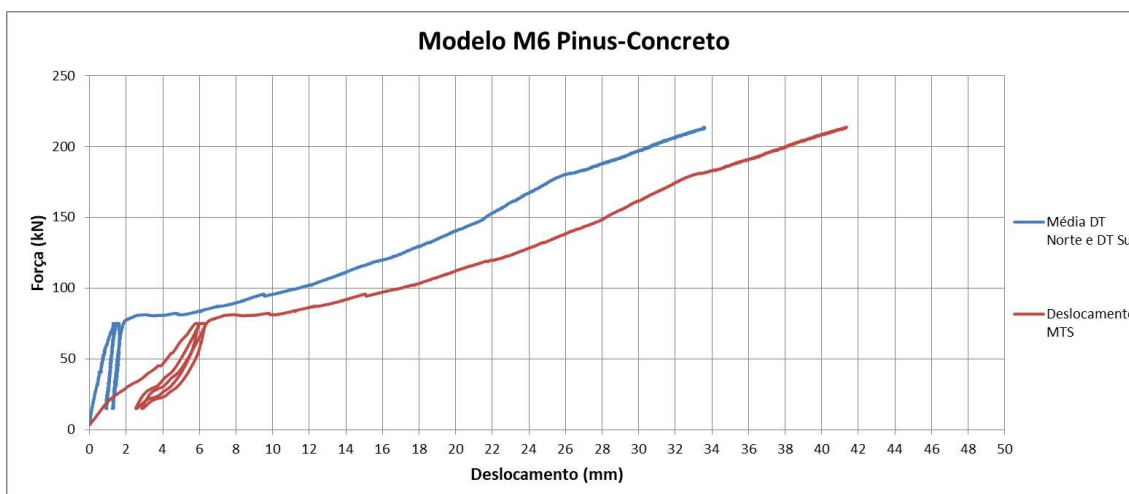
Fonte: Do autor.

Figura A.23–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M6 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

Figura A.24–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M6 – CLT/concreto/CLT



Fonte: Do autor.

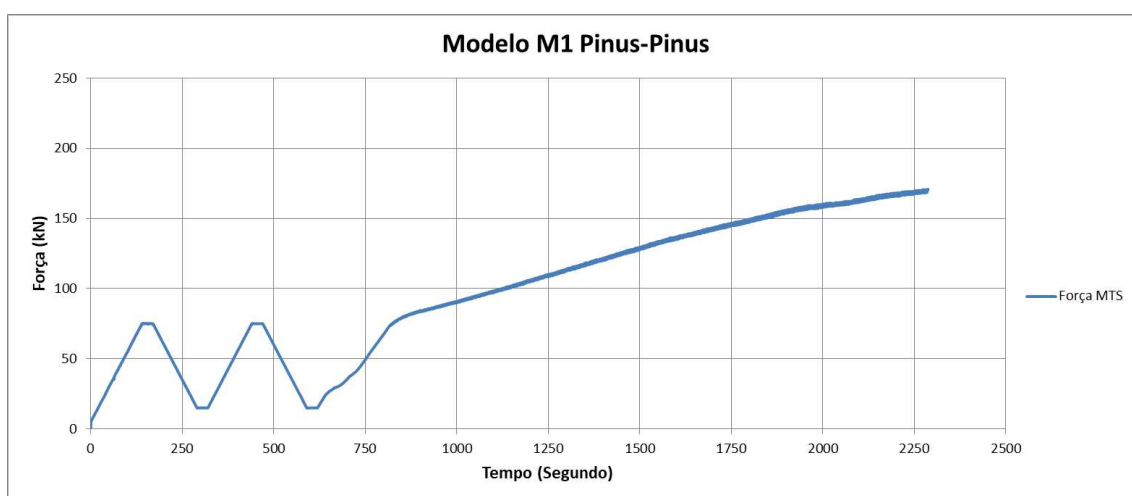
APÊNDICE A2

São mostrados a seguir, os gráficos plotados dos resultados aferidos nos ensaios realizados com os modelos de centro de madeira e laterais de madeira laminada colada cruzada.

2.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS MODELOS CLT/CLT/CLT

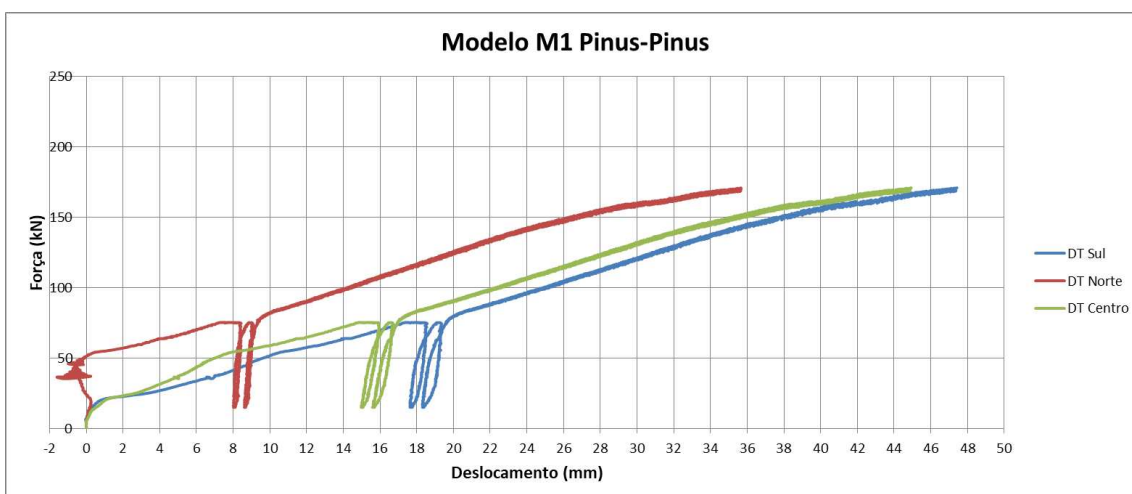
2.1.1 MODELO M1

Figura A.25–Gráfico força x tempo, modelo M1 – CLT/CLT/CLT



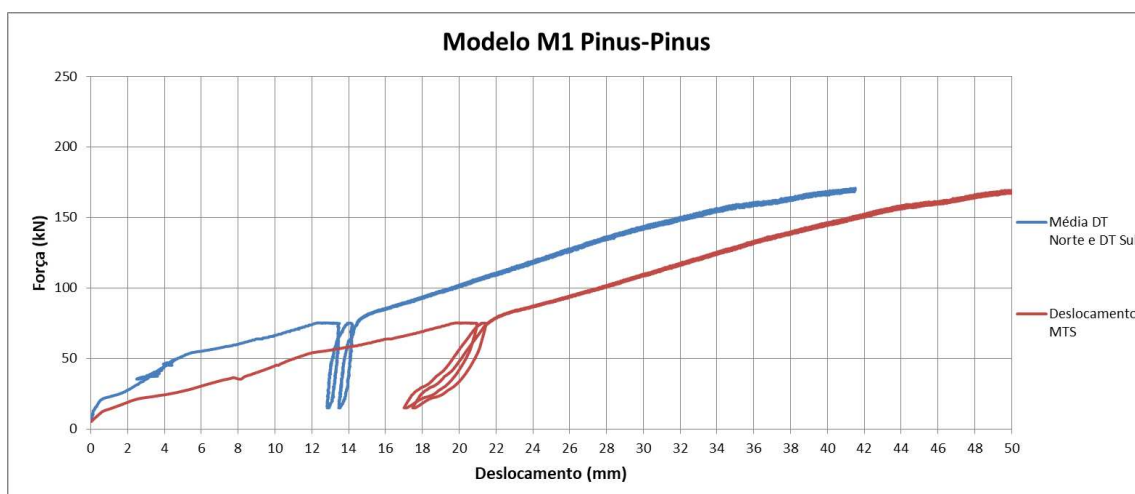
Fonte: Do autor.

Figura A.26–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M1 – CLT/CLT/CLT



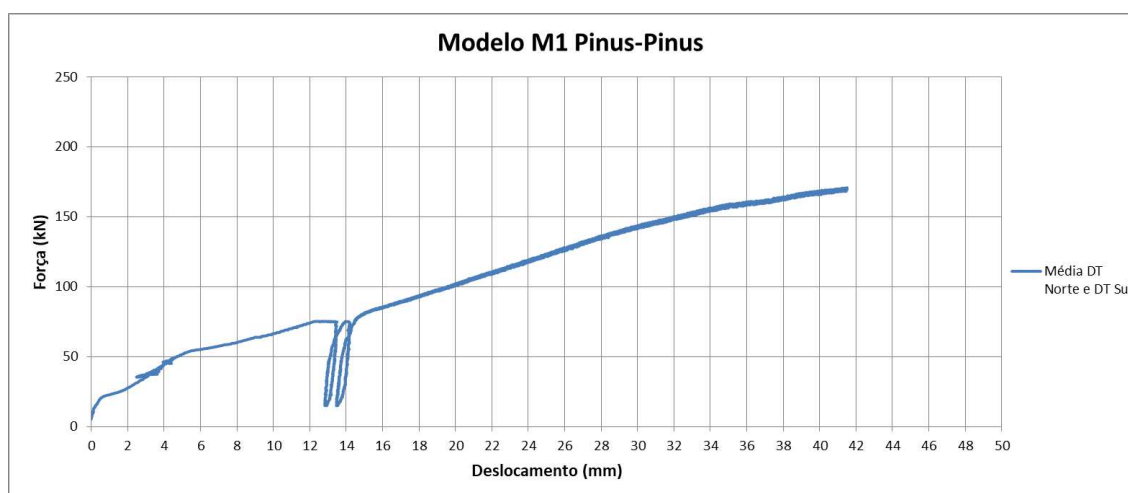
Fonte: Do autor.

Figura A.27–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M1 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

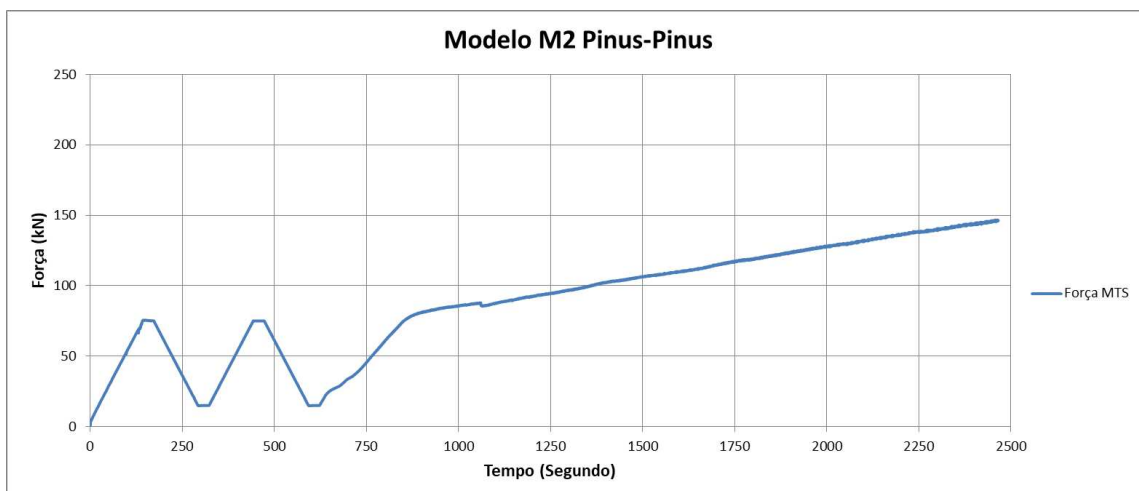
Figura A.28–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M1 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

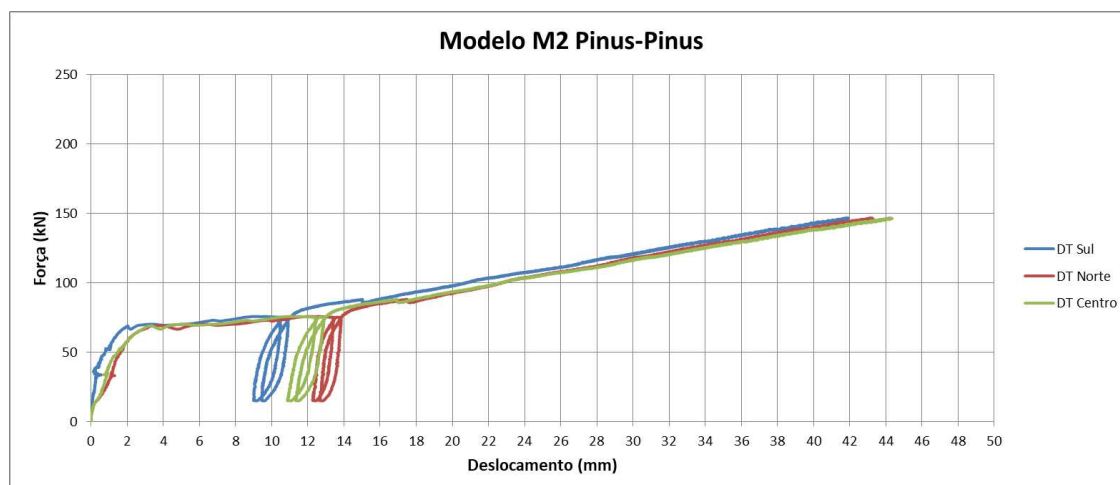
2.1.2 MODELO M2

Figura A.29–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M2 – CLT/CLT/CLT

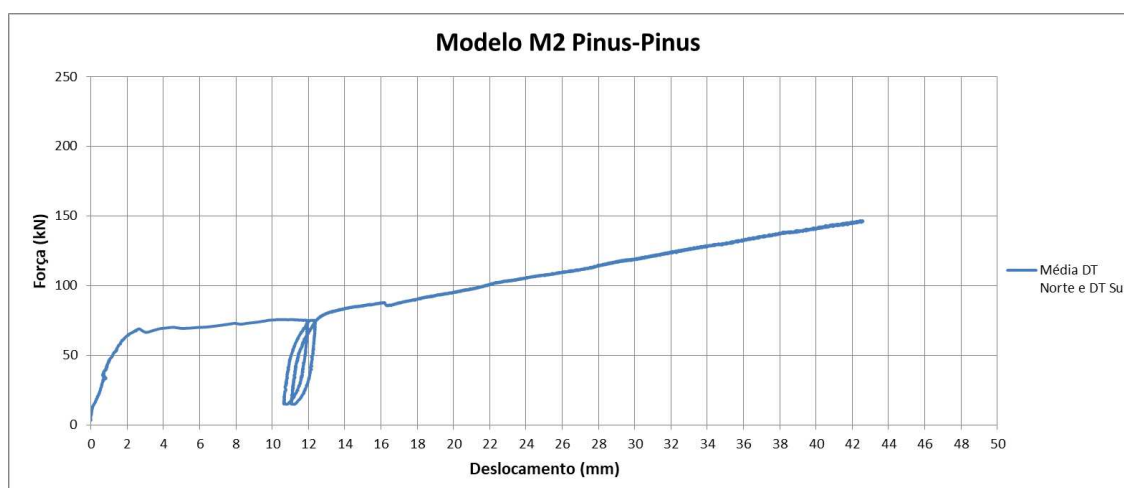


Fonte: Do autor.

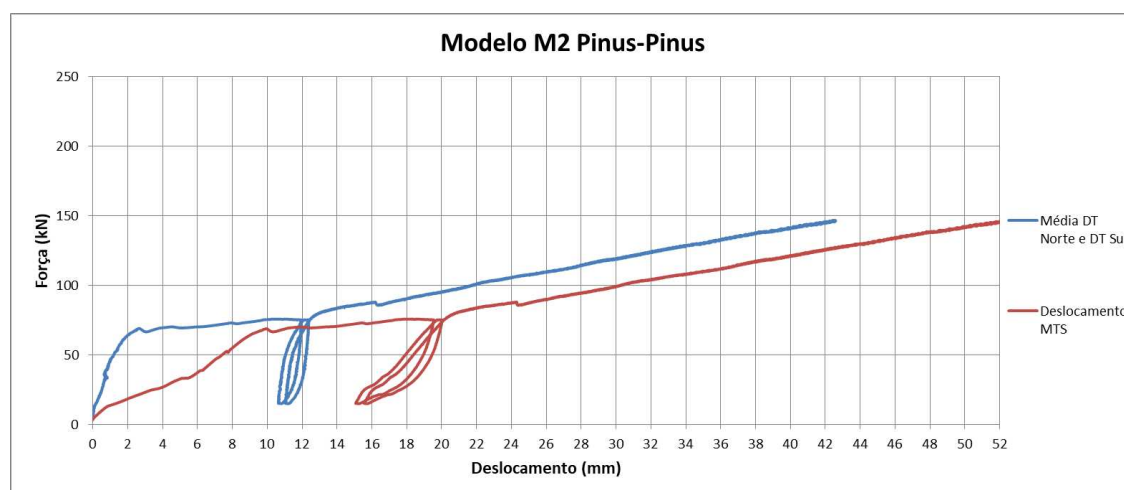
Figura A.30–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M2 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

Figura A.31–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M2 – CLT/CLT/CLT

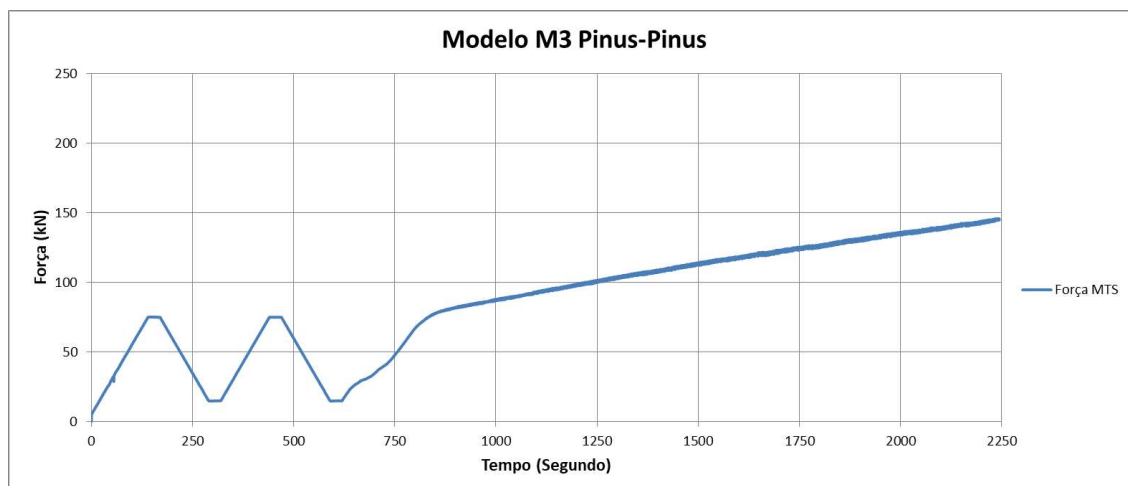
Fonte: Do autor.

Figura A.32–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M2 – CLT/CLT/CLT

Fonte: Do autor.

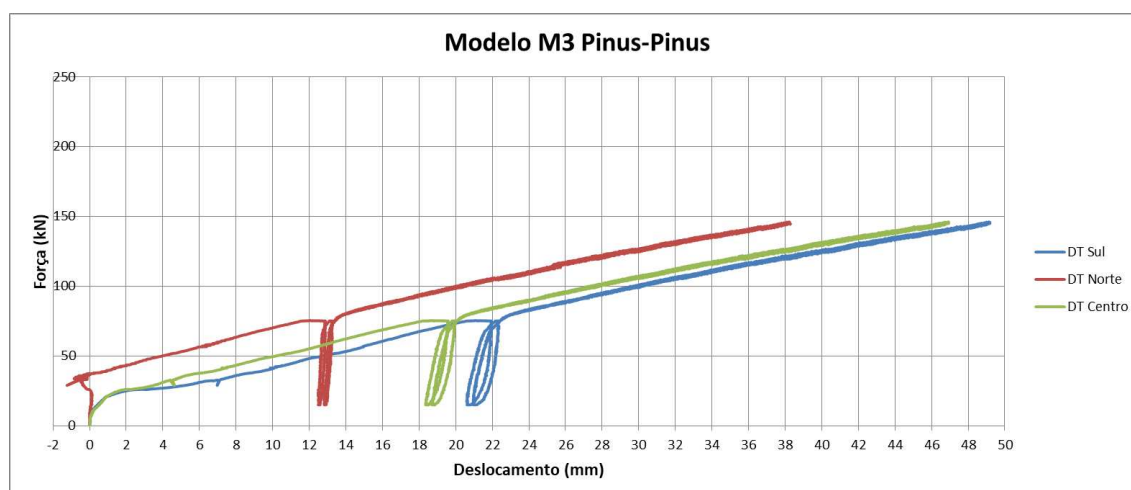
2.1.3 MODELO M3

Figura A.33–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M3 – CLT/CLT/CLT

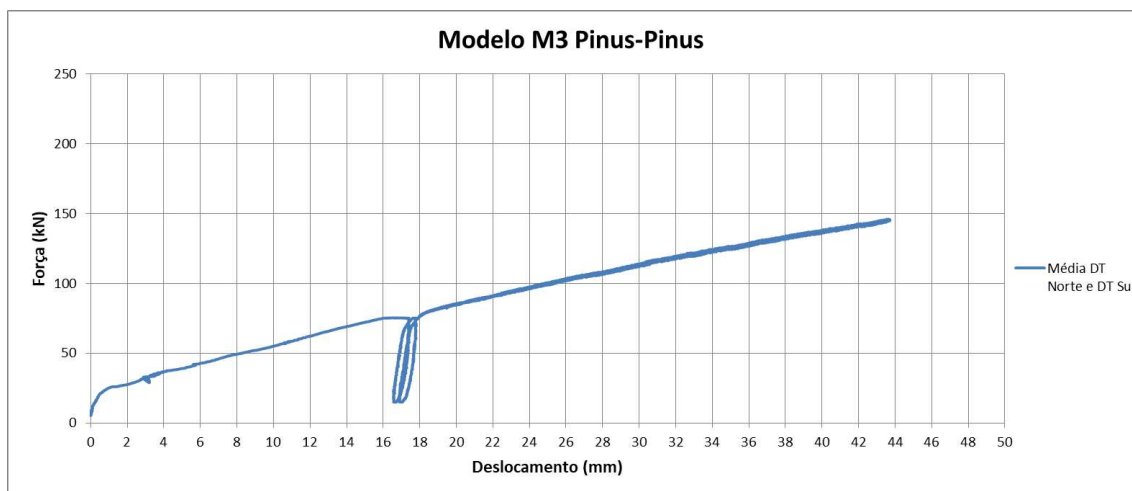


Fonte: Do autor.

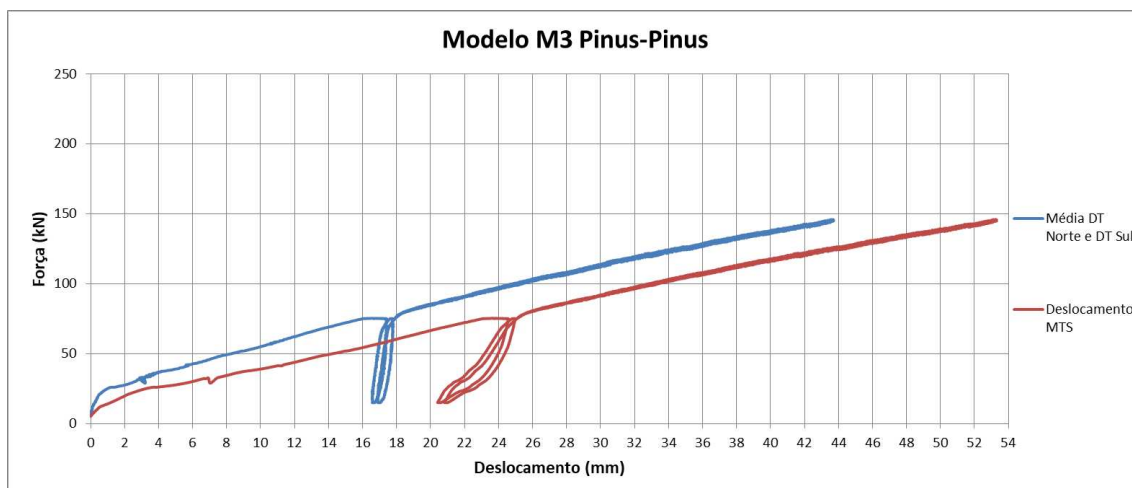
Figura A.34–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M3 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

Figura A.35—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M3 – CLT/CLT/CLT

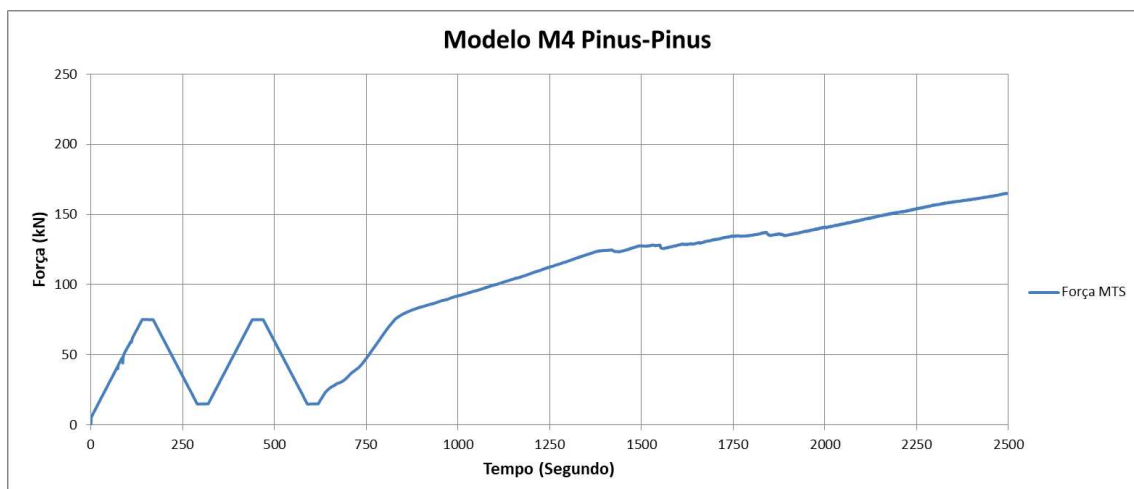
Fonte: Do autor.

Figura A.36—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M3 – CLT/CLT/CLT

Fonte: Do autor.

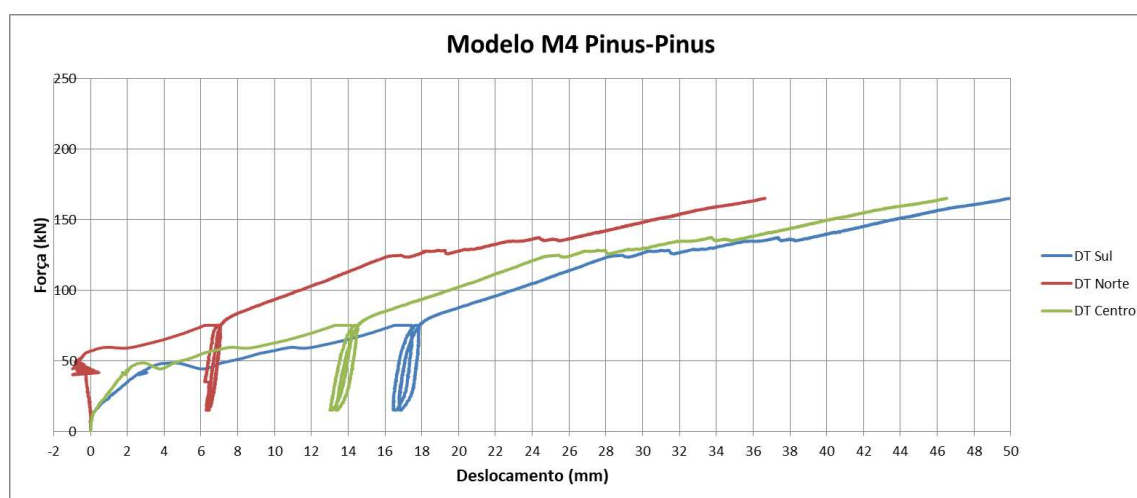
2.1.4. MODELO M4

Figura A.37–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M4 – CLT/CLT/CLT



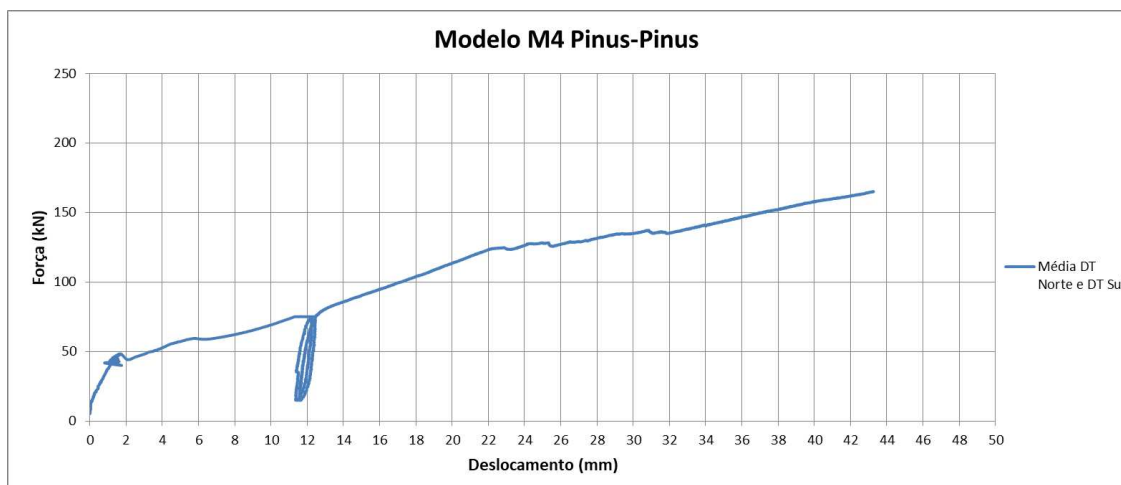
Fonte: Do autor.

Figura A.38–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e centro, modelo M2 – CLT/CLT/CLT



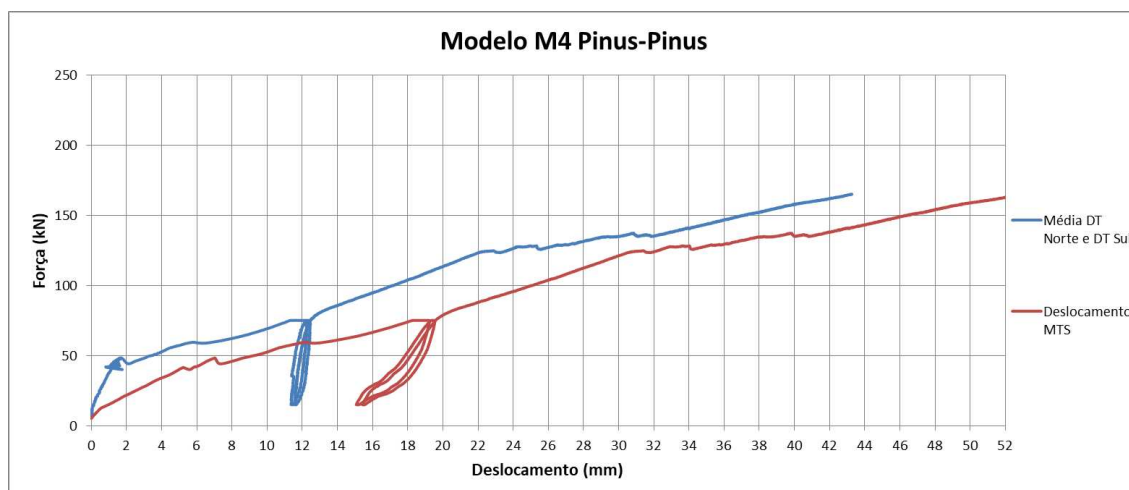
Fonte: Do autor.

Figura A.39—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M4 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

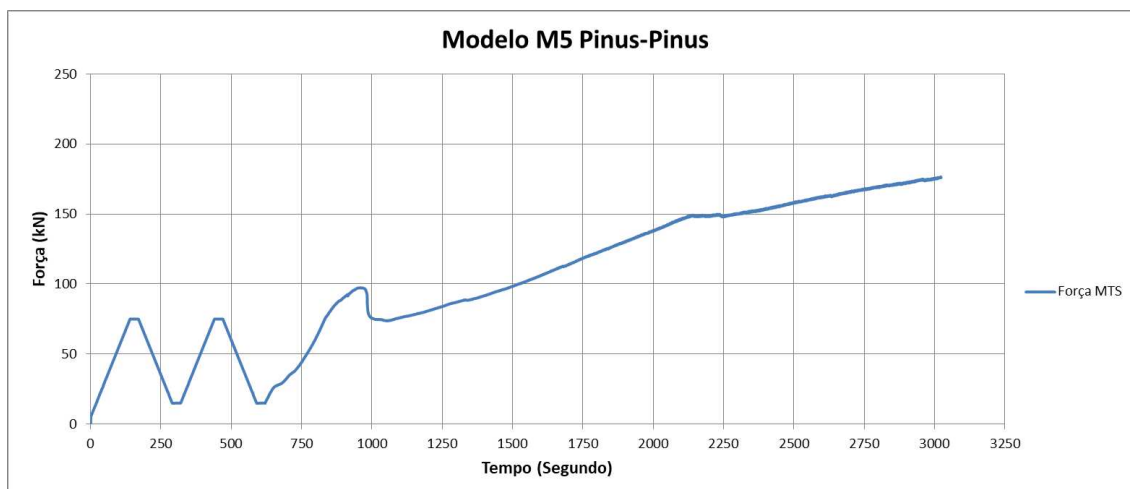
Figura A.40—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M4 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

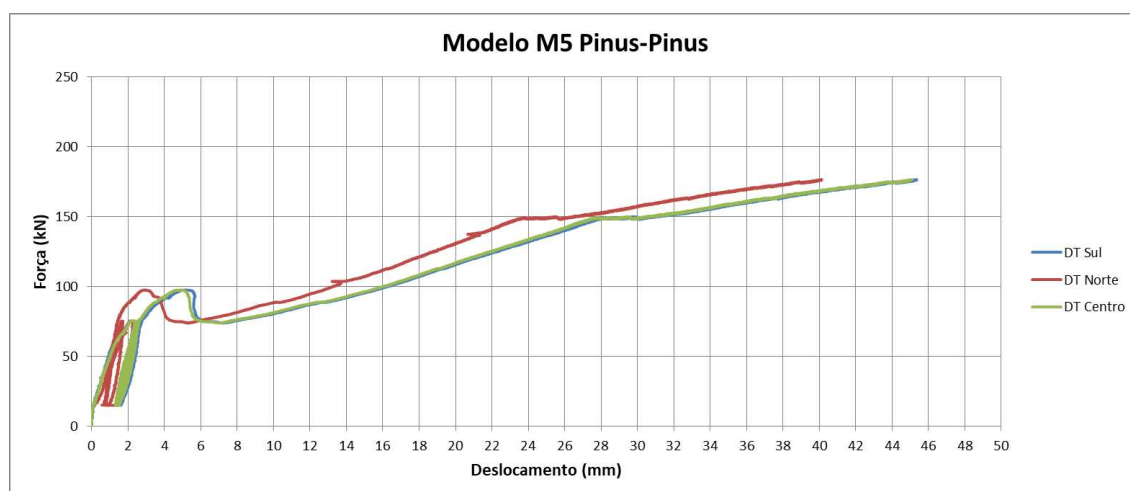
2.1.5. MODELO M5

Figura A.41–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M5 – CLT/CLT/CLT

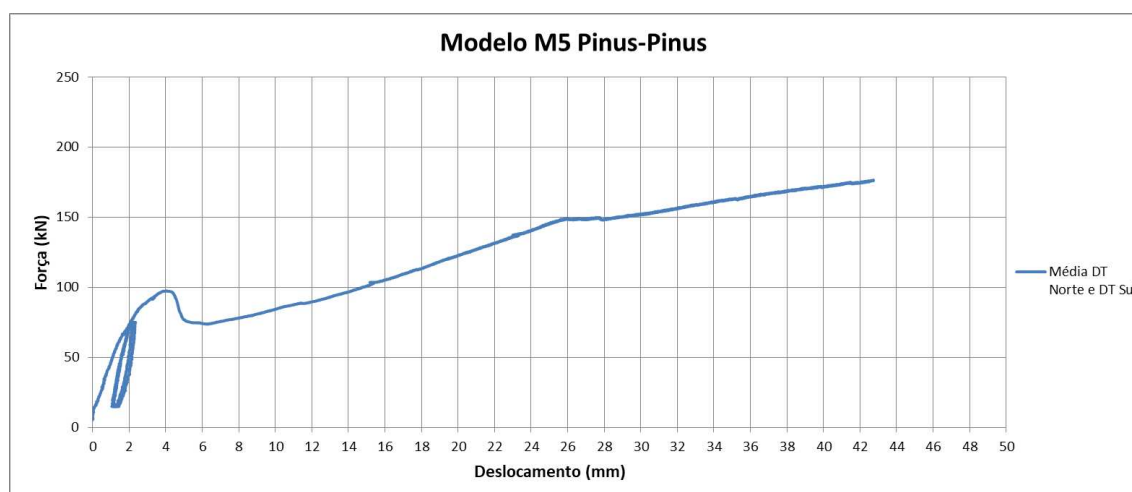


Fonte: Do autor.

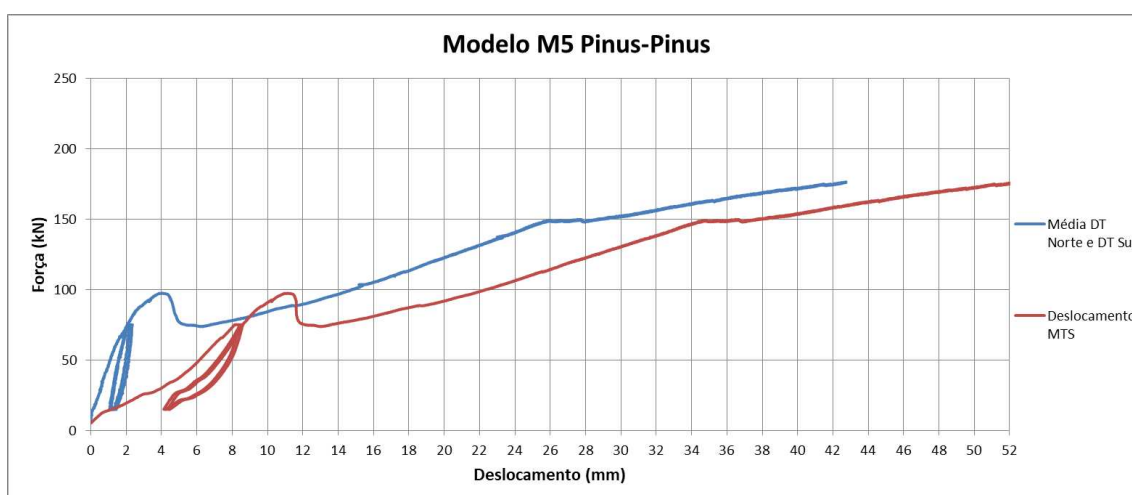
Figura A.42–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M5 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

Figura A.43—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M5 – CLT/CLT/CLT

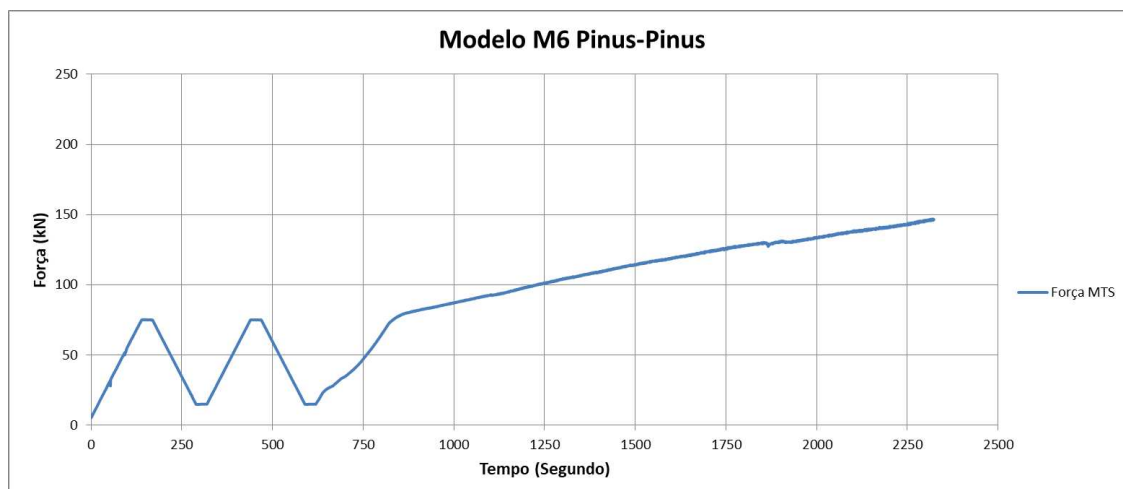
Fonte: Do autor.

Figura A.44—Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M5 – CLT/CLT/CLT

Fonte: Do autor.

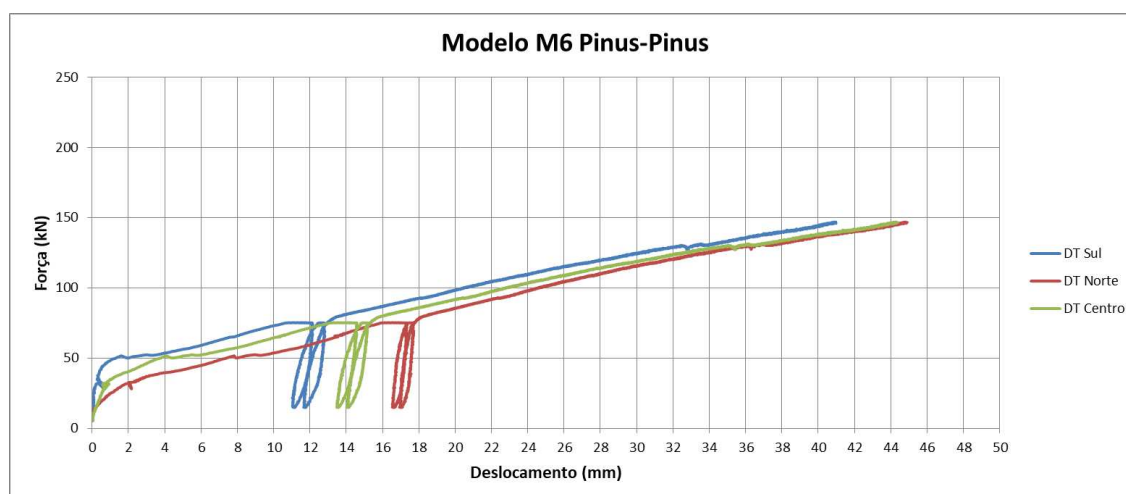
2.1.6. MODELO M6

Figura A.45–Gráfico força x tempo da MTS, modelo M6 – CLT/CLT/CLT

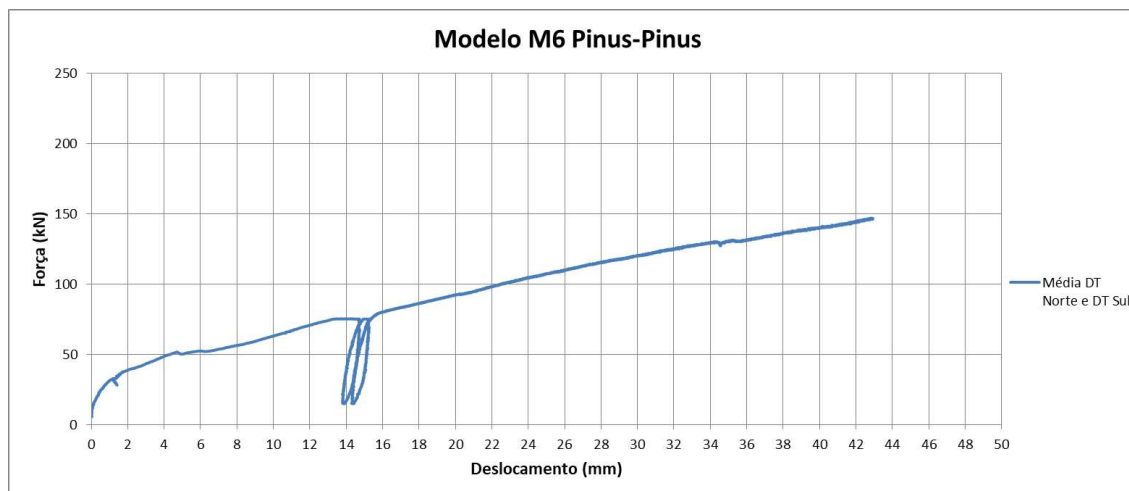


Fonte: Do autor.

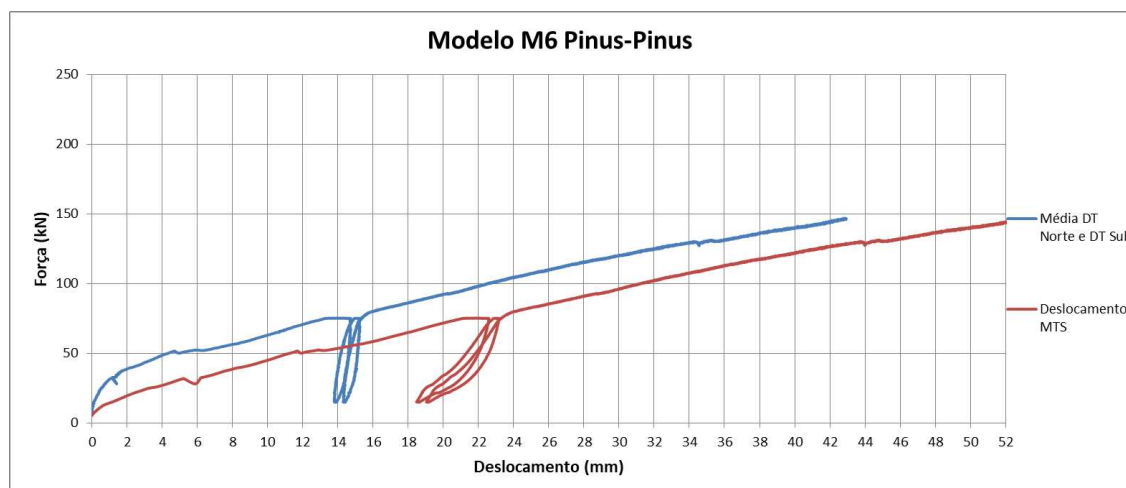
Figura A.46–Gráfico força x deslocamento dos DTs norte sul e centro, modelo M6 – CLT/CLT/CLT



Fonte: Do autor.

Figura A.47–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul, modelo M6 – CLT/CLT/CLT

Fonte: Do autor.

Figura A.48–Gráfico força x deslocamento média dos DTs norte sul e deslocamento MTS, modelo M6 – CLT/CLT/CLT

Fonte: Do autor.