

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

PEDRO HENRIQUE SHINOHARA DA SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGAÇÃO ENTRE
MADEIRA ROLIÇA POR PINO METÁLICO**

PATO BRANCO

2020

PEDRO HENRIQUE SHINOHARA DA SILVA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGAÇÃO ENTRE
MADEIRA ROLIÇA POR PINO METÁLICO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado a disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Lacerda Dias

TERMO DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGAÇÃO ENTRE MADEIRA ROLIÇA POR PINO METÁLICO

Por

PEDRO HENRIQUE SHINOHARA DA SILVA

Monografia apresentada às 09 horas 00 min. do dia 11 de agosto de 2020 como requisito parcial, para conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Heloiza Aparecida Piassa Benetti	Membro
Prof. Paola Regina Dalcanal	Membro
Prof. Gustavo Lacerda Dias	Orientador
Prof. Elizângela Marcelo Siliprandi	Professor(a) responsável TCCII



Documento assinado eletronicamente por **HELOIZA APARECIDA PIASSA BENETTI, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 16/08/2020, às 21:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAOLA REGINA DALCANAL, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/08/2020, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ELIZANGELA MARCELO SILIPRANDI, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/08/2020, às 10:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUSTAVO LACERDA DIAS, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/08/2020, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **OSMAR JOAO CONSOLI, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 13/10/2020, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site (The authenticity of this document can be checked on the website) https://sei.utfpr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador (informing the verification code) **1562632** e o código CRC (and the CRC code) **F098AA61**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Ana Cristina Shinohara, e aos meus avós, Massayoshi Shinohara e Vilma Alvim Shinohara, que não mediram esforços ou sacrifícios para que eu realizasse meus sonhos e objetivos. Obrigado pela cultura e educação que me proporcionaram durante toda a minha vida. Obrigado pelo amor, carinho e apoio incondicionais que me deram e continuam dando. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à toda minha família, pelo amor, carinho, apoio e incentivo incondicionais e por terem servido como porto seguro durante toda a minha trajetória na universidade.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Pato Branco, em especial aos professores do Departamento Acadêmico de Construção Civil, pelos conhecimentos passados durante todos esses anos.

Em especial, agradeço ao professor Gustavo Lacerda Dias pela orientação inspiradora e exemplo de pessoa e profissional. E também aos membros da banca examinadora, professora Heloiza Piassa Benetti e professora Paôla Regina Dalcanal, pelas excelentes contribuições feitas ao trabalho.

Agradeço a colaboração com a realização deste trabalho, tornando possível a sua finalização, ao pessoal do Laboratório de Materiais, Cláudia, Juneor e Leonardo, ao Jonathan, estagiário do Laboratório de Usinagem, e aos meus amigos, Carlos, Eduardo, Julia Milani, Julia Bressiani, Mariah, Sabrina e Sérgio.

Durante a minha trajetória acadêmica eu tive o prazer de conhecer pessoas incríveis, com quem criei vínculos e histórias maravilhosas e marcaram esta fase tão importante da minha vida. Agradeço a todos que passaram esses anos comigo, alguns desde o começo, outros que surgiram ao longo do curso e aqueles que convivi na etapa final. Vocês todos fazem parte desta conquista, e serei eternamente grato por essas amizades. Muito obrigado.

*“Tá na chuva pra se molhar
E na vida pra se perder
É preciso saber mirar o coração”*
Silva

RESUMO

SHINOHARA; Pedro Henrique. **Análise do comportamento mecânico da ligação entre madeira roliça por pino metálico**, 2020. 93 págs. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2020.

Com o aumento do uso de peças roliças de madeira em obras de engenharia como pontes, edifícios rústicos, pórticos, pergolados decorativos, dentre outros, surge a necessidade de avançar no conhecimento do comportamento mecânico das ligações aplicadas neste tipo de solução. Com o intuito de aprimorar o conhecimento acerca das ligações de peças de madeira, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento mecânico da ligação entre peças roliças de madeira com pinos metálicos. Utilizando-se a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) como base normativa, foram confeccionados corpos-de-prova com peças roliças de madeira ligadas por parafusos, realizando os ensaios em dois ângulos das fibras da madeira em relação à carga aplicada, analisando-as quanto à sua resistência mecânica e mecanismos de ruptura. Apesar de apresentar maior capacidade de carga em relação aos ensaios de ligação normal às fibras da madeira, os resultados dos ensaios de ligação paralela foram mais dispersos e tiveram um maior número de ensaios não concluídos. O modo de ruptura de maior ocorrência foi a flexão do pino metálico na peça de madeira interna, observada em quatro ensaios. Dentre os 18 ensaios, sete não foram concluídos devido a falhas na fixação do dispositivo à máquina de ensaios.

Palavras-chave: Ligação em madeira; Modos de ruptura; Floresta plantada.

ABSTRACT

SHINOHARA; Pedro Henrique. **Analysis of the mechanical behavior of the connection between roundwood by metal bar**, 2020. 93 pages. Civil Engineering Undergraduate Thesis (Bachelor Degree) – Academic Departmente of Building Construction, Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2020.

With the increasing use of roundwood in engineering works such as bridges, rustic buildings, frames, decorative pérgolas, and others, there is a need to advance the mechanical behavior knowledge of the connections applied in this type of solution. With the purpose of improve the knowledge about the joints of wood pieces, this research aims to analyze the mechanical behavior of the connections between round pieces of wood with metal bars. Using NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) as a normative basis, it is intended to create test pieces with roundwood connected by screws, performing the tests at two angles of the wood fibers in relation to the load applied, analyzing them for their mechanical resistance and rupture mechanisms. Despite of having higher load capacity compared to normal fiber angle connections assays, the results of parallel connections assays were more dispersed and had a higher number of unfinished assays. The most frequent rupture mode was the flexing of the metal bar on the internal piece of wood, observed in four tests. Among the 18 tests, seven were not completed due to failures in fixing the test pieces to the testing machine.

Key words: Wood connection; Rupture mechanisms; Planted forests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Distribuição e evolução da área com plantios de eucalipto, por estado	23
Figura 2: Distribuição e evolução da área com plantios de pinus, por estado	23
Figura 3: Composição da área de árvores plantadas por tipo de proprietários	24
Figura 4: Mapa de umidade relativa mensal de novembro (1981-2010)	27
Figura 5: Exemplo de esquemas de corte das toras de madeira	31
Figura 6: Exemplo de uma log home em construção	33
Figura 7: Corte rotatório de lâminas de madeira	35
Figura 8: Seção de uma peça de madeira compensada, destacando-se as camadas de madeira	36
Figura 9: Detalhes de emendas de lâminas	37
Figura 10: Placa de OSB utilizada como revestimento de cobertura.	38
Figura 11: Tipos de ligações estruturais de peças de madeira	39
Figura 12: Madeira laminada colada	40
Figura 13: Nó de apoio de uma treliça de telhado em duas águas utilizando ligação por entalhe	40
Figura 14: Conectores para ligações em estruturas de madeira	42
Figura 15: Ligação axial por corte único e duplo	43
Figura 16: Ligação por apoio da madeira em pino	43
Figura 17: Mecanismos de plastificação em ligações com pinos	44
Figura 18: Ensaio para determinação da resistência ao embutimento paralelo às fibras	46
Figura 19: Evolução das tensões normais em uma seção do pino sob flexão, até a plastificação total da seção	47
Figura 20: Pino parafusado em corte simples	49
Figura 21: Pino parafusado em corte duplo	51
Figura 22: Modos de ruptura em ligações por pino com seção de corte simples considerados pelo EUROCODE 5.....	52
Figura 23: Modos de ruptura em ligações por pino com seção de corte dupla considerados pelo EUROCODE 5.....	54
Figura 24: Modos de ruptura em ligações por pino com seção de corte simples e dupla considerados pela LRFD	56
Figura 25: Sistema de pórtico espacial utilizando madeira roliça.	59

Figura 26: Detalhes das ligações e retrações transversais do pórtico espacial em madeira roliça.....	59
Figura 27: Pórtico espacial utilizando madeira roliça	60
Figura 28: Detalhes da ligação entre as peças de madeira roliça e da base do pórtico espacial	61
Figura 29: Sistema estrutural de um deck utilizando madeira roliça	61
Figura 30: Sistema de guarda-corpo utilizando a madeira roliça.....	62
Figura 31: Detalhes das ligações entre as peças de madeira roliça e da madeira com os cabos de aço	63
Figura 32: Sistema estrutural de uma ponte em madeira roliça	63
Figura 33: Detalhes da treliça e das ligações utilizadas na ponte em madeira roliça.....	64
Figura 34: Esquema de amostragem dos corpos-de-prova dos ensaios realizados	69
Figura 35: Preparação dos corpos-de-prova dos ensaios de caracterização a partir peças centrais das toras de madeira.....	69
Figura 36: Detalhes do primeiro ensaio experimental da ligação paralela	74
Figura 37: Detalhes do segundo ensaio experimental da ligação paralela	75
Figura 38: Configuração final dos corpos de prova presos por cabos de aço para os ensaios de ligação paralela.....	76
Figura 39: Configuração final dos corpos de prova presos por cabos de aço para os ensaios de ligação normal.....	77
Figura 40: Ensaio de ligação paralela às fibras	82
Figura 41: Ensaio de ligação normal às fibras.....	86

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1: Consumo de madeira para uso industrial	25
Tabela 2: Classes de umidade	27
Tabela 3: Dimensões dos principais produtos de madeira serrada	31
Tabela 4: Equações para o cálculo da resistência da ligação por pino metálico de seção de corte simples para os modos de ruptura indicados pela LRFD	57
Tabela 5: Equações para o cálculo da resistência da ligação por pino metálico de seção de corte dupla para os modos de ruptura indicados pela LRFD	57
Tabela 6: Resultados do Ensaio de Teor de Umidade	78
Tabela 7: Resultados do Ensaio de Densidade Básica	79
Tabela 8: Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Paralela às Fibras	80
Tabela 9: Resumo do Ensaio das Ligações Paralelas	84
Tabela 10: Resumo do Ensaio das Ligações Normais	88
Gráfico 1: Capacidade de carga máxima registrada nos ensaios de ligação paralela	83
Gráfico 2: Capacidade de carga máxima registrada nos ensaios de ligação normal	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVA	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	O CENÁRIO ATUAL DA MADEIRA DE REFLORESTAMENTO NO BRASIL	20
2.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA	26
2.3	USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	29
2.3.1	Histórico do Uso da Madeira	29
2.3.2	Madeira Serrada	30
2.3.3	Madeira Roliça	32
2.3.4	Madeira Beneficiada	34
2.3.5	Madeira em Lâminas	34
2.3.6	Painéis de Madeira	35
2.4	LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA	38
2.4.1	Ligações Coladas	39
2.4.2	Ligações por Entalhes	40
2.4.3	Ligações Através de Elementos Externos	41
2.5	COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO AXIAL POR CORTE EM PINOS METÁLICOS	42
2.5.1	Embutimento da Madeira	45
2.5.2	Flexão do Pino Metálico	46
2.6	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES POR PINO METÁLICO	47
2.6.1	Critérios de Dimensionamento da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas em Madeira	48
2.6.2	Critérios de Dimensionamento do EUROCODE 5: 2004 – <i>Design of Timber Structures</i>	51

2.6.3 Critério de Dimensionamento da LRFD: 1996 – <i>Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC)</i>	55
2.7 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÕES DA MADEIRA ROLIÇA COM FINS ESTRUTURAIS.....	58
2.8 ESTUDOS RELACIONADOS ÀS LIGAÇÕES COM MADEIRA ROLIÇA	64
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	67
3.2 AMOSTRAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	68
3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	69
3.3.1 Teor de Umidade	69
3.3.2 Densidade Básica	70
3.3.3 Resistência à Compressão Paralela às Fibras	71
3.4 ENSAIO DE LIGAÇÃO POR PINO METÁLICO	71
3.4.1 Método de Ensaio das Ligações.....	72
3.4.2 Montagem dos Corpos-de-Prova.....	72
3.4.3 Ensaio Experimentais da Ligação Paralela.....	73
3.4.4 Método de Ensaio da Ligação Normal.....	76
4 RESULTADOS	78
4.1 ENSAIO DE UMIDADE	78
4.2 ENSAIO DE DENSIDADE BÁSICA.....	79
4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	79
4.4 ENSAIOS DAS LIGAÇÕES.....	80
4.4.1 Ligações Paralelas	81
4.4.2 Ligações Normais	85
5 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a comercialização da madeira para fins estruturais é pequena, quando comparada aos países da Europa e Estados Unidos, por exemplo, que utilizam este material para diversos fins na indústria da construção civil. A preferência pelo uso da alvenaria, concreto e aço explica-se pela tradição trazida pelos colonizadores portugueses, que por não possuírem áreas de floresta, utilizavam a madeira apenas como material secundário em suas construções (DI MAURO, 2013).

Outra questão é a ambiental, em relação à preservação de florestas nativas, que já foram muito exploradas e diversas espécies extintas ou seguem este destino. As florestas plantadas, além de contribuir com a conservação da biodiversidade, preservação do solo e recuperação de áreas degradadas, apresentam uma grande importância na sustentabilidade ambiental. O dióxido de carbono (CO₂) é sequestrado da atmosfera durante a fase de crescimento das árvores para realizar a fotossíntese e gerar carboidratos necessários para a sua formação (FERREIRA e SILVA, 2016). Ainda, as árvores reflorestadas passam por um processo de ciclo de renovação, no qual as árvores antigas são derrubadas e logo substituídas por outra, garantindo o reabastecimento para gerações futuras (BRITTO e CALIL JR., 2010).

O preconceito de leigos em relação às estruturas em madeira, a falta de projetos específicos e profissionais com conhecimento do material madeira resultam em projetos precários, executados geralmente por carpinteiros (GESUALDO, 2003).

Na construção civil a madeira é utilizada principalmente de duas formas: de forma permanente, como revestimentos, estrutura de cobertura e esquadrias; ou de forma secundária, como fôrmas, andaimes e escoramentos. Como produtos da madeira utilizados no setor da construção civil, pode-se citar a madeira serrada, a madeira roliça, lâminas, painéis de madeira e madeira tratada com produtos preservativos (IPT, 2009).

Quando comparado o uso para fins estruturais da madeira serrada e a roliça, esta mostra-se mais vantajosa em relação à sustentabilidade econômica, ambiental e social. A madeira roliça não passa por tantos processos industriais

após a sua extração, resultando em menores custos, pois diminui a geração de energia, necessita de menos mão de obra e apresenta menor desperdício de recursos (BRITTO e CALIL JR., 2010). Por outro lado, a madeira serrada necessita passar por processos como desdobro, o esquadrejamento, o destopo e o pré-tratamento (IPT, 2009). Nestes processos, 60 a 70% da peça original torna-se resíduo, o que ocasiona uma menor seção, logo menor resistência da peça, quando comparada à madeira roliça (BRITTO e CALIL JR., 2010).

O preconceito de leigos em relação às estruturas em madeira, a falta de projetos específicos e profissionais com conhecimento do material madeira resultam em projetos precários, executados geralmente por carpinteiros (GESUALDO, 2003).

A madeira apresenta dimensões limitadas, por isso necessita de ligações entre mais de uma peça para ser utilizada com fins estruturais (BAENA, 2015). É através dessas ligações que se formam os elementos estruturais de madeira capazes de vencer grandes vãos e resistir a grandes esforços.

A ligação por pinos metálicos é uma das mais utilizadas devido a sua grande variedade de modelos, dispensa mão de obra especializada para aplicação, baixo custo em relação aos outros conectores e apresenta as mesmas propriedades mecânicas em condições de uso diferentes (BAENA, 2015). Considerando a empregabilidade deste tipo de ligação para estruturas em madeira, este trabalho visa analisar o comportamento mecânico deste conector quando utilizado em peças de madeira roliça.

Ao longo deste trabalho será apresentado, inicialmente, o material madeira com enfoque na madeira de reflorestamento e como são utilizadas no setor da construção civil. E então será discutido como são realizadas as ligações das peças de madeira, revisando os modelos teóricos, exemplos de aplicação e considerações normativas. Posteriormente, serão apresentados os ensaios experimentais das ligações de madeira roliça com pinos metálicos segundo a NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas em Madeira. Por fim, os resultados serão apresentados e discutidos, chegando às considerações finais sobre o comportamento mecânico da ligação e da madeira roliça como elemento estrutural.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento mecânico da ligação entre peças roliças de madeira de reflorestamento com pinos metálicos através de ensaios experimentais de protótipos das ligações.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Abordar as principais e potenciais utilizações da madeira roliça.
- Apresentar estudos atuais relacionados à madeira roliça como elemento estrutural.
- Caracterizar as amostras de madeira quanto a teor de umidade, densidade básica e compressão paralela.
- Desenvolver um dispositivo para realizar os ensaios de ligações na Máquina Universal de Ensaio do Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Pato Branco, discutindo as adaptações necessárias em relação à norma NBR 7190/97.
- Analisar os resultados obtidos em ensaios de ligações de peças de madeira roliça por meio de pinos metálicos em relação à capacidade de carga e mecanismos de ruptura.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com IBÁ (2019), a madeira plantada no Brasil destinada para a comercialização *in natura* representa 29% de uma área total de 7,83 milhões de hectares, classificando-se como a segunda maior produção deste segmento industrial, ficando atrás apenas da produção de celulose e papel que apresentou 34% das áreas plantadas.

Entre a madeira serrada e roliça oriundas desta produção, destaca-se a madeira roliça pelo menor processamento entre a sua extração e a comercialização em si. Essa é comumente usada em postes de distribuição de rede elétrica, estruturas de pontes, estacas de fundação, estruturas de pórticos e pergolados decorativos (ZANGIÁCOMO, 2007). Apesar de ter uso estrutural, a norma atual NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas em Madeira não aborda critérios específicos de dimensionamento e ensaios de ligação para este uso da madeira roliça.

Justifica-se então a necessidade de avançar no conhecimento mecânico das ligações de peças roliças por pinos metálicos, tendo em vista o aumento da utilização deste tipo de solução em obras de engenharia.

Os laboratórios do Departamento Acadêmico de Construção Civil da UTFPR – Câmpus Pato Branco possuem equipamentos capazes de realizar os testes de ligação. Porém, por se tratar de corpos-de-prova com formatos excepcionalmente distintos, existe a necessidade de desenvolver um dispositivo para realizar esses ensaios. A produção deste dispositivo torna-se possível devido aos recursos disponíveis nos diferentes departamentos do câmpus, garantindo assim a viabilidade deste estudo.

GIL (2002) indica que um trabalho científico se justifica por apresentar uma possível contribuição para o conhecimento de alguma questão teórica ou prática ainda não solucionada, o que assegura a importância deste trabalho, visto que o estudo da ligação de madeira roliça e pino metálico, mesmo seu uso sendo comum, não apresenta uma gama de estudos relacionados à mesma no Brasil que possa ser considerada satisfatória. Os resultados dos ensaios conduzidos neste trabalho visam contribuir para o conhecimento científico acerca das ligações de peças roliças de madeira com pinos metálicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O CENÁRIO ATUAL DA MADEIRA DE REFLORESTAMENTO NO BRASIL

Em 1997 foi criado o tratado conhecido como Protocolo de Kyoto, complementar a Convenção-Quadro das Nações Unidas, que estabeleceu metas de redução de Gases de Efeito Estufa (GEE) para os países desenvolvidos e outros cuja economia se desenvolvia rumo ao capitalismo, conhecidos como Países Anexo I. Um dos acordos firmados foi que durante o primeiro período de compromisso, entre 2008 e 2013, os países mais desenvolvidos e mais poluentes deveriam reduzir em 5% as emissões de GEE em relação aos níveis de 1990. E no segundo período de compromisso, este número deveria subir para 18% durante o período de 2013 a 2020 (MMA, 2019).

Para os países do Anexo I, o Protocolo de Kyoto estabeleceu três mecanismos de flexibilização de forma a auxiliar tais países a cumprirem as suas metas de redução e limites de emissão, são eles: o Comércio de Emissões, Implementação Conjunta e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Sendo que este último foi o único que permitia a participação de países em desenvolvimento, como o Brasil (MMA, 2019). Uma das estratégias apresentadas pelo MDL para a redução de emissões foi através de projetos florestais, como florestamento e reflorestamento (BNDES, 2002).

Durante o Protocolo de Kyoto foi estabelecido os três principais gases responsáveis pelas alterações climáticas do planeta, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), conhecidos como GEE. O dióxido de carbono apresenta a maior porcentagem (65%) de emissão entre todos os gases considerados responsáveis pelas alterações climáticas (BNDES, 2002). A estratégia apresentada pelo MDL auxilia na redução deste gás, através da fixação do carbono que ocorre nas florestas.

A Conferência das Partes, órgão supremo da Convenção-Quadro das Nações Unidas, entrou em sua vigésima primeira sessão no ano de 2015, em Paris, com o objetivo de firmar novos compromissos em relação à emissão de

GEE até 2020, além de novas metas para as alterações climáticas (ONU, 2015). Através das Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas cada país apresentou a sua proposta para a contribuição na redução da emissão de GEE, considerando a própria situação socioeconômica. As propostas apresentadas pelo Brasil que se tornaram compromisso oficiais incluíam reduzir em 37% os níveis de emissão de GEE até 2025 em relação aos níveis de 2005, e 43% até 2030 em relação aos níveis de 2005 (BRASIL, 2015).

Para alcançar estes objetivos, o país se comprometeu a aumentar a participação de biocombustíveis sustentáveis para 18% na matriz energética até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas até 2030, alcançar uma participação de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, entre outros objetivos (BRASIL, 2015).

Tanto nas recomendações do MDL quanto nas propostas do Acordo de Paris, nota-se a preocupação com o setor florestal e o uso do solo, seja na forma do manejo sustentável das florestas nativas, políticas de desmatamento ilegal zero ou reflorestamento para múltiplos usos. Esta importância em termos de redução da emissão de GEE dada às árvores pode ser melhor compreendida quando analisamos o seu processo de crescimento e interação com o meio que a envolve.

As florestas em crescimento absorvem o gás carbônico durante o seu período de crescimento, realizando a fixação do carbono, ou sequestro de carbono, durante a intensificação da fotossíntese, em que este elemento químico passa a fazer parte da constituição das árvores (ARANA e BOIN, 2013). É importante observar que este fenômeno é mais eficiente em árvores novas, ainda em fase de crescimento, do que em árvores antigas que já apresentam equilíbrio entre a quantidade de carbono absorvido para a fotossíntese e a quantidade liberada pela respiração (BNDES, 2002).

Brianezi et al. (2019) estimou o sequestro de carbono em plantações de eucalipto com diferentes densidades de instalação a partir de um inventário florestal de 48 árvores, 12 por cada espaçamento analisado. O carbono armazenado nas árvores foi estimado multiplicando os valores de biomassa pelo fator 0,47. Os valores de biomassa foram determinados pela multiplicação do volume e densidade básica das árvores, valores obtidos, respectivamente, por medição e através de amostras retiradas por trado mecânico seguindo a norma

NBR 11941/03 Madeira - Determinação da Densidade Básica. Foi concluído que o balanço de carbono é positivo em todos os espaçamentos de plantio, sendo superior no menor espaçamento analisado, 2 x 1 m, aos 32 meses. Ainda, através de testes de fertilização nitrogenada e calagem, foi observado que as florestas de eucalipto são capazes de absorver os Gases de Efeito Estufa originados por tais processos químicos.

IBÁ (2019) apresentou os dados do ano de 2018 em relação às árvores plantadas brasileiras, no qual os 7,83 milhões de hectares de árvores plantadas estocaram 4,2 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_{2ep}) e atribui este resultado aos ciclos de cultivos das florestas plantadas. Também chama a atenção para a capacidade da indústria brasileira de árvores de gerar e manter as reservas de carbono em áreas de Reserva Legal, Áreas de Proteção Permanente e Áreas de Reserva Particular do Patrimônio Natural.

As principais árvores encontradas em florestas plantadas, no Brasil, são o eucalipto e o pinus. Em 2018 a área de florestas plantadas permaneceu inalterada em relação ao ano anterior. Dos 7,83 milhões de hectares, o eucalipto ocupou 5,67 milhões desta área, distribuídos principalmente em Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (16%). O estado do Paraná apresentou 5% da área total de eucalipto, o sexto estado com maior plantio de eucalipto, como mostra a Figura 1. A área plantada de eucalipto apresentou um aumento de 1,1% nos últimos sete anos, com o estado do Mato Grosso do Sul liderando este crescimento com 7,4% de crescimento ao ano.

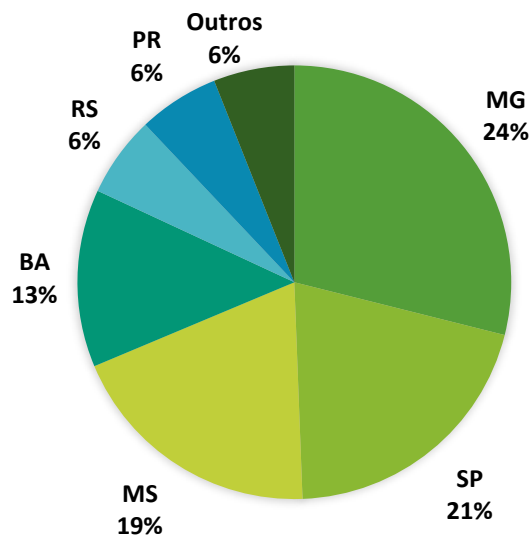


Figura 1: Distribuição e evolução da área com plantios de eucalipto, por estado
 Fonte: IBÁ e PÖYRI apud. IBÁ (2018).

A área de plantio da espécie pinus não sofreu alteração entre os anos 2017 e 2018, mantendo 1,57 milhões de hectares de área de árvores plantadas. O pinus concentra-se principalmente nos estados do Paraná (42%) e Santa Catarina (34%), ilustrado pela Figura 2.

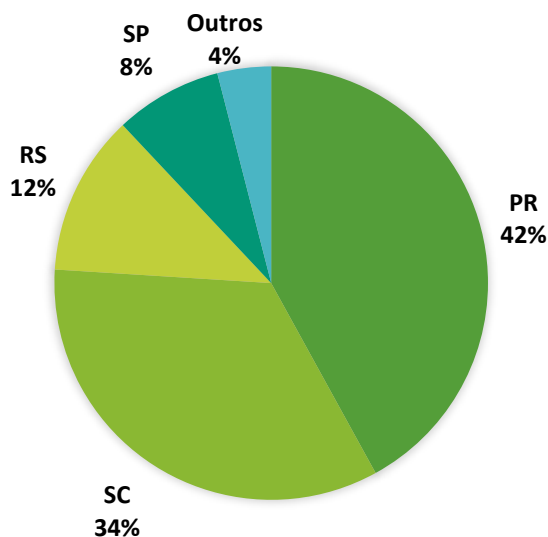


Figura 2: Distribuição e evolução da área com plantios de pinus, por estado
 Fonte: IBÁ e PÖYRI apud. IBÁ (2018).

A totalidade de áreas de árvores plantadas são divididas majoritariamente nas indústrias de celulose e papel (36%) e produtores independentes (29%). Este tipo de proprietário engloba os pequenos e médios

produtores do programa de fomento florestal, que investem principalmente na comercialização da madeira *in natura*. A distribuição das áreas se completa com as indústrias de siderurgia a carvão vegetal (12%), investidores financeiros (10%), painéis de madeira e pisos laminados (6%), produtos sólidos de madeira (4%) e outros (3%), como aponta a Figura 3.

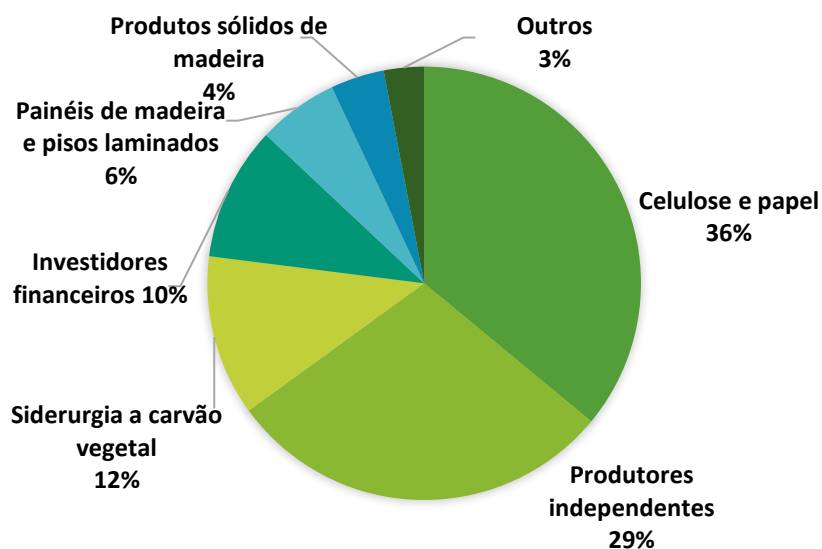


Figura 3: Composição da área de árvores plantadas por tipo de proprietários
Fonte: Adaptado de IBÁ e PÖYRI (2018).

O consumo da madeira *in natura* no ano de 2018 foi de 220,9 milhões de metros cúbicos, um crescimento de 7,2% em relação ao ano anterior. Este consumo ainda é dividido entre o eucalipto, que apresentou o maior consumo total das indústrias (166 milhões de metros cúbicos), e o pinus com um consumo de 49,7 milhões de metros cúbicos. A Tabela 1 apresenta detalhadamente o consumo de cada espécie por setor industrial da madeira.

Tabela 1: Consumo de madeira para uso industrial

Segmento	Consumo (milhões de m³)			
	Eucalipto	Pinus	Outros	Total
Celulose e papel	79,9	10,3	0,1	90,3
Painéis reconstituídos	6,6	7,4	0,4	14,4
Indústria madeireira	6,0	27,9	0,4	34,3
Carvão	23,4	-	-	23,4
Lenha industrial	47,1	4,0	4,4	55,5
Madeira tratada	1,4	-	-	1,4
Outros	1,6	0,1	-	1,7
Total	166,0	49,7	5,3	221,0

Fonte: IBÁ e PÖYRI apud. IBÁ (2018).

IBÁ (2019) também analisou diversos indicadores socioambientais e de sustentabilidade. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), por exemplo, nas cidades com plantios comerciais cresceu 56%, enquanto a média dos municípios brasileiros foi de 47%, de acordo com as pesquisas mais recentes que datam de 1991, 2000 e 2010. Ainda, foi observado que estes municípios também tiveram maior aumento em todas as três dimensões que compõem o cálculo do IDHM: renda (20% comparado a 14%), longevidade (26% comparado a 23%) e educação (149% comparado a 128%).

As áreas naturais protegidas alcançaram 5,6 milhões de hectares, distribuídos entre Reserva Legal (67%), Áreas de Preservação Permanentes (28%), Área de Alto Valor de Conservação (3%) e Reservas Particulares do Patrimônio Natural (2%) (IBÁ, 2019). Relacionando estas áreas com a área de árvores plantadas, pode-se dizer que para cada hectare plantado, 0,7 hectare foi destinado à conservação.

A indústria de árvores plantadas é um dos poucos setores que gera grande parte da energia que consome. Em 2018 houve um aumento de 2,3% na geração de energia, comparado ao ano anterior. Graças às fábricas modernas, estas empresas são autossuficientes em energia e ainda geram excedentes para a comercialização. Isto é possível porque tais empresas usam os subprodutos

de seus processos, como o licor negro e biomassa florestal, para a produção de energia térmica e elétrica (IBÁ, 2019).

É estimado que a indústria de árvores plantadas gerou, em 2018, 3,8 milhões de empregos diretos, indiretos e resultantes do efeito renda da atividade de base florestal, o que representa um aumento de 1,1% em relação ao ano de 2017 (IBÁ, 2019). Considerando o salário médio líquido dos trabalhadores, pode-se dizer que a renda gerada pelo setor foi da ordem de R\$ 10,2 bilhões, sendo que R\$ 9,2 bilhões foram direcionados para o consumo das famílias e o restante para a poupança nacional.

Seguindo as indicações dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo e as metas oficiais da Conferência das Partes de Paris, a indústria de árvores plantadas apresenta resultados bastante promissores. Além de realizarem a captura direta de GEE, colaboram em escala nacional com os três pilares da sustentabilidade: social, ambiental e econômico. Ainda vale destacar o protagonismo da espécie eucalipto, que ao longo dos anos tem apresentado maior crescimento nas áreas plantadas e consumo pelo mercado industrial.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

Segundo Brito (2010), as principais propriedades da madeira que devem ser consideradas no dimensionamento de elementos estruturais são: densidade, resistência, rigidez (ou módulo de elasticidade) e umidade. Em relação ao teor de umidade, o autor relaciona o percentual da umidade presente na madeira com a alteração da resistência e elasticidade. Sendo necessária o ajuste dessas propriedades em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas. Este ajuste é feito através das classes de umidade apresentadas pela norma de projeto de estruturas em madeira.

A norma NBR 7190 explica a classe de umidade como uma forma de auxiliar no ajuste das propriedades de resistência e de rigidez em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Ainda, as classes também servem para escolher o tratamento preservativo aplicado à madeira.

Tabela 2: Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997).

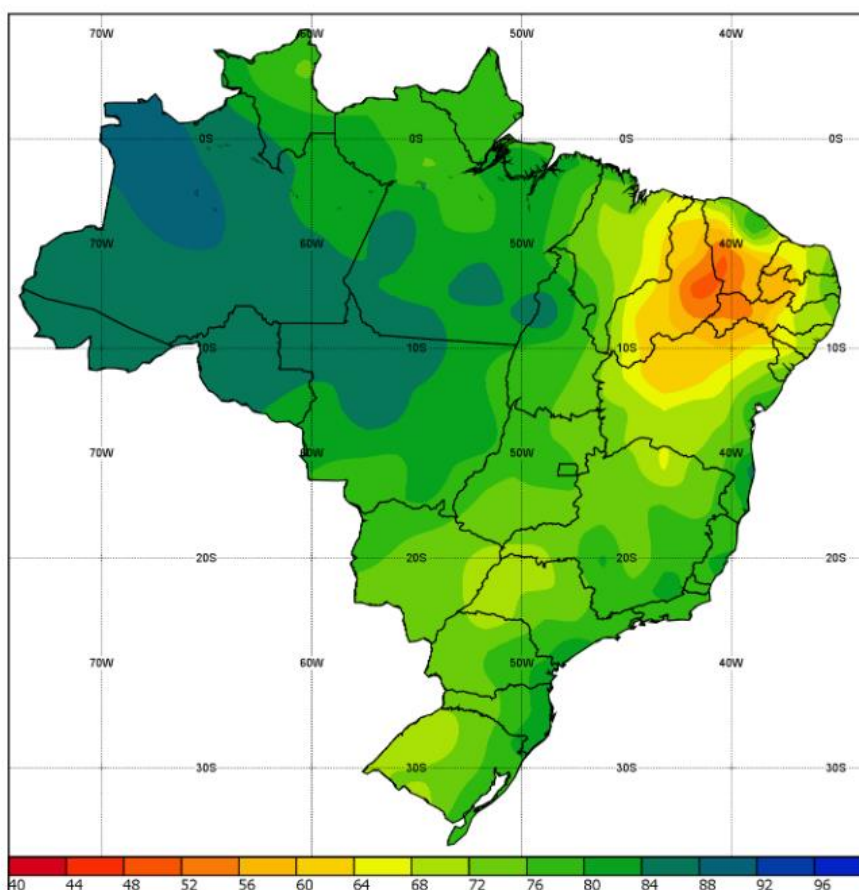


Figura 4: Mapa de umidade relativa mensal de novembro (1981-2010)

Fonte: INMET (2020).

A Tabela 2 indica a classe de umidade de acordo com a umidade de equilíbrio da madeira e umidade relativa do ambiente onde ficará instalada a estrutura. A umidade relativa do ar pode ser determinada através do mapa de

umidade relativa fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O mapa de umidade relativa mensal, dos dados históricos entre 1981 e 2010, para o mês de novembro é indicado pela Figura 4. Segundo este mapa, pode-se considerar que a umidade relativa do ar durante os ensaios realizados neste trabalho (mês de novembro) estava no intervalo de 72 a 76%. Sendo indicada a classe de umidade 2.

A densidade básica da madeira é de fácil determinação e está relacionada a outras características; por isto, é reconhecida como um dos principais parâmetros para a avaliação da sua qualidade (SHIMOYAMA e BARRICHELLO apud. OLIVEIRA, J. T. S. et al., 2005).

Oliveira et al. (2005) avaliou as variações do teor de umidade e da densidade básica na direção radial e longitudinal do tronco de árvores recém-abatidas de sete espécies de eucalipto. Segundo o autor, uma madeira com uma densidade mais homogênea em seu interior se comporta melhor nas operações de processamento e reflete em uma maior uniformidade nas demais propriedades tecnológicas, e as madeiras com menor variação de densidade são adequadas para utilizações que exigem um material homogêneo e com menor variabilidade nas propriedades físico-mecânicas.

As madeiras mais densas apresentaram teores de umidade mais baixos. O teor de umidade de cada espécie investigada variou entre 62%, *Eucalyptus citriodora* com densidade básica $0,73\text{g/cm}^3$, e 102%, *Eucalyptus grandis* densidade básica igual a $0,49\text{g/cm}^3$ (OLIVEIRA, J. T. S. et al., 2005).

Os mais baixos coeficientes de variação foram obtidos para a madeira de *E. paniculata* (15,8%) e *E. citriodora* (18,1%), que associados aos desvios-padrão indicam menor variabilidade e maior homogeneidade quanto à distribuição de umidade. Ao contrário, nas demais espécies os coeficientes de variação estão acima de 20%, evidenciando, portanto, alta variabilidade dos dados. Quanto à amplitude de variação da densidade básica, verificou-se formação de madeira mais homogênea em *E. citriodora* e *E. paniculata*, com *E. urophylla* e *E. grandis* formando madeira mais heterogênea (OLIVEIRA, J. T. S et al., 2005).

A espécie que compôs a ligação analisada neste trabalho foi a *Eucalyptus grandis*. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) apresenta algumas propriedades físicas desta espécie em seu catálogo *online*. A

densidade aparente, referente à 15% de umidade, é 500 kg/m³ e a densidade básica 420 kg/m³. A sua resistência a compressão paralela às fibras, para a madeira verde, é 26,3 MPa e para a madeira a 15% de umidade, 42,1 MPa (IPT, 2020).

2.3 USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

PFEIL (2017) classifica os tipos de madeira de construção em dois tipos de acordo com a sua composição: as madeiras maciças, como a madeira roliça, madeira falquejada e madeira serrada; e as madeiras industrializadas, como a madeira compensada, madeira laminada e a madeira recomposta.

Já o IPT (2009) classifica de modo geral a madeira de acordo com o seu uso, podendo ser permanentes, como estrutura de cobertura, esquadrias, forros e pisos, ou temporárias, como fôrmas para concreto, escoramentos e andaimes. Estes dois tipos de usos ainda foram subdivididos em: construção pesada externa, construção pesada interna, construção leve externa e leve interna estrutural, construção leve interna decorativa, construção leve interna de utilidade geral, construção leve em esquadrias e construção de assoalhos domésticos.

Após apresentar o histórico do uso da madeira como material de construção, este capítulo irá apresentar os principais produtos da madeira e como elas são classificadas e aplicadas nos diferentes projetos que envolvem o uso deste material. E por fim, será relatado como a madeira roliça, objeto de estudo deste trabalho, é utilizada na cidade de Pato Branco, Paraná, e região.

2.3.1 Histórico do Uso da Madeira

Utilizada desde os tempos pré-históricos, a madeira foi um dos primeiros materiais a serem utilizados pelo homem, assim como a pedra. Utilizando também a combinação destes dois materiais ou combinando a madeira com peles de animais e vegetações, o homem buscava construir abrigos para se proteger de intempéries e ataques externos (CORDEIRO JR. et al., 2017).

Iniciando assim a relação do homem e da madeira como um material de construção.

A madeira também teve grande importância para o desenvolvimento da raça humana, devido à sua capacidade de gerar iluminação e calor, possibilitando o preparo de alimentos e a manipulação deste material para criar armamentos e embarcações (CORDEIRO JR. et al., 2017).

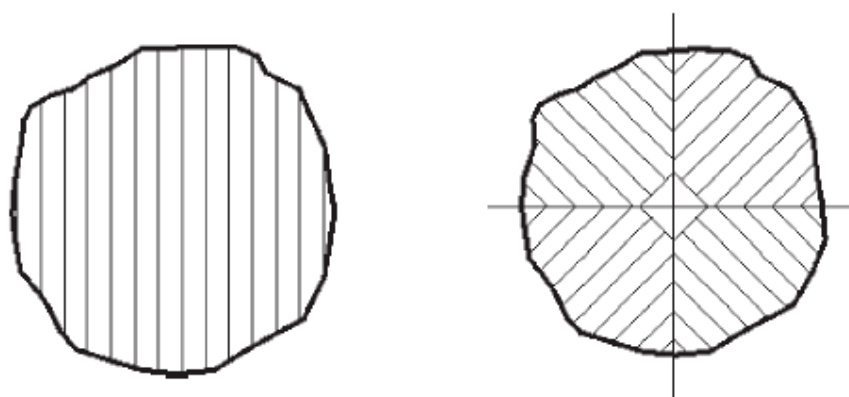
Apesar do longo e amplo histórico da utilização da madeira como material de construção, foi apenas no Século XX que foram estabelecidas teorias técnicas aplicadas às estruturas em madeira. Desde o final da 2ª Guerra Mundial as pesquisas tecnológicas cresceram e proporcionaram métodos para o projeto de diversas formas estruturais (PFEIL, 2017). O autor ainda afirma:

Atualmente a utilização de madeira, como material de construção competitivo economicamente e ao mesmo tempo aceitável em termos ecológicos, se baseia nas modernas técnicas de reflorestamento aliadas ao desenvolvimento de produtos industrializados de madeira com minimização de perdas.

2.3.2 Madeira Serrada

A madeira serrada é o produto estrutural da madeira de uso mais comum. O tronco é cortado nas serrarias, produzindo peças retangulares ou quadradas de menores dimensões para a comercialização (IPT, 2009). O abate dos troncos é normalmente feito ao atingir a maturidade, quando o cerne ocupa uma área maior da seção, garantindo um maior rendimento de peças de boa qualidade. Recomenda-se também que seja feito em estação seca, quando a árvore apresenta menor umidade, diminuindo o tempo de secagem da mesma (PFEIL, 2017).

De forma a evitar defeitos oriundos da secagem da madeira, o desdobramento do tronco é realizado logo após o corte da árvore. Os troncos são cortados em serras de fita, que possuem comandos mecânicos que garantem a espessura uniforme das lâminas, definidas de acordo com o seu destino. O desdobramento pode ser feito em pranchas paralelas (Figura 5-a) ou na direção radial (Figura 5-b), sendo esta mais trabalhosa e, conseqüentemente, de maior custo.



a) desdobramento em pranchas paralelas b) desdobramento radial
 Figura 5: Exemplo de esquemas de corte das toras de madeira
 Fonte: PFEIL (2017).

Os produtos das serrarias incluem pranchas, pranchões, blocos, tábuas, caibros, vigas, vigotas, sarrafos pontaletes, ripas e outros (IPT, 2009). Podendo caracterizar o seu uso, principalmente como de construção leve externa e construção interna com diferentes aplicações. As dimensões padronizadas da madeira serrada são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões dos principais produtos de madeira serrada

Produtos	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (m)
Pranchão	Maior que 70	Maior que 200	Variável
Prancha	40 – 70	Maior que 200	Variável
Viga	Maior que 40	110 – 200	Variável
Vigota	40 – 80	80 – 110	Variável
Caibro	40 – 80	50 – 80	Variável
Tábua	10 – 40	Maior que 100	Variável
Sarrafo	20 – 40	20 – 100	Variável
Ripa	Maior que 20	Maior que 100	Variável
Dormente	160 – 170	220 – 240	2,00 – 5,60 / 2,80 – 5,60
Pontalete	75	75	Variável
Bloco	Variável	Variável	Variável

Fonte: adaptado de IPT (2009).

Além da NBR 7190/97, que classifica a madeira serrada para o seu uso estrutural, existem outras normas brasileiras que visam a padronização de medidas da madeira serrada: a NBR 14806/02 estabelece os requisitos para o uso geral da madeira serrada de eucalipto de reflorestamento, a NBR 14807/02 especifica as dimensões de peças de madeira serrada para uso geral através de intervalos de valores e a NBR 12498/17 estabelece os requisitos dimensionais para o uso geral da madeira serrada de coníferas de reflorestamento.

Apesar destas diversas normas brasileiras, em geral as mesmas não são respeitadas pelas madeireiras e empresas distribuidoras de madeira no Brasil. Gama et. al. (2016) identificou, através de um diagnóstico das madeiras serradas utilizadas na construção habitacional no município de Ribeira do Pombal (PA), que em todas as peças comercializadas havia alguma desconformidade com as normas técnicas. De Oliveira et. al. (2008) verificou que as empresas madeireiras do Distrito Federal também não cumpriam com as normas técnicas, afirmando ainda que a maioria das empresas estudadas não tinham conhecimento das normas. O mesmo também observou que quase 27% das empresas estudadas não identificavam corretamente as espécies botânicas.

2.3.3 Madeira Roliça

A madeira roliça é a parte do fuste da árvore obtida do corte transversal dela, podendo ser considerado como o produto da madeira que sofre o menor grau de processamento. Muitas vezes utilizada ainda com a casca, é empregada principalmente como escoramento de lajes e vigas, construção de andaimes, estrutura de cobertura em construções rurais e postes de distribuição elétrica, caracterizando o seu uso como construção pesada externa e interna (IPT, 2009).

Para este uso da madeira, a umidade também se torna uma importante variável. As madeiras roliças que não passaram por um processo de secagem estão sujeitas a retrações transversais que provocam rachaduras nas suas extremidades (PFEIL, 2017). Ainda, durante a secagem, as extremidades estão propensas a sofrer fendilhamento devido a maior velocidade de evaporação da água nestas partes mais expostas. De forma a evitar estas falhas, que

influenciam na empregabilidade da peça, o autor recomenda o uso de alcatrão ou outro impermeabilizante nas extremidades delas.

Quando usada como postes de distribuição de energia, a madeira roliça é tratada com produtos preservativos, assim como nos casos das construções chamadas *log homes* (IPT, 2009). Este tipo de construção (Figura 6) é encontrada principalmente nas áreas de florestas da América do Norte e é caracterizada como um tipo de arquitetura vernacular, ou seja, que utiliza os recursos do ambiente em que está localizada.

Peters (2015) acredita que o conhecimento primordial sobre os materiais de construção é baseado no conhecimento da natureza e no uso destes materiais naturais. E como consequência, o estudo das construções se torna uma fonte de conhecimento tanto para materiais de construção e técnicas relacionadas, quanto da interação do homem com o meio ambiente.



Figura 6: Exemplo de uma log home em construção
Fonte: Pioneer Log Homes of B.C. (2019).

Há décadas que a madeira de eucalipto tem sido utilizada nas indústrias de utilidades como postes, moirões e dormentes tratados, mas esse material também apresenta grande potencial, como apontam os estudos nas universidades e institutos brasileiros, para o seu uso em construções rurais, urbanas e industriais (BRITO, 2010).

O autor também chama atenção para a necessidade do setor em buscar produtos e processos para o tratamento do cerne das espécies de eucalipto, que em condições extremas de uso estão sujeitas ao ataque de organismos xilófagos. No entanto, sistemas construtivos como a *log home* servem como estímulo para o avanço das pesquisas no Brasil, incentivando a descobrir novas

tecnologias e soluções que possibilitem adequar a madeira roliça ao modelo construtivo e arquitetônico brasileiro.

2.3.4 Madeira Beneficiada

A madeira beneficiada é o resultado do processo de usinagem de peças serradas, de forma a melhorar o desempenho delas de acordo com o seu uso pretendido. Os processos de usinagens que as peças serradas são submetidas dependem do acabamento desejado (IPT, 2009).

O aplainamento retira as irregularidades e sobremedidas, tornando a superfície mais lisa. O molduramento realiza os cortes de encaixes, como o tipo macho-fêmea, e aumenta o comprimento de peças destinadas a forros, assoalhos, batentes de portas, dentre outros (IPT, 2009). Assim, o seu uso pode ser caracterizado como construção leve interna decorativa, utilidade geral, em esquadrias e assoalhos domésticos.

2.3.5 Madeira em Lâminas

O processo de obtenção da madeira em lâminas inicia-se pelo cozimento das toras. Em seguida, estas são submetidas ao corte em lâminas, que pode ser realizado através de dois métodos: o torneamento e o faqueamento (IPT, 2009).

O torneamento consiste no uso de um torno rotativo para a obtenção das lâminas, destinada principalmente à madeira compensada, Figura 7. Já o faqueamento produz lâminas únicas, produzidos a partir de uma tora presa pelas laterais e pressionada por uma lâmina aplicada em todo o seu comprimento. Estas lâminas são normalmente originadas de madeiras decorativas, podendo ser aplicadas como revestimentos de divisórias (IPT, 2009).

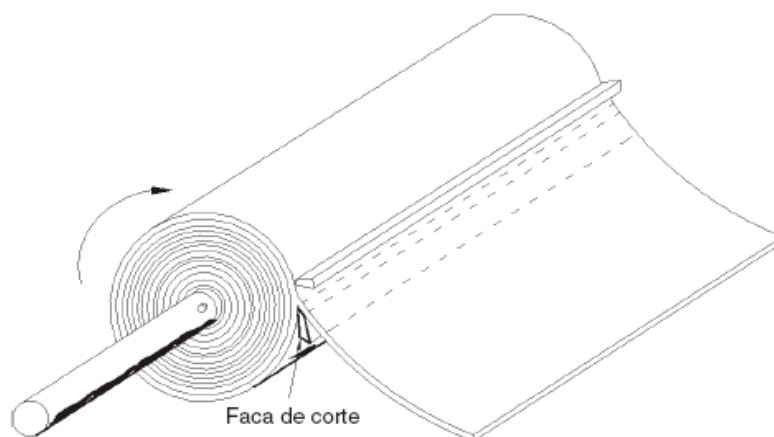


Figura 7: Corte rotatório de lâminas de madeira
Fonte: Pfeil (2017).

2.3.6 Painéis de Madeira

Com o objetivo de diminuir as variações dimensionais da madeira maciça, seu peso e custo, sem prejudicar as suas propriedades como isolantes térmico e acústicos, surgem os painéis de madeira. Este produto da madeira também supre a necessidade que a madeira serrada apresenta de aumentar a sua superfície útil, através da expansão da sua largura, otimizando a sua aplicação (IPT, 2009).

2.3.6.1 Madeira compensada

A madeira compensada é produzida através da colagem de três ou mais lâminas, sempre em números ímpares e em direções alternadas das fibras, como mostra a Figura 8. Ao alternar a direção das fibras, obtém-se um produto mais isotrópico do que a madeira maciça (PFEIL, 2017).

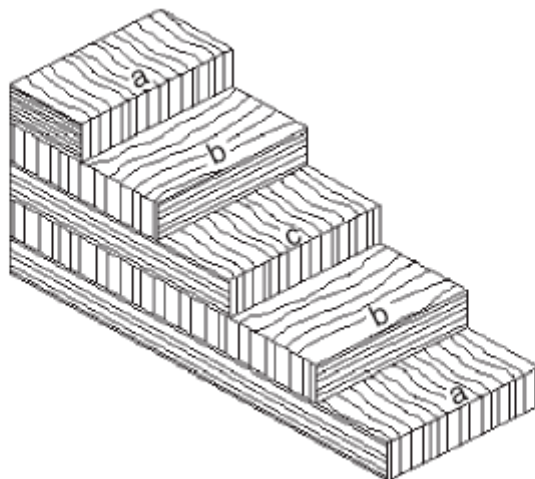


Figura 8: Seção de uma peça de madeira compensada, destacando-se as camadas de madeira
Fonte: Pfeil (2017).

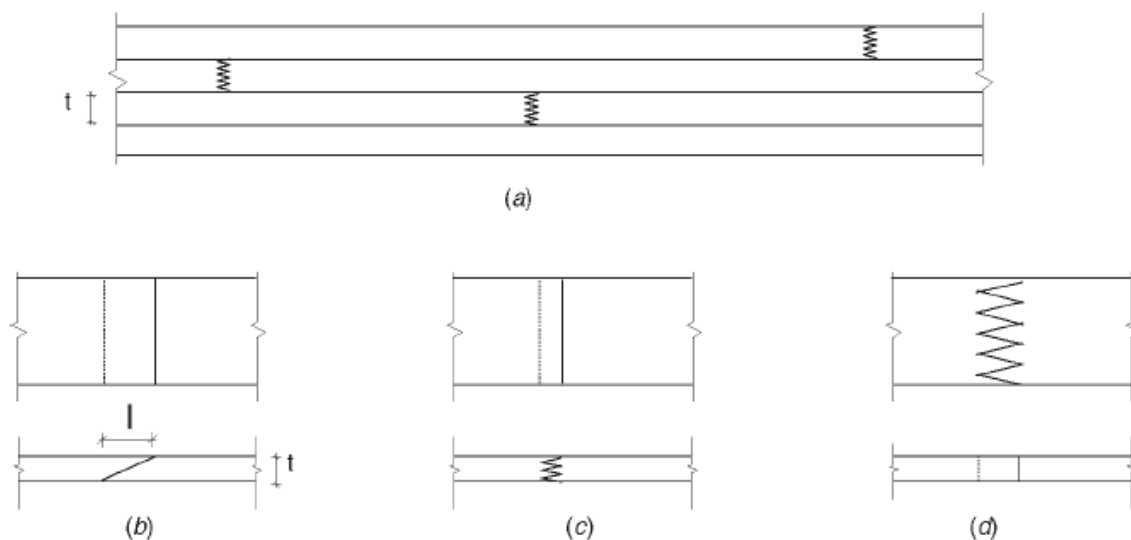
Após a produção das lâminas, elas são submetidas à secagem, podendo ser natural ou artificial. Em seguida é feita a colagem sob pressão das lâminas, prensadas a frio ou a quente, no caso do uso de colas sintéticas (PFEIL, 2017).

A madeira compensada é utilizada essencialmente na indústria de móveis e construção civil, variando entre chapas para uso interno e externo. O seu preço varia de acordo com a espécie da madeira, tipo de cola utilizada, qualidade das faces e número de lâminas que o compõe (IPT, 2009).

2.3.6.2 Madeira laminada colada

A madeira laminada colada é formada pela associação de lâminas de madeira selecionada, coladas com adesivos sob pressão e direcionadas paralelamente entre si, originando um produto estrutural. Com o objetivo de produzir peças de grande comprimento para fins estruturais, as lâminas podem ser emendadas nas bordas com cola (PFEIL, 2017).

Estas emendas podem ser realizadas com um dos detalhes ilustrados na Figura 9, e são distribuídas aleatoriamente ao longo da peça. A eficiência da emenda em chanfro aumenta com a inclinação do corte devido ao aumento da superfície de contato. As emendas dentadas são mais eficientes do que as chanfradas, além de serem mais compactas, e podem ser executadas na vertical ou horizontal (PFEIL, 2017).



a) Emendas de lâminas, b) Corte em chanfro, c) Denteada vertical, d) Denteada horizontal

Figura 9: Detalhes de emendas de lâminas

Fonte: PFEIL (2017).

A produção da madeira laminada colada segue um rígido padrão de controle de qualidade, garantindo-lhe características de resistência e durabilidade. Quando comparada a madeira serrada, a madeira laminada colada é mais homogênea, pois os nós da madeira são distribuídos ao longo da peça fabricada (PFEIL, 2017).

2.3.6.3 Chapas de partículas

Este produto em forma de placa foi desenvolvido utilizando os resíduos da madeira serrada e compensada, que foram convertidos em flocos e partículas e então colados entre si sob pressão. Estes produtos não são considerados como materiais estruturais, pois não apresentam grande resistência ou durabilidade e sua principal aplicação é na indústria moveleira (PFEIL, 2017).

A placa OSB (*Oriented Strand Board* – Painel de Partículas Orientadas) é um dos destaques deste tipo de produto da madeira. Com grande popularidade na América do Norte e Europa, este painel apresenta condições de ser empregado com fins estruturais, como painéis diafragma, almas de vigas I compostas, revestimentos de pisos e cobertura, como na Figura 10 (PFEIL, 2017).



Figura 10: Placa de OSB utilizada como revestimento de cobertura.
Fonte: Autoria própria (2019).

A resistência dos painéis OSB à flexão estática é alta, podendo substituir os compensados estruturais, mas não a madeira sólida original. Estes painéis são constituídos por camadas de partículas ou de feixes de fibras com resinas fenólicas, orientadas na mesma direção, e então prensados para a sua consolidação (IPT, 2009).

2.4 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

As peças que compõem as estruturas de madeira apresentam uma limitação em relação ao seu comprimento, devido à altura das árvores e meio de transporte (PFEIL, 2017). Para as espécies tropicais, o comprimento maior que 7 metros já mostra dificuldade na extração, e para espécies de reflorestamento, este valor diminui para 5 metros (CALIL JR., 2003). Como solução, são realizadas as ligações entre diferentes peças de menor comprimento, de forma a satisfazer o projeto estrutural.

Calil Jr. (2003) dividiu as ligações de peças estruturais de madeira em dois grupos: os entalhes, ou encaixes, e através de elementos externos. As ligações por

elementos externos comumente utilizadas são: colagem, pregos, grampos, braçadeiras, pinos, parafusos, conectores metálicos e tarugos (PFEIL, 2017). Estes exemplos de ligações são apresentados na Figura 11.

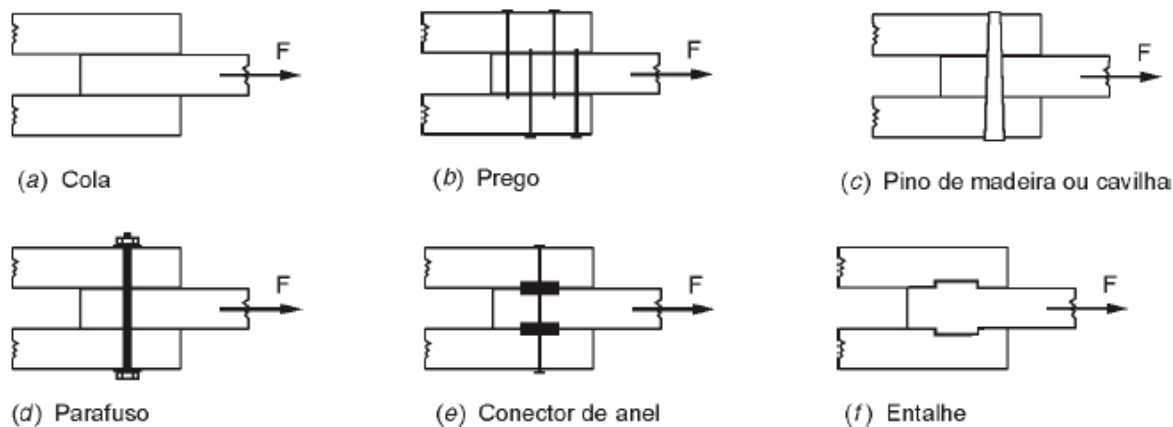


Figura 11: Tipos de ligações estruturais de peças de madeira
Fonte: PFEIL (2017).

2.4.1 Ligações Coladas

A ligação por cola é utilizada, principalmente, para a fabricação de peças de madeira laminada colada e madeira compensada (PFEIL, 2017). As finas películas adesivas dispostas entre as lâminas também podem ser utilizadas nas ligações longitudinais, como mostra a Figura 12, possibilitando a fabricação de peças mais compridas sem redução significativa da resistência à tração. Ainda, este sistema de ligação é capaz de produzir grandes seções transversais e comprimentos, de eixo reto ou curvo, através de lâminas de pequena espessura (CALIL, 2003). Esta ligação não costuma ser realizado *in loco*, pois demanda um controle rigoroso da cola, da umidade da madeira, da pressão e temperatura (PFEIL, 2017).

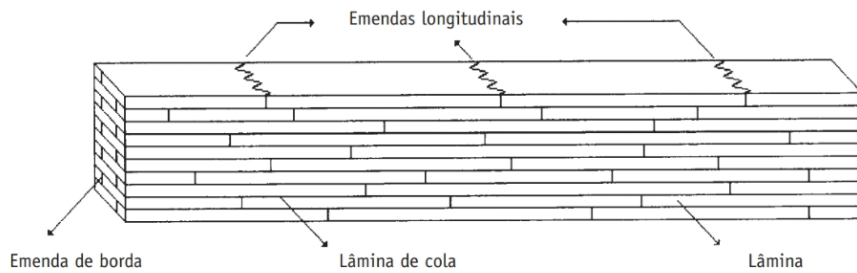


Figura 12: Madeira laminada colada
Fonte: CALIL (2003).

2.4.2 Ligações por Entalhes

Nas ligações por entalhes a transmissão das cargas é feita por contato direto entre as peças de madeira (CALIL, 2003), na qual a madeira trabalha à compressão associada a corte (PFEIL, 2017). O autor complementa que neste tipo de ligação a madeira é a responsável pela transmissão dos esforços, utilizando de grampos ou parafusos apenas para manter as peças conectadas.

A Figura 13 exemplifica o uso da ligação por entalhe em um nó típico de treliça para uma cobertura de duas águas, em que o banzo superior, solicitado por compressão, está ligado ao banzo inferior.

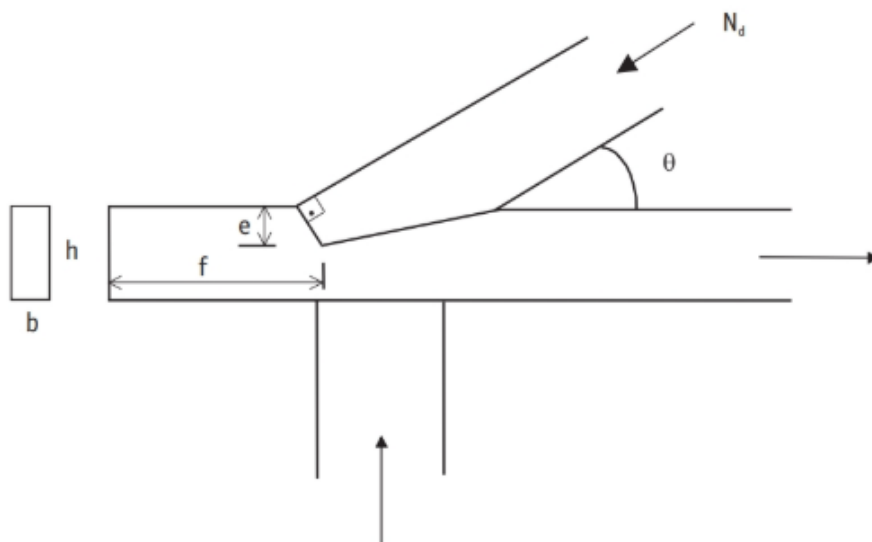


Figura 13: Nó de apoio de uma treliça de telhado em duas águas utilizando ligação por entalhe
Fonte: CALIL (2003).

2.4.3 Ligações Através de Elementos Externos

Calil Jr. (2003) considera que as ligações por pinos metálicos englobam os pregos e parafusos e que são os dispositivos empregados com maior frequência. Nestas ligações, a transmissão de esforços de uma peça a outra é feita causando um efeito de cisalhamento ao pino. O autor ainda apresenta as cavilhas de madeira como uma alternativa ao uso dos pinos metálicos, apresentando a vantagem da possibilidade de uso em ambientes agressivos que os pinos metálicos não resistiriam.

Por outro lado, Pfeil (2017) separa os três dispositivos por definições diferentes. Os pregos são apresentados como peças metálicas cravadas na madeira através de impacto e utilizados em ligações de montagem e ligações definitivas. Os pinos são definidos como eixos cilíndricos, de aço ou madeira dura (a cavilha), que são instalados em furos de diâmetro inferior a eles, tal que entram em carga sem causar deformações relativas às peças ligadas. Já os parafusos são separados em dois tipos: os parafusos rosqueados auto-atarraxantes e parafusos com porcas e arruelas.

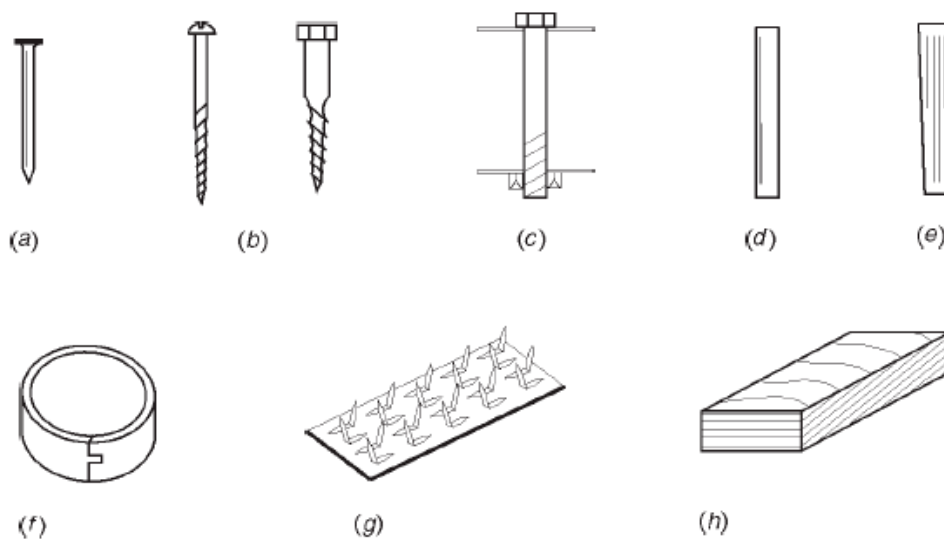
Os parafusos auto-atarraxantes não são usados em ligações com muita frequência, sendo mais empregados na marcenaria e para fixar acessórios metálicos em postes, dormentes etc. Os parafusos que são utilizados nas ligações estruturais são cilíndricos, lisos e tem uma cabeça em uma extremidade e rosca e porca na outra (PFEIL,2017). Segundo o autor, estes parafusos são instalados em furos com folga de, no máximo, 1 a 2 mm e então apertados com a porca. As roscas têm a função de reduzir a pressão de apoio na superfície da madeira.

As chapas de dentes estampados são instaladas através de uma prensa e são uma ótima solução para madeiras de menor densidade, que permitem uma melhor cravação dos dentes (CALIL, 2003).

Os anéis metálicos são inseridos em sulcos feitos na superfície da madeira, e no local de cada conector coloca-se um parafuso para impedir a separação das peças ligadas (PFEIL, 2017). Segundo Calil (2003), esta ligação apresenta grande eficiência na transmissão de esforços, que tende a provocar o cisalhamento do disco de madeira interno ao anel e compressão entre a madeira e o anel.

Os tarugos são peças de madeira dura colocadas no interior de entalhes. Fixados através de parafusos auxiliares, estes conectores auxiliam na transmissão dos esforços (PFEIL, 2017).

Os conectores das ligações apresentados acima estão ilustrados na Figura 14, sendo eles a) prego, b) parafuso auto-atarraxante, c) parafuso com porca e arruela, d) pino metálico, e) pino de madeira, f) conector de anel metálico, g) chapa com dentes estampados, h) tarugo de madeira.



a) prego, b) parafuso auto-atarraxante, c) parafuso com porca e arruela, d) pino metálico, e) pino de madeira, f) conector de anel metálico, g) chapa com dentes estampados, h) tarugo de madeira

Figura 14: Conectores para ligações em estruturas de madeira

Fonte: PFEIL (2017).

2.5 COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO AXIAL POR CORTE EM PINOS METÁLICOS

Quando a força que deve ser transmitida por uma ligação está perpendicular ao eixo do elemento de ligação, esta é chamada de ligação por corte, podendo estar sujeita a uma, duas ou até múltiplas seções de corte. A Figura 15 ilustra as duas primeiras situações. Esta é a situação a que os pinos, pregos e parafusos estão sujeitos quando utilizados como elementos de ligação axial, sendo solicitados por esforços normais e comportando-se de maneira semelhante (PFEIL, 2017).

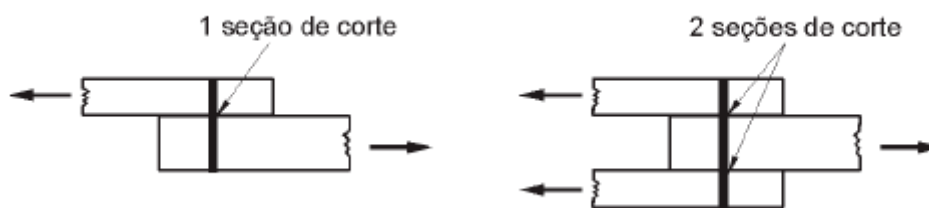
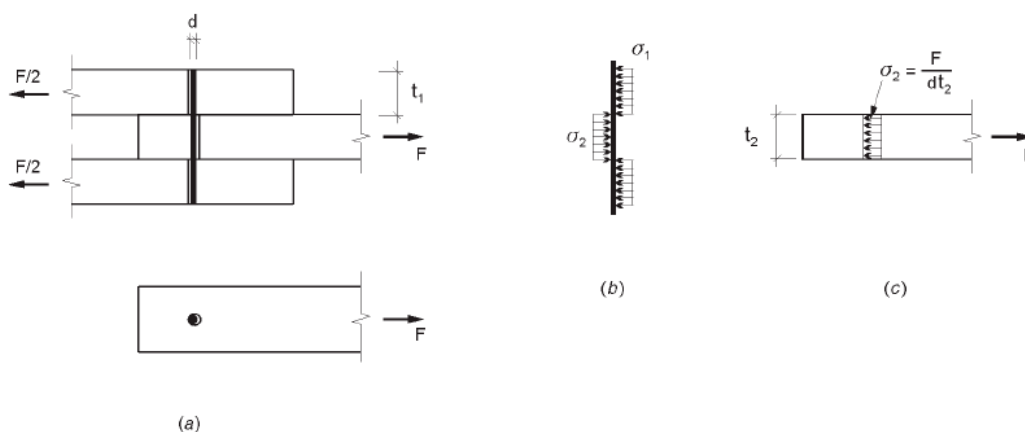


Figura 15: Ligação axial por corte único e duplo
Fonte: PFEIL (2017).

No caso de uma ligação em corte duplo, a transmissão da força aplicada é realizada pelo apoio do pino na madeira. O pino fica submetido à flexão simples, devido a carga transversal distribuída em seu eixo, enquanto a madeira fica submetida à compressão localizada e paralela às fibras (PFEIL, 2017). A geometria da ligação e a representação dos esforços aplicados ao pino e à madeira estão apresentados na Figura 16.



a) geometria de ligação com duas sessões de corte, b) pino sujeito a flexão devido às forças de contato com peças de madeira, c) peça central de madeira sujeita à tensão de compressão localizada σ_2 devido ao contato com o pino (tensão de cisalhamento)

Figura 16: Ligação por apoio da madeira em pino
Fonte: PFEIL (2017).

Segundo o autor, a tensão nominal de compressão (σ_2) que a madeira central está submetida pode ser obtida pela Equação 1, em que d é o diâmetro do pino e t_2 a espessura da peça central.

$$\sigma_2 = \frac{F}{d \cdot t_2} \quad (1)$$

Nesta situação, existem dois mecanismos de ruptura: por embutimento das peças de madeira e flexão do pino metálico (CALIL, 2003). Estes dois mecanismos serão abordados em sequência.

Johansen (1949) realizou uma série de experimentos com ligações de peças de madeira em corte simples e duplo com elementos de diferentes espessuras, analisando a sua resistência mecânica e modos de ruptura. Como conclusão chegou às equações da carga limite para diferentes mecanismos de plastificação em ligações com pinos metálicos. Johansen foi o precursor do estudo sobre o comportamento mecânico de ligações por pinos metálicos e seus estudos serviram de base para a formulação de normas técnicas, como o Eurocode. Os diferentes mecanismos estudados pelo autor são apresentados na Figura 17.

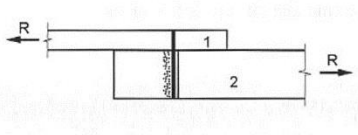
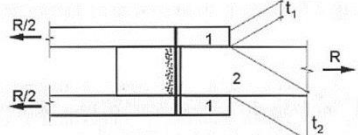
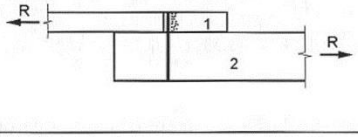
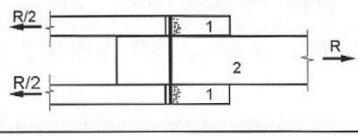
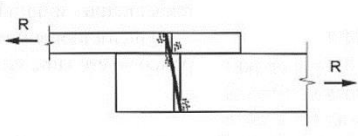
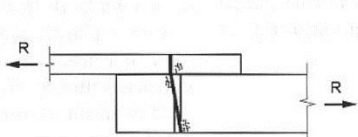
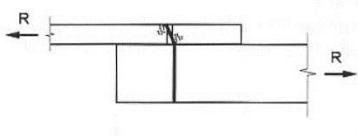
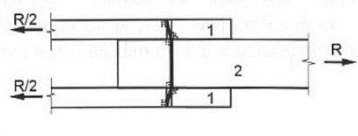
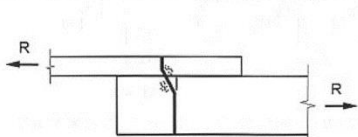
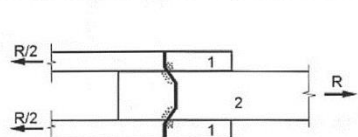
Mecanismo	Descrição	Ilustração	
		Corte simples	Corte duplo
I - 2	Esmagamento local da peça 2		
I - 1	Esmagamento local das peças 1		
II	Esmagamento local das peças com rotação do pino		
III - 2	Esmagamento da peça 2 e formação de rótula plástica no pino		
III - 1	Esmagamento da peça 1 e formação de 1 rótula plástica no pino por plano de corte		
IV	Formação de 2 rótulas plásticas por plano de corte com esmagamento das peças		

Figura 17: Mecanismos de plastificação em ligações com pinos
Fonte: PFEIL (2017)

Nos mecanismos I e II ocorre apenas o esmagamento das peças de madeira, com ou sem rotação do pino metálico, enquanto nos mecanismos III e IV são formadas rótulas nos pinos, como foi apresentado anteriormente. O mecanismo II não é aplicado à situação de corte duplo, pois a sua simetria não permite que o pino rotacione como um corpo rígido (PFEIL, 2017). As equações da carga limite R_d dos mecanismos de ruptura I, III e IV aplicados ao corte de seção dupla para a mesma espécie de madeira são dados, respectivamente, pelas equações 2, 3, 4 e 5. A resistência da ligação em estudo é adotada como o menor valor entre os diferentes mecanismos.

$$R_d = f_{ed} \cdot t_1 \cdot d \quad (2)$$

$$R_d = 0,5 \cdot f_{ed} \cdot t_2 \cdot d \quad (3)$$

$$R_d = \frac{f_{ed} \cdot d \cdot t_1}{3} \left[\sqrt{4 + \frac{12 \cdot M_{pd}}{f_{ed} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$R_d = \sqrt{2 \cdot M_{pd} \cdot f_{ed} \cdot d} \quad (5)$$

Onde f_{ed} é a resistência de embutimento, M_{pd} é o momento resistente de projeto, t_1 é a espessura das peças de madeira externas e t_2 da peça de madeira central.

2.5.1 Embutimento da Madeira

A resistência ao embutimento é definida no Anexo B da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) como a tensão de compressão localizada referida à força que causa deformação residual igual a 2,0‰, tratando assim de uma questão de deformabilidade da peça. A norma brasileira também fornece as orientações para o ensaio padronizado da resistência ao embutimento (Figura 18) e meios para o cálculo na impossibilidade de determinação experimental, paralela às fibras pela Equação 6 e normal às fibras pela Equação 7.

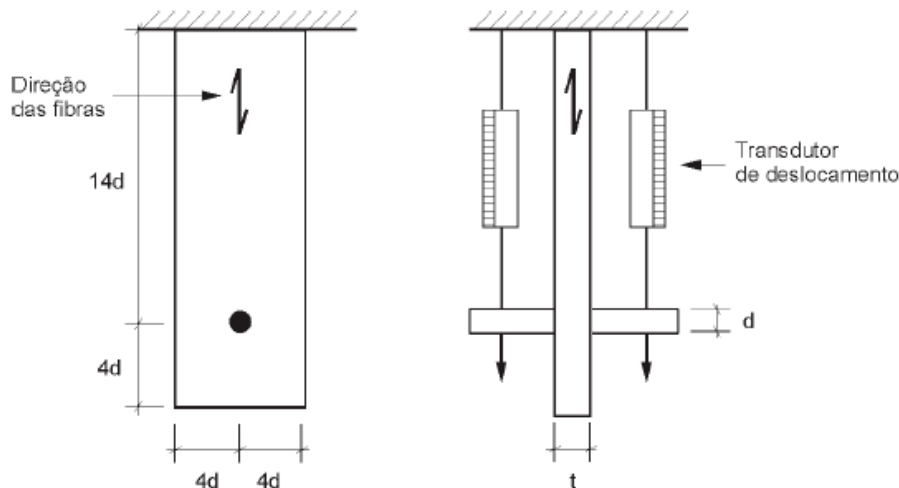


Figura 18: Ensaio para determinação da resistência ao embutimento paralelo às fibras
Fonte: PFEIL (2017).

$$f_{ed} = f_{cd} \quad (6)$$

$$f_{end} = 0,25 \cdot f_{ed} \cdot \alpha_e \quad (7)$$

Sendo f_{ed} a resistência de cálculo ao embutimento paralelo às fibras, f_{cd} a resistência de cálculo à compressão, f_{end} a resistência de cálculo ao embutimento normal às fibras e α_e um coeficiente de cálculo que varia de acordo com o diâmetro do pino utilizado na ligação.

2.5.2 Flexão do Pino Metálico

Já o pino metálico está submetido à tensões normais de flexão em sua seção circular, e a distribuição de tensões é linear. A plastificação da seção de momento máximo inicia quando a tensão de escoamento do aço (f_y) é atingida, e aos poucos a plastificação se estende até as fibras mais internas da seção do aço. Com a plastificação total da seção atingida, esta transforma-se em uma rótula plástica, desenvolvendo grandes rotações sem acréscimo de momento resistente. O momento resistente de cálculo do pino metálico (M_{pd}) é calculado utilizando o coeficiente de redução de resistência $\gamma_s = 1,1$ como indica a Equação 8. PFEIL (2017) traz também a evolução das tensões normais no pino metálico (Figura 19).

$$M_{pd} = \frac{Z \cdot f_y}{\gamma_s} \quad (8)$$

Em que Z é o módulo plástico da seção e pode ser interpretado como o momento estático ao redor do eixo neutro da seção.

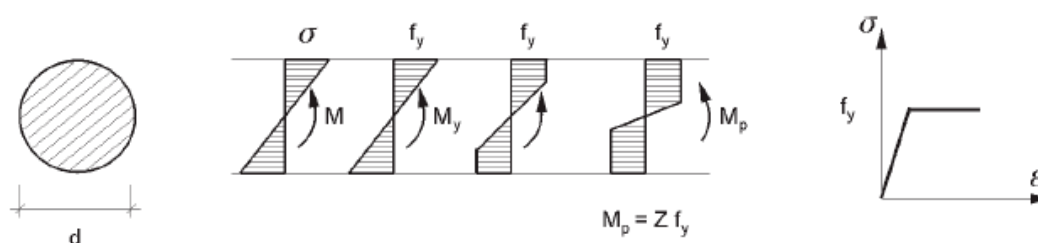


Figura 19: Evolução das tensões normais em uma seção do pino sob flexão, até a plastificação total da seção
Fonte: PFEIL (2017).

2.6 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES POR PINO METÁLICO

Com a revisão da NBR 7190 em 1997, BAENA (2015) viu a necessidade de comparar os critérios de dimensionamento das ligações por pinos metálicos da NBR 7190/97 com outros documentos normativos, como a norma anterior, NBR 7190/82, e os documentos que possuem grande tradição em estruturas em madeira, como a norma europeia EUROCODE 5 e a norte-americana LRFD (*Standard for Load and Resistance Factor Design*). Durante a sua pesquisa ele observou que a NBR 7190/97 não faz distinção entre as formulações para a resistência de ligações em corte simples e corte duplo, como os modelos teóricos referenciados pelas outras normas fazem. Quanto a resistência ao embutimento, a norma brasileira permite considerar a resistência à compressão paralela às fibras, enquanto a norma americana LRFD:1996 e a europeia EUROCODE 5:2004 utilizam a densidade aparente da madeira e o diâmetro do pino metálico como parâmetro para a comparação. Ainda, foi verificado que os valores para tensão resistente de cálculo da norma brasileira eram inferiores aos valores dos

demais documentos normativos, no caso de relações pequenas entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino.

A seguir serão apresentados os critérios de dimensionamento de ligações de madeira por pino metálico da norma brasileira atual, NBR 7190/97, a norma europeia, EUROCODE 5:2004, e a norte-americana, LRFD:1996.

2.6.1 Critérios de Dimensionamento da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas em Madeira

O item 8 da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), intitulado “Ligações”, traz os critérios de dimensionamento de diferentes ligações, incluindo pinos metálicos (pregos e parafusos), cavilhas e conectores (anéis metálicos e chapas com dentes estampados). O critério geral de dimensionamento traz a condição de que o valor de cálculo das solicitações atuantes na ligação deve ser igual ou inferior à resistência dos elementos da ligação. A norma ainda afirma que o estado limite último da ligação pode ser atingido por deficiência de resistência da madeira da peça estrutural ou do elemento de ligação.

Quanto às ligações por pinos metálicos, a norma brasileira proíbe a utilização de um único pino e considera as ligações com dois ou três pinos como deformáveis, podendo ser utilizadas apenas em estruturas isostáticas. Enquanto as ligações com quatro ou mais pinos são consideradas rígidas, desde que sigam as seguintes condições:

- Em ligações pregadas deve ser respeitado os critérios de pré-furação com o diâmetro d_0 não maior que o diâmetro d_{ef} do prego, seguindo a relação entre as coníferas e dicotiledôneas, respectivamente:

$$d_0 = 0,85 \cdot d_{ef} \quad (9)$$

$$d_0 = 0,98 \cdot d_{ef} \quad (10)$$

- Em ligações parafusadas a pré-furação deve ser feita com diâmetro d_0 até o diâmetro d do parafuso acrescido de 0,5 mm.

A norma brasileira também faz recomendações quanto ao diâmetro e características do aço do pino a ser utilizado. Para os pregos estruturais é recomendado o diâmetro mínimo de 3 mm e resistência característica de escoamento f_{yk} de pelo menos 600 MPa. Já para os parafusos estruturais, recomenda-se o diâmetro mínimo de 10 mm e resistência característica de escoamento f_{yk} de pelo menos 240 MPa.

Para o cálculo da resistência de um pino, associado a uma seção de corte, os parâmetros considerados são a resistência ao embutimento f_{wed} das madeiras interligadas, a resistência ao escoamento f_{yd} do pino metálico, do diâmetro d do pino metálico e da espessura convencional t , devendo ser utilizada a menor das espessuras t_1 e t_2 dos elementos ligados. O diâmetro d do pino e a espessura t da peça de madeira no caso de ligações parafusadas deve seguir a relação $d \leq t/2$. A Figura 20 demonstra a relação entre estas espessuras em um desenho esquemático.

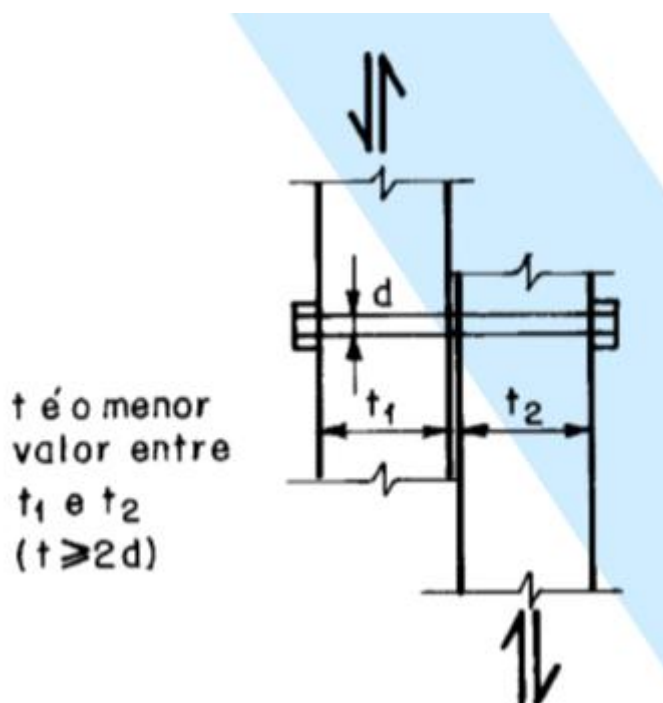


Figura 20: Pino parafusado em corte simples
Fonte: ABNT (1997)

O valor de cálculo da resistência da ligação de um pino metálico com uma seção de corte é determinado segundo o parâmetro β , dado pela Equação 11.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (11)$$

Além disso é definido o valor limite do parâmetro β pela Equação 12.

$$\beta_{lim} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (12)$$

Em que f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do pino metálico, determinado utilizando o coeficiente $\gamma_s = 1,1$ sobre o valor de f_{yk} do aço, e f_{ed} a resistência de cálculo de embutimento.

O valor de cálculo $R_{Vd,1}$ da resistência do pino é determinada através das seguintes equações, adotando o menor entre os dois valores obtidos:

- Embutimento da madeira

$$\beta \leq \beta_{lim} \quad (13)$$

$$R_{Vd,1} = 0,40 \cdot \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{ed} \quad (14)$$

- Flexão do pino

$$\beta > \beta_{lim} \quad (15)$$

$$R_{Vd,1} = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{yd}, \quad (16)$$

considerando $\beta = \beta_{lim}$

Para as ligações com pinos metálicos em corte duplo, a norma brasileira sugere a aplicação dos mesmos critérios apresentados para corte único, aplicando os cálculos para cada uma das seções de corte, considerando a espessura t como o menor valor entre t_1 e $t_2/2$ em uma das seções e entre $t_2/2$ e t_3 na outra seção. A Figura 21 ilustra a relação entre estas espessuras no caso da ligação utilizando parafuso em corte duplo.

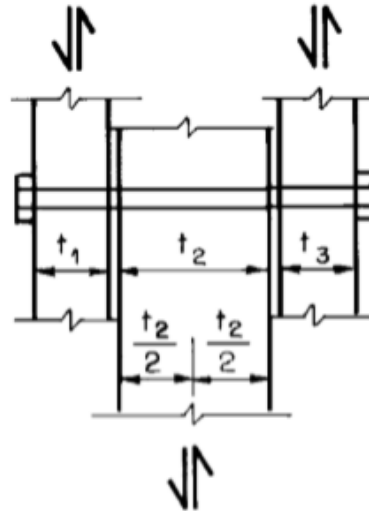
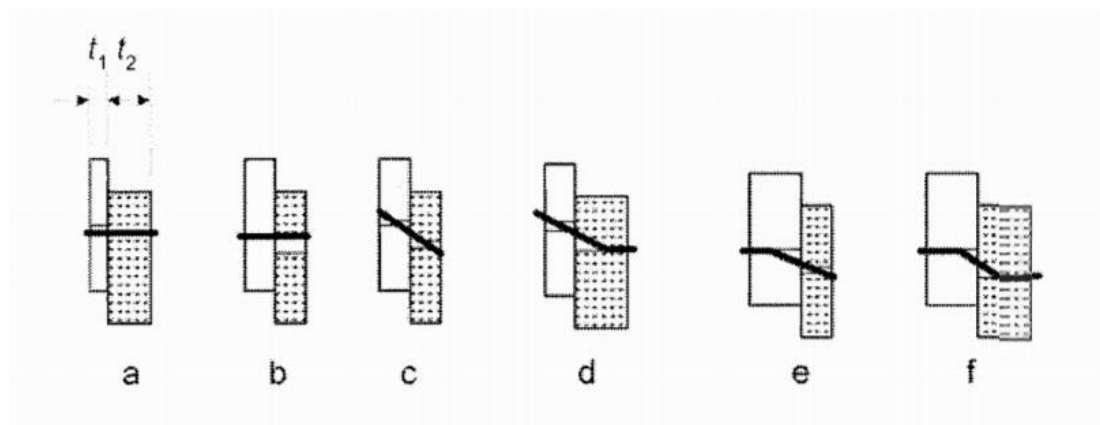


Figura 21: Pino parafusado em corte duplo
Fonte: ABNT (1997).

2.6.2 Critérios de Dimensionamento do EUROCODE 5: 2004 – *Design of Timber Structures*

Diferentemente da norma brasileira, a norma europeia prevê seis modos de ruptura da ligação com pino metálico, tanto para pregos quanto parafusos, em corte simples e quatro modos de ruptura para as ligações em corte duplo. O valor característico da resistência da ligação para cada seção de corte é considerado o menor entre os valores obtidos para cada um dos modos de ruptura. Os modos de ruptura a serem analisados para as ligações em corte simples são apresentados na Figura 22.



a) e b) representam a falha da ligação por embutimento do pino metálico em uma das peças de madeira, c) representa a falha da ligação por embutimento nas duas peças de madeira, d) e e) representam a falha da ligação pela flexão do pino metálico em uma das peças de madeira, f) representa a falha da ligação por flexão do pino em ambas as peças de madeira.

Figura 22: Modos de ruptura em ligações por pino com seção de corte simples considerados pelo EUROCODE 5
Fonte: EUROCODE 5 (2004).

Nos casos a) e b) a ruptura ocorre devido ao embutimento do pino metálico em uma das peças de madeira, enquanto no caso c) ocorre o embutimento simultâneo nas duas peças de madeira. Os casos d) e e) representam a ruptura por flexão do pino metálico em uma das peças de madeira e, de forma análoga ao caso c), o caso f) representa a flexão do pino metálico nas duas peças de madeira.

A Equação 17 indica, respectivamente, os cálculos para a determinação da resistência característica do pino metálico $F_{v,Rk}$ para uma seção de corte de cada um dos modos de rupturas apresentados.

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 (a) \quad & f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \\
 (b) \quad & f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d \\
 (c) \quad & \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\
 (d) \quad & 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\
 (e) \quad & 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\
 (f) \quad & 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}
 \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Onde:

t_1 e t_2 : espessura da madeira;

$f_{h,1k}$ e $f_{h,2k}$: resistência característica ao embutimento da madeira;

d : diâmetro do pino metálico;

$M_{y,Rk}$: momento característico de escoamento do pino metálico;

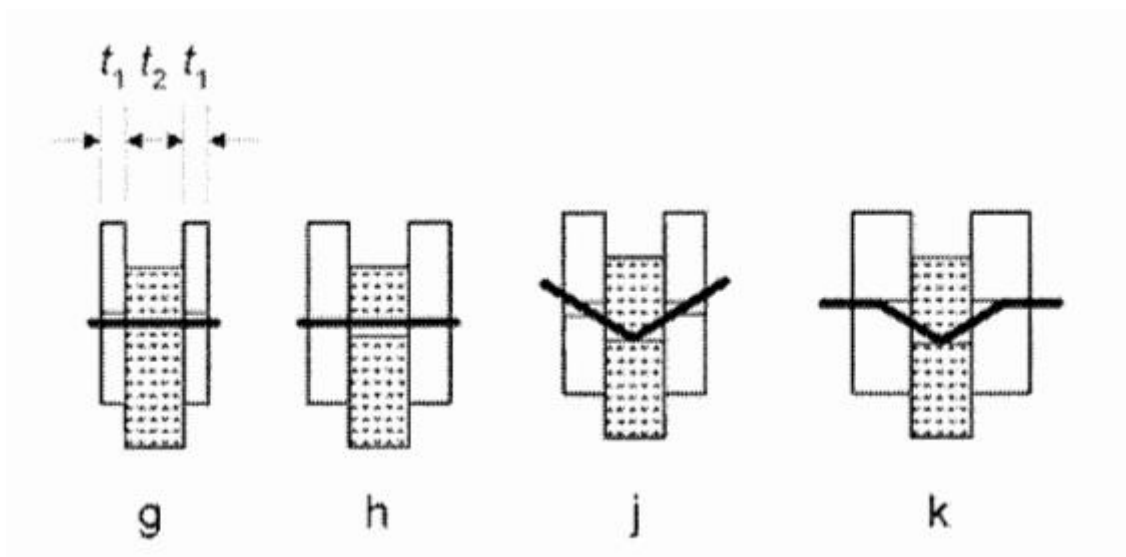
β : relação entre $f_{h,1k}$ e $f_{h,2k}$;

$F_{ax,Rk}$: resistência característica de arrancamento do pino metálico.

O momento característico de escoamento do pino metálico é determinado pela Equação 18, em que $f_{u,k}$ representa a resistência última a tração do aço.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \tag{18}$$

Os quatro modos de ruptura na situação de corte duplo considerados pela norma europeia estão indicados na Figura 23.



g) e h) representam a falha da ligação por embutimento na madeira exterior e interior, j) e k) representam a falha da ligação por flexão do pino metálico causado pela madeira exterior e interior

Figura 23: Modos de ruptura em ligações por pino com seção de corte dupla considerados pelo EUROCODE 5

Fonte: EUROCODE 5 (2004).

O caso (g) representa a ruptura por embutimento do pino metálico nas peças de madeira externas e o caso (h) na peça de madeira interna. Já os casos (j) e (k) representam a ruptura por flexão do pino metálico nas peças de madeira externas e na peça interna, respectivamente.

A Equação 18 traz os cálculos de cada um dos modos de ruptura da ligação por pino metálico com seção de corte dupla apresentados acima. Novamente é adotado o menor valor entre as quatro equações do sistema.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{(g)} \quad f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \\
 \text{(h)} \quad 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \\
 \text{(i)} \quad 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\
 \text{(j)} \quad 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}
 \end{array} \right. \quad (19)$$

As variáveis desta equação seguem o mesmo padrão apresentado para os modos de ruptura do pino com uma seção de corte.

2.6.3 Critério de Dimensionamento da LRFD: 1996 – *Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC)*

A norma norte-americana LRFD (*Standard for Load and Resistance Factor Design*), assim como a norma europeia, indica os modos de ruptura a serem analisados em ligações por pinos metálicos, abrangendo pregos e parafusos. A Figura 24 indica estes modos de ruptura para as ligações com seção de corte simples e dupla.

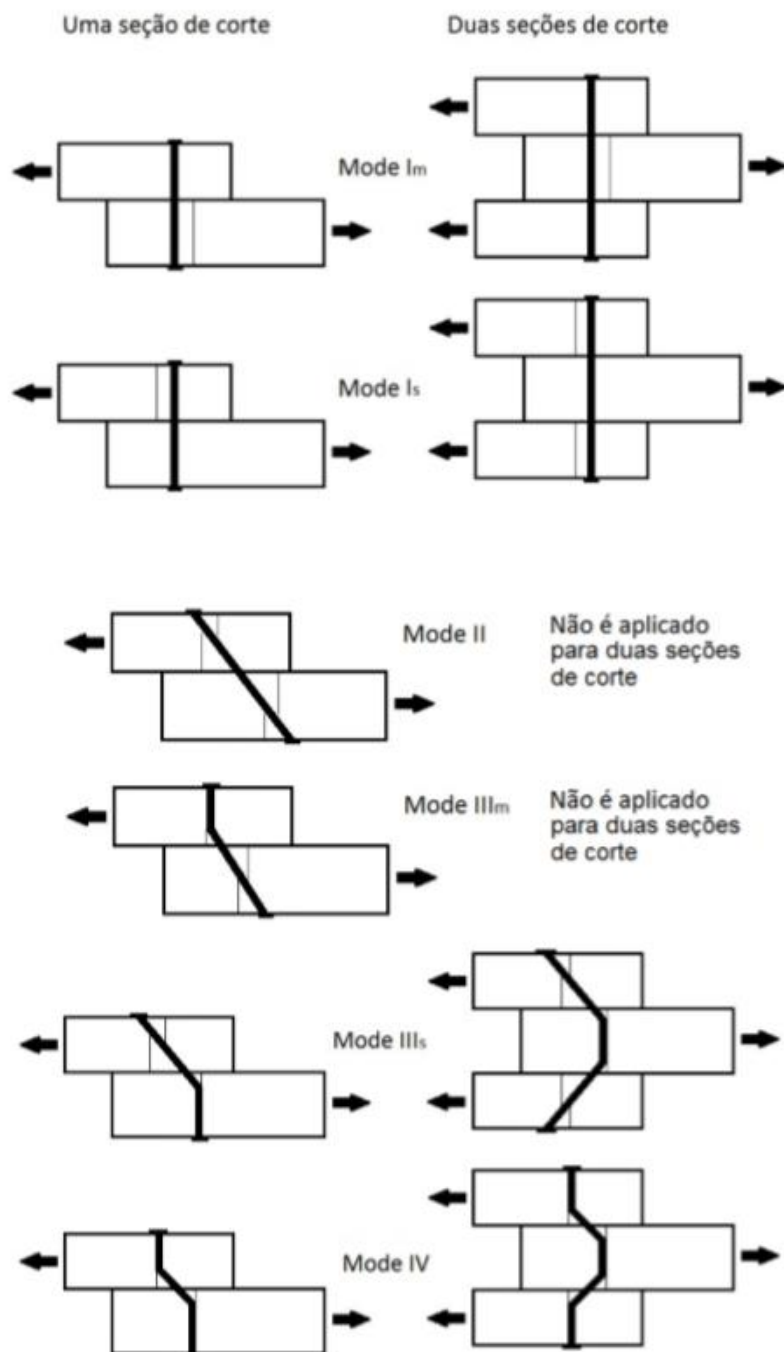


Figura 24: Modos de ruptura em ligações por pino com seção de corte simples e dupla considerados pela LRFD
 Fonte: LRFD apud. BAENA (2015).

De forma análoga a norma europeia, a LRFD separa os modos de ruptura nos casos de embutimento do pino metálico nas peças de madeira (Mode I_m e Mode I_s) e nos casos de flexão do pino metálico (Mode II , Mode III_m , Mode III_s e Mode IV).

O cálculo da resistência da ligação, indicado por Z , também é feito para cada um dos modos de ruptura apresentados para uma e duas seções de corte, utilizando os menores valores obtidos para cada uma das situações. As Equações serão apresentadas a seguir nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Equações para o cálculo da resistência da ligação por pino metálico de seção de corte simples para os modos de ruptura indicados pela LRFD

Modos de Ruptura	Equações	
I_m	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_m \cdot F_{em}}{K_\theta}$	Equação 20
I_s	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{es}}{K_\theta}$	Equação 21
II	$Z = \frac{0,93 \cdot k_1 \cdot d \cdot F_{es}}{K_\theta}$	Equação 22
III_m	$Z = \frac{1,04 \cdot k_2 \cdot d \cdot t_m \cdot F_{em}}{(1 + 2R_e)K_\theta}$	Equação 23
III_s	$Z = \frac{1,04 \cdot k_3 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e)K_\theta}$	Equação 24
IV	$Z = \left(\frac{1,04 \cdot d^2}{K_\theta} \right) \cdot \sqrt{\frac{2F_{em}F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$	Equação 25

Fonte: LRFD apud. BAENA (2015).

Tabela 5: Equações para o cálculo da resistência da ligação por pino metálico de seção de corte dupla para os modos de ruptura indicados pela LRFD

Modos de Ruptura	Equações	
I_m	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_m \cdot F_{em}}{K_\theta}$	Equação 26
I_s	$Z = \frac{1,66 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{es}}{K_\theta}$	Equação 27
III_s	$Z = \frac{2,08 \cdot k_3 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e)K_\theta}$	Equação 28
IV	$Z = \left(\frac{2,08 \cdot d^2}{K_\theta} \right) \cdot \sqrt{\frac{2F_{em}F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$	Equação 29

Fonte: LRFD apud. BAENA (2015).

Onde:

$$K_{\theta} = 1 + 0,25 \cdot (\theta/90^{\circ})$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2(1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 \cdot R_e^3} - R_e \cdot (1 + R_t)}{1 + R_e}$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2 \cdot (1 + R_e) + \frac{2 \cdot F_{yb}(1 + 2 \cdot R_e) \cdot d^2}{3 \cdot F_{em} \cdot t_m^2}}$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{yb}(2 + R_e) \cdot d^2}{3 \cdot F_{em} \cdot t_s^2}}$$

$$R_t = \frac{t_m}{t_s}$$

$$R_e = \frac{F_{em}}{F_{es}}$$

F_{em} : resistência ao embutimento da peça de madeira principal da ligação;

F_{es} : resistência ao embutimento da peça de madeira secundária da

ligação;

t_m : espessura da peça de madeira principal;

t_s : espessura da peça de madeira secundária;

d : diâmetro do pino metálico;

F_{yb} : tensão de escoamento do pino metálico.

2.7 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÕES DA MADEIRA ROLIÇA COM FINS ESTRUTURAIIS

Serão apresentados exemplos da utilização da madeira roliça com fins estruturais em que foram feitas ligações entre as peças. Os exemplos que serão mostrados foram selecionados pelo autor deste trabalho na cidade de Pato Branco, Paraná e região.

A Figura 25 mostra uma estrutura que usa o sistema de pórticos espaciais, encontrado em uma madeireira na cidade de Pato Branco. As vigas secundárias transferem suas cargas principais para a viga principal, que então transfere para os pilares e por fim ao solo.



Figura 25: Sistema de pórtico espacial utilizando madeira roliça.
Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se o uso de chapas dentadas nas extremidades das vigas de forma a diminuir as rachaduras, causadas por retrações transversais (PFEIL, 2017). Assim como a presença de rachaduras também nas extremidades dos pilares em contato com as vigas. As peças de madeira foram utilizadas sem nenhum tipo de tratamento químico.

A Figura 26 traz os detalhes de ligações feitas com parafuso e as retrações apresentadas pelas vigas secundárias e pilares.



Figura 26: Detalhes das ligações e retrações transversais do pórtico espacial em madeira roliça
Fonte: Autoria própria (2019).

Mais um exemplo da utilização da madeira roliça como um pórtico pode ser visto na Figura 27. Nesta estrutura, utilizada como um portão de entrada de uma propriedade na rodovia SC - 305, perto da divisa entre os estados do Paraná e Santa Catarina, são utilizados pregos nas ligações entre as peças, placas dentadas nas extremidades para o controle de rachaduras, assim como um corte estratégico das vigas para o melhor encaixe com os pilares.



Figura 27: Pórtico espacial utilizando madeira roliça
Fonte: Autoria própria (2019).

Os detalhes das ligações entre as vigas e pilares, assim como da sua fixação à base de concreto, são apresentados na Figura 28. A sua base de concreto é conectada a uma placa metálica que se estende por um comprimento de, aproximadamente, 50 cm e também conta com um apoio central de contato direto.



Figura 28: Detalhes da ligação entre as peças de madeira roliça e da base do pórtico espacial

Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 29 traz o uso da madeira roliça em um deck presente em um parque ambiental na cidade de Pato Branco, Paraná. A estrutura do piso deste deck é feita em madeira roliça combinado com cabos de aço presentes nos guarda-corpos. Observa-se o uso da madeira roliça em vigas secundárias e principais no sistema estrutural do deck e como pilaretes em conjunto com os cabos de aço para formar o guarda-corpo, como mostra a Figura 30.



Figura 29: Sistema estrutural de um deck utilizando madeira roliça

Fonte: Autoria própria (2019).



Figura 30: Sistema de guarda-corpo utilizando a madeira roliça
Fonte: Autoria própria (2019).

Nas ligações entre as peças de madeira do guarda-corpo observou-se um tipo de material com função adesiva, não havendo nenhum vestígio de uso de conector metálico. A cor e brilho da madeira indica que foi aplicado algum tratamento químico na mesma, mostrando uma preocupação com a durabilidade e desempenho dessas peças.

Já na ligação entre os pilaretes de madeira e os cabos de aço foram utilizados parafusos do tipo esticadores e chapas conectoras de aço em sua base para ligar os pilaretes ao deck. Os cabos de aço dão rigidez ao guarda-corpo e os conectores fornecem mais equilíbrio e estabilidade na base dos pilaretes. Os detalhes das ligações apresentadas são mostrados pela Figura 31.



Figura 31: Detalhes das ligações entre as peças de madeira roliça e da madeira com os cabos de aço
Fonte: Autoria própria (2019).

No mesmo parque ambiental deste deck, também foi encontrado uma ponte sob um lago que utilizou madeira roliça em sua estrutura, apresentada pela Figura 32. Esta ponte utilizou um formato de treliça para vencer um vão de, aproximadamente, 3,5 m. Além das peças de madeira roliça dispostas de forma inclinada sobre o pavimento externo, esta ponte conta com um tronco de maior diâmetro em sua base, que transfere as cargas que a ponte recebe para o solo de duas extremidades.



Figura 32: Sistema estrutural de uma ponte em madeira roliça
Fonte: Autoria própria (2019).

Assim como no caso do guarda-corpo, a ponte também não apresentou indícios do uso de conectores além da aplicação de um material adesivo entre

as peças de madeira. Os pilaretes também estavam conectados em sua base por conectores, dando mais estabilidade e rigidez ao sistema. Também se observou a aplicação de tratamento químico em todas as peças de madeira. Estes detalhes são mostrados na Figura 33.



Figura 33: Detalhes da treliça e das ligações utilizadas na ponte em madeira roliça
Fonte: Autoria própria (2019).

2.8 ESTUDOS RELACIONADOS ÀS LIGAÇÕES COM MADEIRA ROLIÇA

Zangiácomo (2007) analisou as propriedades de resistência e rigidez de elementos estruturais roliços de madeira a partir da determinação dos módulos de elasticidade longitudinal, transversal e de resistência das peças. Foram realizados os ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras em elementos estruturais, repetindo os mesmos ensaios para corpos-de-prova de dimensões reduzidas utilizando três espécies de madeira diferentes, *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Eucalyptus citriodora*, todas de origem de florestas plantadas. Os resultados destes ensaios permitiram o autor a concluir que, na flexão estática, a partir da relação vão/diâmetro = 18 as deformações devido ao cisalhamento podem ser desconsideradas no cálculo do módulo de elasticidade longitudinal. Verificou-se que existe diferença nos resultados do módulo de elasticidade longitudinal na flexão entre as peças estruturais e corpos-de-prova de dimensão reduzida. O mesmo resultado foi verificado para os valores dos ensaios de compressão paralela para o módulo de elasticidade longitudinal e transversal. Concluindo assim que é necessária uma metodologia de ensaio específica para as peças estruturais de madeira roliça.

Brito (2010) realizou estudos teóricos e experimentais de elementos estruturais e ligações em madeira roliça de reflorestamento, classificando e caracterizando-as, visualmente e mecanicamente, a fim de criar um manual com recomendações para projetos e construções de estruturas de madeira roliça. Também catalogou 124 fichas técnicas, apresentando sistemas alternativos para a área de estruturas e na construção civil para a construção de passarelas, pontes, edificações residenciais, estabelecimentos comerciais, igrejas, arquibancadas etc.

Vale (2011) utilizou uma metodologia híbrida entre a NBR 7190/97 e norma europeia EN14251:2003 – Structural Round Timber – Test Methods para desenvolver uma solução de ligação mecânica para a madeira roliça de *Eucalyptus* de pequeno diâmetro. Foi realizada a caracterização da madeira, determinando-se a sua resistência, rigidez, umidade, densidade aparente, módulo de elasticidade na flexão, módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. O autor pôde concluir que os parâmetros geométricos da ligação, como o diâmetro da peça de madeira, o diâmetro da barra metálica e a profundidade de ancoragem da barra metálica na madeira foram estatisticamente significativos para o seu desempenho e que a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira estabeleceu relação linear com a sua resistência mecânica. Foi realizada também a investigação da secagem da madeira com efeitos localizados sobre a superfície de adesão da ligação proposta. A metodologia aplicada foi dada como eficaz, devido aos resultados de resistência mecânica ao arrancamento que equivaleram ao da madeira em umidade de equilíbrio.

Partel (2006) avaliou a possibilidade de utilizar peças de madeira roliça de pequeno diâmetro para a produção de painéis estruturais para a vedação de habitações sociais. Na fase experimental do estudo foram feitas análises e aperfeiçoamentos sucessivos das seguintes variáveis: facilidade de produção, volume de resíduos gerados no processamento, custos e facilidade de montagem do painel. Os critérios para a avaliação do desempenho técnico foram: estrutural, estanqueidade visual e durabilidade. A sustentabilidade ambiental foi avaliada pelo uso de materiais de fontes renováveis, baixo consumo energético, redução de resíduos gerados. E a sustentabilidade econômica foi avaliada pela facilidade de produção, facilidade de montagem,

produção em escala e baixos custos dos materiais empregados. Para a proposição do produto foram desenvolvidos e avaliados 10 projetos segundo os critérios mencionados. A autora concluiu que a proposta se mostrou viável e constatou a facilidade de execução do produto, mesmo em situação precária de maquinário. Este painel desenvolvido representa uma oportunidade de redução do tempo de execução e dos custos de produtos que atendam à demanda do setor da habitação de baixa renda, melhorando as condições de moradia e colaborando com a redução de impactos negativos ao meio ambiente pela construção civil.

Marcolin (2017), devido à insuficiência da norma brasileira para projetos de estruturas de madeira, utilizou normas internacionais atuais para propor classes de resistência de peças estruturais de *Eucalyptus urograndis* através da determinação das propriedades físicas e mecânicas desta espécie. A amostra utilizada pelo autor foi de 1142 peças estruturais provenientes de uma indústria brasileira de florestas plantadas, as quais foram submetidas aos seguintes ensaios: densidade aparente, densidade básica, estabilidade dimensional, módulo de elasticidade à flexão, módulo de resistência à flexão, módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. A partir dos resultados obtidos, o autor definiu a tabela de classe de resistência com 6 classes, na condição de referência de umidade a 12%. Comparando os valores obtidos ao código normativo europeu EN 338 (2005) verificou-se diferenças significativas, exceto pela resistência ao cisalhamento. O autor atribui esta diferença as regiões de climas diferentes, que produzem um material diferente, além do fato do estudo tratar apenas de uma espécie, enquanto o código europeu aborda um conjunto maior de espécies.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Sendo o objetivo principal deste estudo analisar o comportamento mecânico da ligação entre a madeira roliça e pino metálico, buscando melhor compreendê-lo e possibilitar a sua aplicação de maneira mais eficiente, o presente trabalho pode ser classificado como uma pesquisa exploratória. Segundo Gil (2002), esta classe de pesquisa objetiva “proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipótese”.

Quanto ao delineamento desta pesquisa, de acordo com o autor, pode ser considerada como bibliográfica e experimental. O uso de referências, como livros, teses, dissertações e publicações periódicas, como no caso deste estudo, possibilitam a análise de diversas posições e resultados acerca do assunto estudado; caracterizando-a como uma pesquisa bibliográfica (GIL, 2002). Ainda segundo o autor, esta pesquisa também é experimental, pois considera diversas variáveis associadas ao fato estudado e as analisam de forma a compreender a sua influência sobre ele.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

As seis toras de madeira da espécie *Eucalyptus grandis* foram adquiridas de um fornecedor local de madeira roliça tratada. Por pedido do autor deste trabalho, foram adquiridas as toras sem tratamento, pois julgou-se irrelevante à pesquisa. As toras adquiridas possuíam diâmetro entre 8 a 15 cm, com comprimento aproximado de 4 m. Também foram adquiridas nove barras roscadas em aço de baixo carbono, polidas e zincadas, com 3/8” e 1 m de comprimento cada, junto com 5 pares de arruela e porca.

Os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- Máquina universal de ensaio EMIC;
- Serra de bancada;
- Serra esquadrejadeira;
- Arco de serra;

- Plaina desempenadeira;
- Furadeira de bancada;
- Furadeira manual;
- Barras de aço com furos nas extremidades;
- Perfil de aço em formato U;
- Barras roscadas, arruelas e porcas de diâmetro 12 mm;
- Balança digital com precisão de 0,01 g;
- Estufa de calor a $102^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$;
- Paquímetro de leitura visual com precisão de 0,1mm.

3.2 AMOSTRAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

De cada uma das seis toras de madeira adquiridas foram retiradas 12 peças de 25 cm para os ensaios das ligações, excluindo-se os 30 cm das extremidades, conforme indica a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Totalizando assim 72 peças para a montagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de ligação. Cada corpo de prova foi composto de 3 peças de 25 cm, combinadas de forma a formar duas seções de corte na ligação, possibilitando a confecção de 24 corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova para os ensaios de caracterização da madeira foram retirados da parte central de cada uma das toras de madeira, retirando uma amostra para cada ensaio a ser realizado. Desta forma, foram retirados 6 corpos-de-prova padronizados de cada ensaio, quantidade mínima indicada pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Retirando estes corpos-de-prova da parte central de cada tora de madeira, torna-se possível separar as peças para os ensaios de ligação em dois lotes, originados de cada um dos seus lados. A identificação destas peças foi feita por letras do alfabeto seguidos pelo número designados à tora de onde foram retiradas, facilitando assim o controle da posterior montagem dos corpos-de-prova dos ensaios de ligação. A Figura 34 exemplifica a amostragem realizada nas toras de madeira.

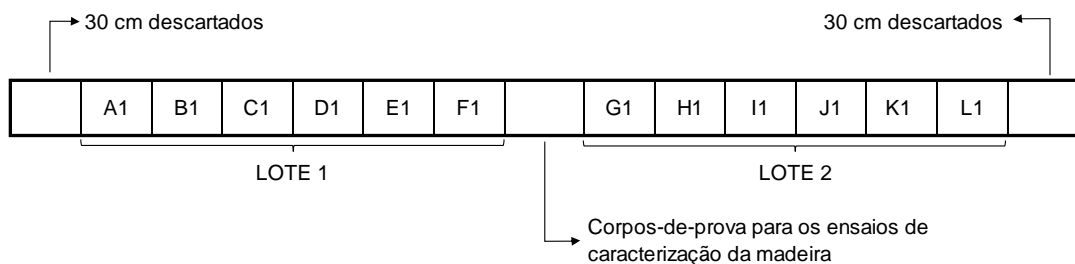


Figura 34: Esquema de amostragem dos corpos-de-prova dos ensaios realizados
Fonte: Autoria própria.

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Com o auxílio da plaina desempenadeira e serra esquadrejadeira foi possível realizar a extração dos corpos-de-prova nas dimensões desejadas. A Figura 35 mostra estes processos.

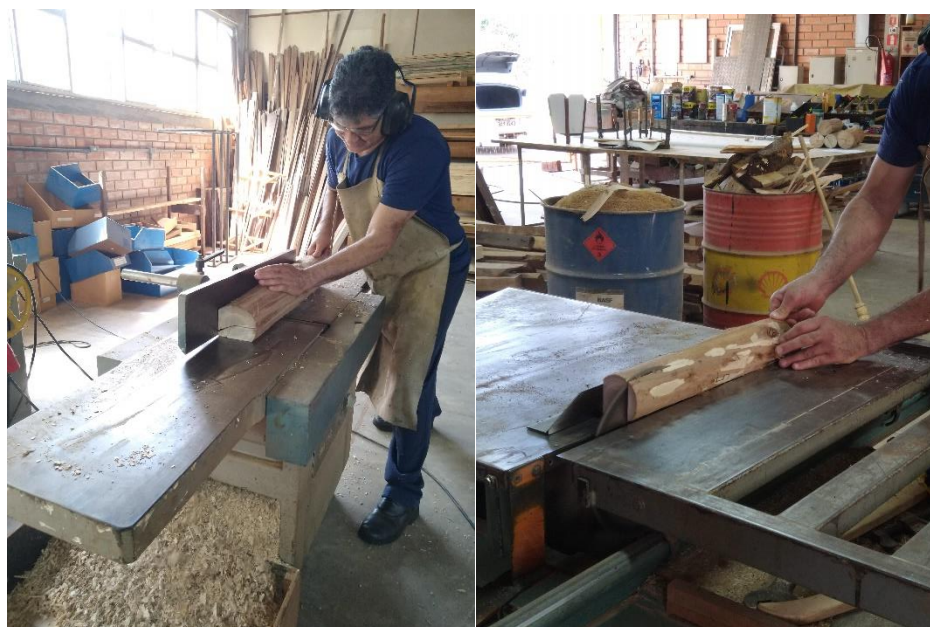


Figura 35: Preparação dos corpos-de-prova dos ensaios de caracterização a partir peças centrais das toras de madeira
Fonte: Autoria própria (2019).

3.3.1 Teor de Umidade

O item B.5 na NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) define a metodologia do ensaio para determinar o teor de

umidade do lote de madeira, com corpos-de-prova de seção transversal retangular, com dimensões 2 x 3 cm e comprimento 5 cm ao longo das fibras. O teor de umidade (U) de cada corpo de prova é calculada através da Equação 30.

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \quad (30)$$

Onde m_i é a massa inicial da madeira e m_s a massa seca da madeira, ambas em gramas. A massa seca deve ser obtida através da secagem do lote em câmara de secagem, em temperatura $102^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, realizando a medição da massa a cada 6 horas até que a diferença entre as massas obtidas seja inferior ou igual a 0,5% em relação a medida anterior. As massas devem ser obtidas com precisão de 0,01g. O resultado deve ser apresentado através do valor médio obtido do lote.

3.3.2 Densidade Básica

O ensaio para a obtenção da densidade básica é descrito pelo item B.6. da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Os corpos-de-prova para estes ensaios seguem o mesmo padrão do ensaio de umidade. A densidade básica (ρ_{bas}) de cada corpo de prova é calculada pela Equação 31.

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (31)$$

Em que m_s é a massa seca da madeira e V_{sat} é o volume saturado da madeira. A massa seca é obtida pela mesma metodologia do ensaio de umidade, apresentado anteriormente. O volume saturado é determinado pela medição das dimensões dos corpos-de-prova após deixá-los submersos em água até que a variação da massa fique constante ou apresente variação inferior ou igual a 0,5%, assim como na determinação da massa seca. O resultado deve ser apresentado pelo valor médio da densidade do lote.

3.3.3 Resistência à Compressão Paralela às Fibras

Os procedimentos para determinação da compressão paralela às fibras são fornecidos pelo item B.8 da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Os corpos-de-prova apresentam seção transversal quadrada de dimensões 5 x 5 cm, com comprimento 15 cm ao longo das fibras. A resistência de compressão paralela (f_{c0}) de cada corpo de prova é dada pela razão (Equação 32) entre a máxima força aplicada ($F_{c0,máx}$) ao corpo de prova e a área inicial da seção comprimida (A).

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (32)$$

O mesmo item da norma brasileira traz as instruções para a determinação da rigidez da madeira na direção paralela às fibras. Esta é determinada pelo módulo de elasticidade da madeira, obtido pelo trecho linear do diagrama tensão x deformação. Ou seja, pela inclinação da reta secante a curva do diagrama tensão x deformação.

As medidas das dimensões do corpo de prova devem ser realizadas com precisão de 0,1mm. O carregamento durante o ensaio deve ser realizado de forma monotônica crescente, a uma taxa de 10 MPa/min, aproximadamente. A apresentação dos resultados deve ser feita em valores de resistência característica, acompanhado pela umidade dos corpos-de-prova.

3.4 ENSAIO DE LIGAÇÃO POR PINO METÁLICO

A extração das peças de madeira que formariam os corpos-de-prova dos ensaios de ligação foi realizada no canteiro de obras do bloco do Departamento Acadêmico de Construção Civil da UTFPR, Câmpus Pato Branco. Este processo foi realizado com a serra de bancada.

3.4.1 Método de Ensaio das Ligações

Os métodos de ensaio para a determinação direta da resistência de ligações mecânicas, como a de ligação por pinos, são indicados pelo Anexo C NBR 7190/97. No entanto, ligações com peças roliças não são tratadas pela norma brasileira.

A resistência da ligação é definida como a força aplicada ao corpo de prova padronizado que provoca a deformação específica residual de 2‰ na ligação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Esta deformação específica residual é medida a partir da interseção com o eixo das deformações da reta secante, necessitando assim das informações do diagrama força x deformação específica. A deformação específica por sua vez é definida pela razão entre o deslocamento relativo e o comprimento da base de medida padronizada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Considerando que o principal objetivo deste trabalho era observar os mecanismos de ruptura de ligações entre peças de madeira roliça, e que o dispositivo de ensaio concebido e as condições do Laboratório de Materiais da UTFPR Câmpus Pato Branco não possibilitaram a obtenção dos dados referentes ao deslocamento relativo entre as peças das ligações, não foi possível obter as propriedades mecânicas de resistência e rigidez das ligações, conforme definido no anexo C da NBR 7190/97.

3.4.2 Montagem dos Corpos-de-Prova

Cada corpo de prova foi formado por três peças de madeira, criando assim duas seções de corte na ligação a ser ensaiada. A barra roscada foi fixada a 6 cm das extremidades de cada uma das peças, realizando os furos através da furadeira de bancada e furadeira manual, ambas utilizando uma broca de 10 mm.

As peças de madeira que compõem cada um dos corpos-de-prova foram selecionadas pelo seu diâmetro médio. Desta forma, cada corpo de prova representaria a ligação de uma faixa de diâmetro médio da madeira, possibilitando a posterior análise da resistência em relação a cada diâmetro.

A combinação entre as peças foi feita dentro de cada um dos lotes, sendo o lote 1 destinado para os ensaios dos corpos-de-prova com as peças conectadas com os eixos transversais em paralelo (ligação paralela) e o lote 2 para os corpos de prova com a peça interna conectada com os eixos transversais perpendicular (ligação normal).

As barras roscadas foram cortadas manualmente com um arco de serra e o comprimento de cada uma foi definido de acordo com a necessidade de cada corpo de prova, uma vez que seu comprimento é diretamente influenciado pela largura final das combinações das peças de madeira.

Com as peças de madeira furadas e as barras roscadas cortadas, foi realizada a montagem dos corpos de prova passando as barras manualmente através dos furos.

3.4.3 Ensaios Experimentais da Ligação Paralela

Foi necessário desenvolver um dispositivo para ser acoplado à Máquina Universal de Ensaios, de modo a permitir a fixação dos corpos-de-prova para ensaio das ligações.

Com o objetivo de realizar testes iniciais no dispositivo concebido, foram realizadas duas baterias iniciais de ensaios simulando a ligação paralela. A primeira delas foi realizada com corpos-de-prova prismáticos, com as mesmas dimensões dos corpos-de-prova usados nos ensaios de compressão paralela às fibras (Figura 36).



Figura 36: Detalhes do primeiro ensaio experimental da ligação paralela
Fonte: Autoria própria (2019).

Os resultados apresentados por este primeiro ensaio trouxeram algumas melhorias para o dispositivo:

- A barra utilizada para a fixação da peça de madeira central à máquina flexionou, mostrando a necessidade de utilizar uma barra mais rígida;
- As barras de aço menores responsáveis pela fixação das peças de madeira externas à barra de aço maior conectada à máquina também flexionaram, necessitando assim de peças mais rígidas.

Para contornar estes obstáculos, foi decidido utilizar uma peça de aço CA-50 para fixação da peça central e dobrar a quantidade das barras que fixam as peças externas.

No segundo ensaio experimental da ligação paralela, além dessas alterações, foram utilizadas peças de madeira roliça, empregando-se as peças das extremidades das toras de madeira que seriam descartadas, possibilitando assim uma simulação mais próxima à realidade dos ensaios da ligação paralela com os corpos-de-prova confeccionados. Este segundo ensaio é mostrado na Figura 37.



Figura 37: Detalhes do segundo ensaio experimental da ligação paralela
Fonte: Autoria própria (2019).

Esse ensaio mostrou-se mais satisfatório que o anterior, porém apresentou algumas deficiências também. A barra de aço que fixava a peça central de madeira flexionou novamente, assim como a barra de aço maior conectada à máquina. Ainda, verificou-se que o corpo de prova experimental rotacionou no eixo de aplicação da carga devido à geometria das peças, que não eram retilíneas em seu comprimento longitudinal e suas extremidades em contato com as barras de aço menores também não foram regularizadas.

A partir destes resultados, decidiu-se por utilizar novamente esse mesmo modelo de dispositivo nos corpos-de-prova confeccionados para os ensaios de ligação paralela, uma vez que estes corpos de prova apresentavam condições mais favoráveis.

No entanto, foi levantado um segundo modelo de ensaio no qual a peça central ficaria invertida, ou seja, conectada à máquina pela peça interna, enquanto as peças externas seriam conectadas à máquina na própria estrutura dela através de cabos de aço. Estes cabos de aço seriam passados através de furos nas extremidades das peças de madeira externas, de tal forma que “pendurassem” o corpo de prova na máquina. Assim as chances do corpo de

prova rotacionar, como no segundo ensaio experimental, diminuiriam e possibilitaria a análise mais precisa da capacidade de carga e modo de ruptura da ligação em estudo.

Para possibilitar a passagem dos cabos de aço nas peças laterais da madeira, foram feitos furos com uma broca de 12 mm a 6 cm da extremidade de cada uma das peças. Assim o corpo de prova ficou com a configuração mostrada pela Figura 38.



Figura 38: Configuração final dos corpos de prova presos por cabos de aço para os ensaios de ligação paralela
Fonte: Autoria própria (2019).

3.4.4 Método de Ensaio da Ligação Normal

O corpo de prova utilizado para os ensaios da ligação normal tem a peça de madeira interna deitada, ou seja, com a direção das fibras da madeira perpendicular ao eixo de aplicação da carga.

Para o dispositivo utilizado nos ensaios de ligação normal foi feita uma mesclagem entre o dispositivo utilizado nos ensaios de validação (Figura 36 e 37) e o dispositivo dos ensaios da ligação paralela (Figura 38), resultado no dispositivo indicado pela Figura 39.



Figura 39: Configuração final dos corpos de prova presos por cabos de aço para os ensaios de ligação normal.

Os cabos de aço também foram utilizados para fixar as peças de madeira externas à máquina, mas a peça interna foi fixada através de barras e parafusos em suas extremidades.

4 RESULTADOS

Os resultados dos ensaios descritos anteriormente, realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, serão apresentados neste capítulo.

4.1 ENSAIO DE UMIDADE

O ensaio para a determinação do teor de umidade ocorreu conforme descrito na página 66. Os valores encontrados para a massa inicial, massa seca e teor de umidade de cada corpo de prova são apresentados na Tabela 6, assim como o teor de umidade médio.

Tabela 6: Resultados do Ensaio de Teor de Umidade

CP	Massa Inicial (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)
1	27,12	17,05	59,06%
2	24,23	17,02	42,36%
3	17,97	12,37	45,27%
4	22,46	16,00	40,38%
5	23,19	18,31	26,65%
6	25,33	15,21	66,54%
Média			43,82%

Fonte: Autoria própria (2020).

Como todas as amostras apresentaram um teor de umidade acima de 25%, todo o lote pode ser considerado como de Classe de Umidade 4, segundo a norma de projetos de estruturas em madeira. Para umidades acima de 20%, a norma permite admitir que a resistência e a rigidez da madeira sofram pequenas variações, como é o caso das amostras ensaiadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

4.2 ENSAIO DE DENSIDADE BÁSICA

O ensaio para a determinação da densidade básica ocorreu conforme descrito na página 67. Os valores encontrados para a massa seca, massa saturada, volume saturado e densidade básica de cada corpo de prova são apresentados na Tabela 7, assim como a densidade básica média.

Tabela 7: Resultados do Ensaio de Densidade Básica

CP	Massa seca (g)	Volume Saturado (m ³)	Densidade Básica (kg/m ³)
1	16,86	3,160E-05	533,599
2	16,99	4,846E-05	350,570
3	11,19	3,264E-05	342,790
4	15,91	4,613E-05	344,898
5	17,91	3,433E-05	521,726
6	15,46	3,481E-05	444,177
Média			397,374

Fonte: Autoria própria (2020).

A densidade básica média de 397,37 kg/m³ foi inferior ao valor mínimo encontrado entre sete espécies diferentes de Eucalipto, 490 kg/m³. Mas algumas das amostras estavam dentro do intervalo cujo valor máximo é de 730 kg/m³ (OLIVEIRA, J. T. S. et al., 2005). Em comparação ao valor de densidade básica catalogada (420 kg/m³), a densidade básica média também é inferior (IPT, 2020).

4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

O ensaio de compressão paralela às fibras ocorreu conforme descrito na página 68. Os valores encontrados para as dimensões, força máxima aplicada e tensão em cada corpo de prova são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Paralela às Fibras

CP	Lado 1 (mm)	Lado 2 (mm)	Força máxima aplicada (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
1	50,50	50,65	8688,47	33,97
2	50,60	50,00	8428,73	33,32
3	50,15	50,20	6785,77	26,95
4	50,35	50,55	8101,77	31,83
5	50,35	50,35	8219,922	32,42
6	50,40	50,35	8250,48	32,51
Média				32,47
Desvio Padrão				2,29
C.V.				7,04%

Fonte: Autoria própria (2020).

Este ensaio buscou caracterizar a madeira apenas em relação a sua capacidade resistente, não obtendo a rigidez da mesma.

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), os resultados de resistência características em investigações experimentais com umidades diferentes de 12%, dentro do intervalo de 10% a 20%, os resultados devem ser apresentados com os valores corrigidos para o teor de umidade referencial. Conforme podemos observar nos valores da Tabela 6, o teor de umidade encontrado para todos os corpos-de-prova está acima do intervalo indicado. Não sendo necessário a correção para o valor de referência.

O ensaio apresentou um coeficiente de variação de 7,04%, valor abaixo do coeficiente de variação para resistências a solicitações normais de 18%, conforme indicado pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

O IPT (2020) apresenta o valor de 26,30 MPa para a resistência à compressão paralela às fibras da madeira verde de *Eucalyptus grandis*, um valor inferior encontrado pela densidade básica média dos ensaios.

4.4 ENSAIOS DAS LIGAÇÕES

Durante a realização dos ensaios das ligações notou-se o aparecimento de rachaduras em algumas peças cortadas, devido às tensões internas comuns

ao eucalipto, salientando que o teor de umidade da madeira era elevado. Como consequência, o número de CPs teve que ser reduzido, utilizando-se apenas as peças que se mostravam em boas condições de forma a obter resultados mais consistentes. Assim, foram ensaiados nove corpos-de-prova para cada direção das fibras da madeira em relação ao eixo da carga.

4.4.1 Ligações Paralelas

No primeiro ensaio das ligações paralelas, realizado com o CP-01, foi utilizado o dispositivo conforme a Figura 37. Durante o segundo ensaio experimental, o corpo de prova utilizado apresentou uma rotação em relação ao eixo de carga, mas considerando que isto foi uma consequência da geometria das peças e extremidades sem acabamento, optou-se por testar esta configuração em um corpo de prova com acabamento e retilíneo.

No entanto verificou-se que o corpo de prova não estava suficientemente fixo, apresentando rotação das peças externas de madeira no eixo perpendicular ao eixo da máquina de ensaios. Portanto, para os demais ensaios, foram utilizados cabos de aço para fixar as peças externas à máquina e inverteu-se o corpo de prova em relação à sua posição anterior. Esta configuração foi apresentada na Figura 38.

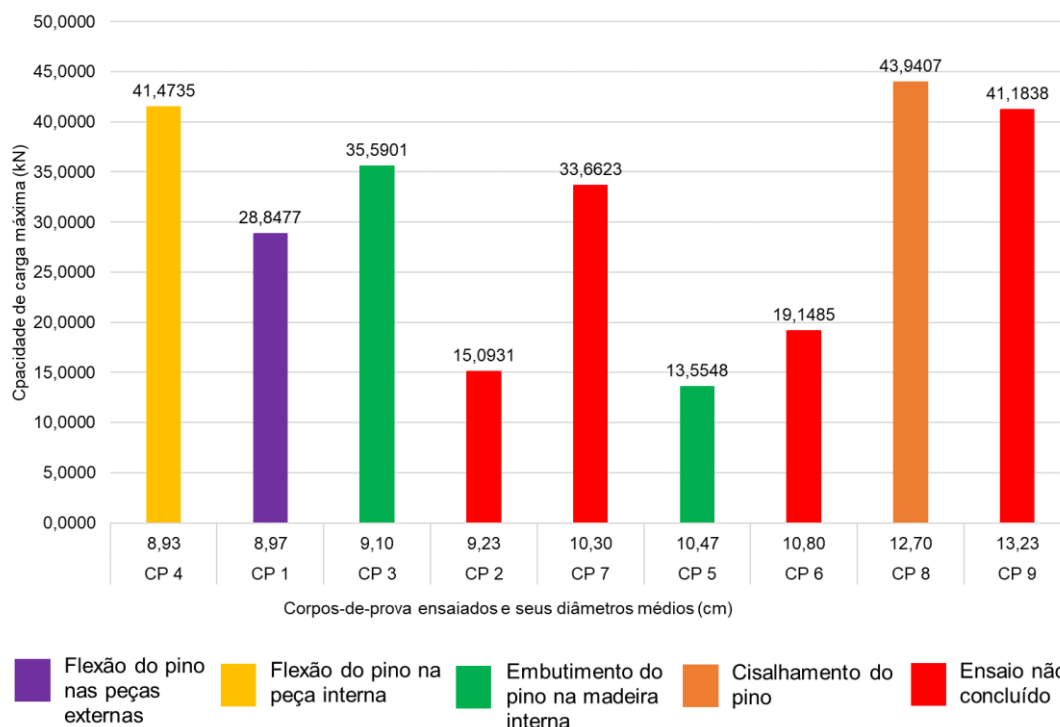
Nestes ensaios observou-se os seguintes modos de ruptura: a flexão do pino nas peças de madeira externas (Figura 40-a), flexão do pino na peça de madeira interna (Figura 40-b), embutimento do pino na peça de madeira interna (Figura 40-c) e cisalhamento do pino (Figura 40-d).

Os ensaios dos corpos de prova 02, 06, 07 e 09 não foram concluídos devido à perda de capacidade portante das ligações na fixação com o dispositivo, ocorrendo o rompimento do cabo de aço, cisalhamento da madeira na fixação com o cabo de aço (Figura 40-e) e com o pino de fixação (Figura 40-f). A Figura 40 identifica os modos de ruptura observados e as falhas dos ensaios não concluídos.



Figura 40: Ensaio de ligação paralela às fibras
Fonte: Autoria própria (2019).

A capacidade de carga máxima registrada por cada corpo de prova nos ensaios e o diâmetro médio das peças que o compõem, estão indicados no Gráfico 1.

Gráfico 1: Capacidade de carga máxima registrada nos ensaios de ligação paralela

Fonte: Autoria própria (2020).

Nestes ensaios a maior capacidade de carga máxima registrada foi de 43,94 kN, suportado pelo CP-08 que apresentou uma média de 12,70 cm de diâmetro entre as peças que o compunham. O modo de ruptura observado foi por cisalhamento do pino.

A menor capacidade de carga registrada foi de 13,55 kN suportado pelo CP-05 que apresentou uma média de 10,47 cm de diâmetro entre as suas peças e rompeu através do embutimento do pino na madeira interna.

Analisando os valores de carga registrado pelos CPs, observa-se uma inconsistência dos resultados, impossibilitando uma relação direta com o diâmetro média das peças ou com os modos de ruptura observado devido à grande variação de resultados. A Tabela 9 apresenta o resumo comentado de cada um dos ensaios da ligação paralela.

Tabela 9: Resumo do Ensaio das Ligações Paralelas

Corpo de prova	Carga máxima registrada (N)	Peça 1 Diâmetro (cm)	Peça 2 Diâmetro (cm)	Peça 3 Diâmetro (cm)	Diâmetro médio (cm)	Modo de ruptura observado	Discussão
CP1	28847,65	A4	B4	A5	8,97	Flexão do pino nas peças externas	Peças com os menores teores de umidade: 26,65% e 40,38%
		8,80	9,10	9,00			A instabilidade do CP prejudicou o andamento do ensaio que poderia ter atingido uma carga maior
CP2	15093,08	E5	F4	D4	9,23	Ensaio não concluído	Peças com os menores teores de umidade: 26,65% e 40,38%
		8,60	9,80	9,30			Apesar da flexão do pino ter ocorrido, poderia ter resistido mais caso o cabo de aço não tivesse rompido. Problema na instalação
CP3	35590,09	C5	F5	E4	9,10	Embutimento do pino na madeira interna	Peças com os menores teores de umidade: 26,65% e 40,38%
		8,70	9,20	9,40			A flexão do pino nas peças externas também ocorreu, mas a ruptura se deu pelo embutimento da madeira na peça interna (E4)
CP4	41473,49	C4	D5	B5	8,93	Flexão do pino na peça interna	Peças com os menores teores de umidade: 26,65% e 40,38%
		9,40	8,60	8,80			A peça interna (D5) estava resistindo bem a flexão do pino, mas a ruptura ocorreu pelo embutimento da madeira na fixação à máquina nas peças externas através dos cabos de aço
CP5	13554,80	E6	F6	F3	10,47	Embutimento do pino na madeira interna	Peças com os teores de umidade acima da média: 45,27% e 66,54%
		10,50	10,40	10,50			Apesar do diâmetro médio grande, as peças estavam úmidas e a peça interna (F3) apresentou a menor densidade básica na caracterização (342,79 kg/m³)
CP6	19148,53	C3	D3	B6	10,80	Ensaio não concluído	Peças com os teores de umidade acima da média: 45,27% e 66,54%
		10,70	10,60	11,10			As peças externas eram da tora com a menor densidade básica (342,79 kg/m³) e não resistiram à carga aplicada
CP7	33662,25	A6	B4	D6	10,30	Ensaio não concluído	Peças com teor de umidade acima da média: 40,38% e 66,54%
		11,00	9,10	10,80			A peça interna apresentava a menor densidade básica, maior teor de umidade e menor diâmetro. O valor alto de carga foi atingido pela ligação, mas a fixação não foi suficiente
CP8	43940,73	C6	E2	F2	12,70	Cisalhamento do pino	Peças com teor de umidade alta: 40,38% e 66,54%
		12,00	12,50	13,60			Foi observado a flexão do pino nas peças de madeira externas (E2 e F2), com maiores diâmetros e menor teor de umidade do que a peça interna. Um valor alto de carga foi atingido, mas o pino não resistiu, cisalhando no plano de corte
CP9	41183,82	A2	C2	D2	13,23	Ensaio não concluído	teor de umidade: 42,36%, densidade baixa: 350,57
		13,00	13,10	13,60			O valor alto de carga foi atingido pela ligação, mas a fixação não foi suficiente

Fonte: Autoria própria (2020).

Durante o ensaio do CP-01 foi observado a flexão do pino nas peças de madeira externas, mas a instabilidade do corpo de prova prejudicou o andamento do ensaio, que poderia ter atingido uma carga maior.

A flexão do pino na peça de madeira interna foi observada no CP-04, que alcançou o segundo maior valor de carga máxima. Porém o ensaio foi encerrado devido a ruptura da peça de madeira na fixação com o à máquina de ensaios através dos cabos de aço.

O embutimento do pino na madeira interna foi o modo de ruptura que mais ocorreu nos ensaios de ligação paralela (CP-03 e 05). Em ambos ensaios se observou a flexão do pino, mas o embutimento do pino foi a causa do fim de ensaio. A peça interna do CP-03 foi retirado da tora de madeira 4, que apresentou maior teor de umidade (40,38%), menor densidade básica (344,89 kg/m³) e resistência à compressão paralela às fibras (31,83 MPa) do que as peças de madeira externas, que foram retiradas da tora de madeira 5 (26,65 %; 521,89 kg/m³; 32,42MPa). Situação semelhante ocorreu no CP-05, em que a peça interna era representada pelas amostras 3 (45,27%; 342,79 kg/m³; 26,95 MPa) e as externas pelas amostras 6 (66,54%; 444,17 kg/m³; 32,51 MPa).

O cisalhamento do pino ocorreu no CP-08, que também registrou o maior valor de carga dos ensaios de ligação paralela, 43.94 kN. Durante o ensaio foi observada a flexão do pino nas peças de madeira externas (E2 e F2), com maiores diâmetros e menor teor de umidade do que a peça interna (C6), mas quando um valor alto de carga foi atingido, o pino metálico não resistiu e cisalhou em um dos planos de corte.

4.4.2 Ligações Normais

Nestes ensaios foram utilizadas a configuração do dispositivo conforme a Figura 39.

Os modos de ruptura observados foram a flexão do pino na peça de madeira interna (Figura 41-a), embutimento do pino na peça de madeira interna (Figura 41-c) e embutimento do pino nas peças de madeira externas (Figura 41-d).

Os ensaios dos corpos de prova 13, 20 e 21 não foram concluídos devido à perda de capacidade portante das ligações na fixação com o dispositivo, ocorrendo a rotação do corpo de prova (Figura 41-e) e cisalhamento da madeira

na fixação com o cabo de aço (Figura 41-f). A Figura 41 identifica os modos de ruptura observados e as falhas dos ensaios não concluídos.

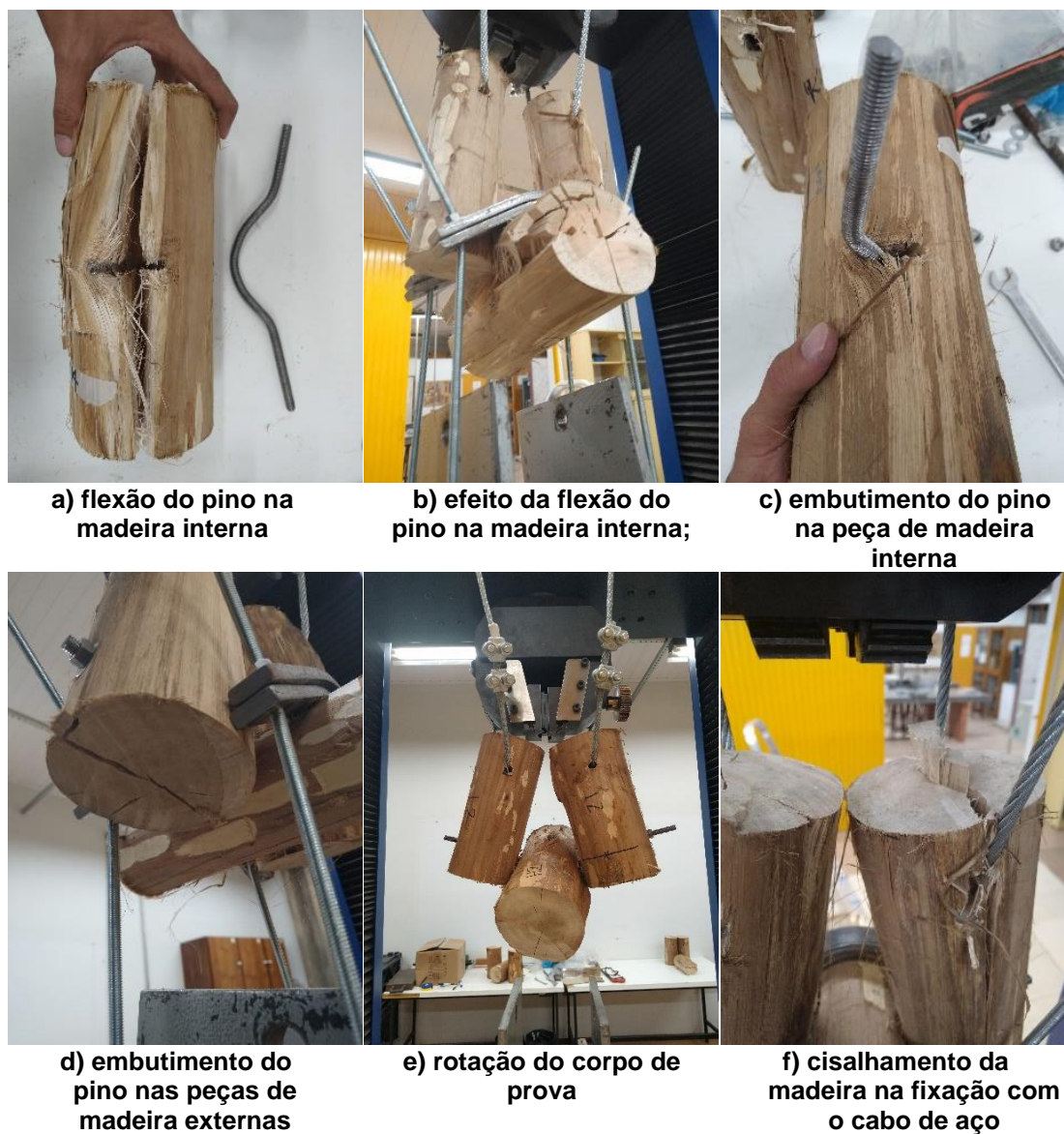
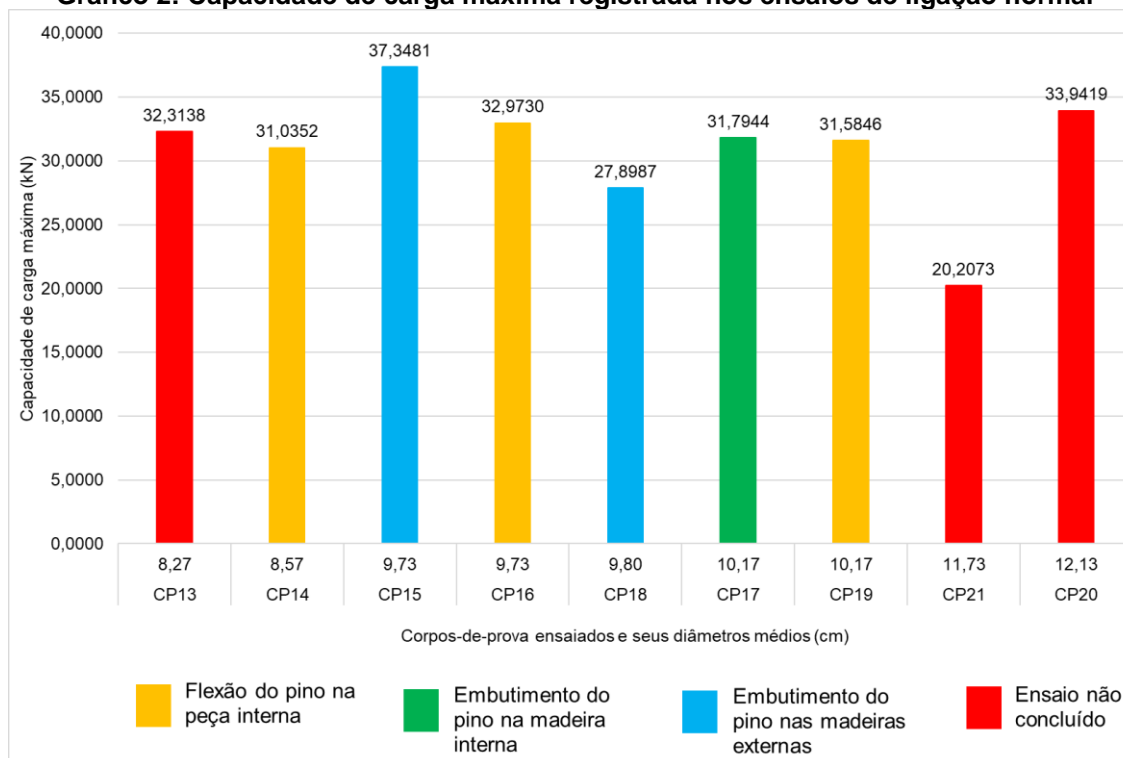


Figura 41: Ensaios de ligação normal às fibras

Fonte: Autoria própria (2019).

A capacidade de carga máxima registrada nos ensaios da ligação normal e o diâmetro médio das peças de cada corpo de prova ensaiado estão indicados no Gráfico 2.

Gráfico 2: Capacidade de carga máxima registrada nos ensaios de ligação normal

Fonte: Autoria própria (2019).

Para a ligação normal, a maior capacidade de carga máxima registrada foi de 37,34 kN no CP-14, com um diâmetro médio entre as peças de 9,73 cm que rompeu pela flexão do pino na peça interna de madeira.

A menor capacidade de carga registrada foi de 27,89 kN suportado pelo CP-18 que apresentou uma média de 9,80 cm de diâmetro entre as suas peças e rompeu através do embutimento do pino na madeira interna.

Os ensaios da ligação normal apresentaram maior consistência nos seus resultados, registrando uma menor variação de capacidade de carga comparada aos ensaios da ligação paralela. No entanto, ainda não é possível obter uma relação direta desses valores com o diâmetro médio das peças e modos de ruptura. Nota-se que o CP-14 e o CP-18 apresentavam valores similares de diâmetro médio entre as peças e ainda assim representam os extremos dos valores de carga máxima registrada. A Tabela 10 apresenta o resumo dos ensaios de ligação normal e observações individuais de cada corpo de prova.

Tabela 10: Resumo do Ensaio das Ligações Normais

Corpo de prova	Carga máxima registrada (N)	Peça 1 Diâmetro (cm)	Peça 2 Diâmetro (cm)	Peça 3 Diâmetro (cm)	Diâmetro médio (cm)	Modo de ruptura observado	Discussão
CP13	32313,77	K5	L5	G4	8,27	Ensaio não concluído	Peças com os menores teores de umidade: 26,65% e 40,38%
		7,80	7,40	9,60			Carga alta atingida pela ligação, fixação não foi suficiente, pois o ensaio encerrou com o cisalhamento da madeira na fixação
CP14	31035,20	G5	K3	J5	8,57	Flexão do pino na peça interna	A peça que colapsou (K3) apresentava a menor densidade e maior teor de umidade entre as peças do CP, não resistindo ao efeito da flexão do pino
		8,40	9,40	7,90			
CP15	37348,12	I4	J4	H5	9,73	Embutimento do pino na madeira externa	O embutimento ocorreu na peça I4, com maior umidade e menor densidade do que peça central (H5)
		10,50	10,50	8,20			A ligação atingiu uma alta carga, mas a fixação das peças externas (da tora 4) não suportaram a carga
CP16	32973,03	K6	L6	L3	9,73	Flexão do pino na peça interna	A peça que colapsou (L3) apresentava menor densidade entre as peças do CP, não resistindo ao efeito da flexão do pino
		10,10	9,60	9,50			
CP17	31794,35	H6	J6	K4	10,17	Embutimento do pino na peça de madeira interna	A peça que apresentou fendilhamento (K4) tinha menor densidade entre as peças do CP, não resistindo a uma carga alta da ligação
		10,10	9,80	10,60			
CP18	27898,72	L4	H6	I5	9,80	Embutimento do pino na peça de madeira externa	As peças externas (L4 e H6) apresentavam maior teor de umidade e menor densidade básica do que a madeira interna, sofrendo embutimento e fendilhamento com o aumento da resistência, apesar dos diâmetros serem maiores
		10,50	10,20	8,70			
CP19	31584,58	G6	J3	I6	10,17	Flexão do pino na peça interna	A peça que colapsou (J3) apresentava menor densidade entre as peças do CP, não resistindo ao efeito da flexão do pino
		10,20	10,00	10,30			
CP20	33941,94	H2	L2	I2	12,13	Ensaio não concluído	As peças tinham teor de umidade baixo (42,36%), densidade básica abaixo da média (350,57%) e CP com maior diâmetro médio. Alcançou uma carga alta, mas problemas com fixação interromperam o ensaio
		12,10	11,20	13,10			
CP21	20207,34	G2	K2	J2	11,73	Ensaio não concluído	O CP rotacionou durante o ensaio e impossibilitou a conclusão, mas foi possível observar a flexão do pino na madeira interna, o que causou o esmagamento das peças
		12,00	11,30	11,90			

Fonte: Autoria própria (2020).

A flexão do pino metálico na peça interna foi observada nos corpos de prova 14, 16 e 19. Este foi o modo de ruptura com maior ocorrência e o seu efeito é mostrado pela Figura 41-b. Nos três corpos de prova a peça interna que colapsou havia sido retirada da tora de madeira 3, que apresentou teor de umidade de 45,27% e as menores densidade básica (342,79 kg/m³) e resistência à compressão paralela às fibras (26,95 MPa) entre as amostras. As demais peças do CP-14 eram da tora 5 (26,65%; 521,72 kg/m³; 32,42 MPa) e as peças do CP-16 e 19 eram da tora 6 (66,54%, 444,17kg/m³; 32,51 MPa).

No CP-17 foi observado o embutimento do pino metálico na peça de madeira interna, que foi retirada da tora de madeira 4 cuja densidade básica

(344,89 kg/m³) e resistência à compressão paralela às fibras (31,83 MPa) eram menores do que as demais peças (444,17 kg/m³ e 32,51 MPa). Também foi observada a flexão do pino metálico, mas o ensaio encerrou quando uma carga alta foi atingida e a madeira interna embutiu nos planos de corte.

O embutimento do pino nas peças de madeira externas, que ocorreram nos CP-15 e CP-18, representam a menor e maior carga registradas nos ensaios de ligações normais. No corpo de prova 15, o embutimento ocorreu na peça I4, retirada da tora de madeira 4, que apresentou maior umidade e menores densidade e resistência à compressão paralela às fibras do que a peça central (H5) nos ensaios de caracterização. No CP-18 ocorreu uma situação semelhante, em que as peças externas (L4 e H6) apresentavam maior teor de umidade, menores densidade básica densidade e resistência à compressão paralela às fibras do que a madeira interna (I5), sofrendo embutimento e fendilhamento com o aumento da resistência, apesar dos seus diâmetros serem superiores.

Nos corpos de prova 20 e 21, que apresentavam os maiores diâmetros médio entre os corpos de prova dos ensaios de ligação normal, ocorreu a rotação da peça de madeira interna em torno do eixo de aplicação da carga, o que impossibilitou a continuação dos ensaios. O ensaio do corpo de prova 13 foi finalizado devido ao cisalhamento das peças de madeira externas na fixação com o cabo de aço, mas a flexão do pino metálico também foi observada.

5 CONCLUSÕES

A madeira de reflorestamento vem apresentando um grande desenvolvimento em sua produção e sua importância para a sustentabilidade socioeconômica e ambiental é irrefutável. A madeira roliça como um elemento estrutural já é utilizada em projetos pequenos, mas é através da ampliação do seu conhecimento mecânico que este material poderá ser utilizado em projetos estruturais mais arrojados e de forma mais eficiente.

De acordo os valores de teor de umidade encontrados, a madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada para os ensaios faz parte da Classe de Umidade 4, indicada para ambientes com umidade relativa maior que 85% durante longos períodos. O valor de densidade básica média estava abaixo dos apresentados pelas referências para diversas espécies de eucalipto, inclusive da *Eucalyptus grandis*. Os valores da resistência à compressão paralela às fibras se assemelham aos valores catalogados, sendo superior ao valor de referência para sua espécie.

O dispositivo desenvolvido para os ensaios de ligações mostrou-se eficiente após adaptações que se tornaram necessárias após a realização dos ensaios de validação. Os cabos de aço tiveram um desempenho melhor do que as barras, que estavam sujeitas a flexão e a sua deformação prejudicou o andamento dos ensaios. Considerando a quantidade de ensaios não concluídos entre os ensaios de ligação paralela e normal, o dispositivo foi mais eficaz para o segundo ensaio.

Dentre as peças descartadas devido ao aparecimento de rachaduras, todas as peças da tora de madeira 1 foram descartadas. Considerando que a sua amostra apresentou o maior teor de umidade no ensaio de caracterização, fica evidente a importância da madeira em relação a sua umidade e a importância de um processo de secagem das peças.

A capacidade de carga máxima foi maior para os ensaios de ligação paralela, no entanto estes apresentaram maior variação nos resultados, enquanto os resultados dos ensaios de ligação normal foram mais consistentes. O valor máximo registrado nos ensaios de ligação paralela foi de 43,94 kN e o mínimo de 13,55 kN. Já nos ensaios de ligação normal, a carga máxima registrada foi de 37,34 kN e a mínima de 27,89 kN.

Em nenhum dos ensaios foi possível obter uma relação direta entre o diâmetro médio das peças que compunha os corpos de prova e a sua capacidade de carga máxima, o que pode ser atribuído à pequena quantidade de amostras e a variação dos diâmetros médios das peças que não foram tão significativos.

A flexão do pino foi observada em certo grau em todos os ensaios de ligações, e na maioria dos ensaios a flexão do pino na peça de madeira interna foi o modo de ruptura observado, ocorrendo em quatro ensaios.

O segundo modo de ruptura com maior ocorrência foi o embutimento do pino na peça de madeira interna, que ocorreu em três casos. A densidade básica da peça de madeira interna nestes ensaios era a menor entre as peças da ligação, justificando a sua ruptura.

O embutimento do pino nas peças de madeira externas ocorreu em dois ensaios, ambos da ligação normal. A característica que mais influenciou foi a densidade básica das peças, que eram menores nas peças externas que romperam.

A flexão do pino nas peças de madeira externas e o cisalhamento do pino ocorreram, cada um separadamente, em um ensaio. O cisalhamento ocorreu no ensaio que apresentou a maior carga registrada, no qual foi observada a flexão do pino na peça de madeira interna até que o pino não resistiu mais. A flexão do pino nas peças de madeira externas, foi observado no primeiro ensaio realizado, ainda com a configuração do dispositivo de ensaio para validação, apresentando certa instabilidade ao ensaio.

Sete ensaios não puderam ser concluídos devido às falhas apresentadas pelo dispositivo de ensaios ou na fixação do corpo de prova à máquina de ensaios. Apesar da sua maior eficácia nos ensaios de ligação normal, o dispositivo desenvolvido ainda necessita de adaptações para melhor testar a ligação em si, diminuindo o efeito da aplicação da carga sob a fixação do corpo de prova e possibilitando o estudo da rigidez e resistência da ligação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANA, R. A. A.; BOIN, M. N. **Reflorestamento com eucalipto, fonte alternativa de renda sustentável no pontal do Paranapanema**. Mercator, Fortaleza, v. 12, n. 28, p. 155-170, mai./ago. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 – Projeto de Estruturas em madeira**. Rio de Janeiro. 1997.

BAENA, J. S. **Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira**. 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **O setor florestal do Brasil e a importância do reflorestamento**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 16, p. 3-30, setembro, 2002.

BRASIL - Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. República Federativa do Brasil. 2015. Disponível em <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/ficha-pais/11915-contribuicao-brasil-indc-27-de-setembro>>. Acesso em 22/10/2019.

BRIANEZI, D. et al. **Balanco de carbono em monocultivo de eucalipto com diferentes arranjos espaciais**. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS), v.9, n.1, p.27-33, março, 2019.

BRITO, Leandro Dussarrat. **Recomendações para o projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. 2010. 339p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BRITTO L. D.; CALIL JR, C. **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 12, n. 56, p. 57-77, 2010.

CALIL JR, Carlito. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira** / Carlito Calil Júnior, Francisco Antonio Rocco Lahr, Antonio Alves Dias. - Barueri, SP: Manole, 2003.

CORDEIRO JR., et al. **O uso da madeira na construção civil**. Projectus, Rio de Janeiro, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017.

DE OLIVEIRA, Vitor Martim et al. **Adequação às normas e qualidade da madeira serrada para fins estruturais comercializada no distrito federal**. FLORESTA, v. 38, n. 3, 2008.

DI MAURO, Fabio J. P. **Madeira na construção civil: da ilegalidade à certificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

European Committee For Standardization. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures** – Parte 1 - 1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

FERREIRA, Pedro França; SILVA, Nara do Nascimento. **O sequestro de carbono de reflorestamento como solução para as emissões das usinas termoeletricas a gás natural**. Nara do Nascimento Silva e Pedro França Ferreira. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

GAMA, D. C.; JESUS, J. B. de.; BONFIM, J. S.; MENEZES, M. S.; DEUS, D. A. de. **Madeiras serradas empregadas na construção civil habitacional do município de Ribeira do Pombal – BA**. Agroforestalis News, v. 1, n. 2, p. 15-23, 2016.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas em Madeira: Notas de Aula**. Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~zacarias/Notas_de_Aula_Madeiras.pdf> 2003. Acessado em Setembro de 2019.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo. Atlas, 2002.

IBÁ - Indústria Brasileira De Árvores. **Relatório Ibá 2019**. Brasília, 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas**. 2020. <<https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/>> Acesso em 13 de agosto de 2020.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Informações sobre madeiras**. 2020. Disponível em < https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=12>. Acesso em 13 de agosto de 2020.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Madeira : uso sustentável na construção civil**. Geraldo José Zenid , coordenador . -- 2. ed. -- São Paulo : Instituto de Pesquisas Tecnológicas : SVMA, 2009. -- (Publicação IPT ; 3010).

JOHANSEN, K. W. Theory of timber connections. International association for bridge and structural engineering, Zurich, v.9, p.249-262, 1949.

MARCOLIN, L. A. **Proposição de classes de resistência para peças roliças perfiladas estruturais de *Eucalyptus urograndis***. 2017. 94 p. Dissertação (Mestrado em engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estrutura, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Protocolo de Quioto**. Disponível em <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>>. Acesso em 16/10/2019.

OLIVEIRA, J.T.S. et al. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto**. R. Árvore, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Conferência das Partes – vigésima primeira sessão**. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>>. Acesso em 22/10/2019.

PARTEL, P. M. P. **Painéis estruturais utilizando madeira roliça de pequeno diâmetro para habitação social: desenvolvimento do produto**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PETERS, James S. **Materiality and Location: A Geographic Study of Log Home Manufacturing**. 2015. Dissertação de doutorado, University of Massachusetts - Amherst. 340. Disponível em: <https://scholarworks.umass.edu/dissertations_2/340>. Acesso em 28/10/2019.

PFEIL, Walter. **Estruturas de madeira : dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americana NDS e européia EUROCODE 5** / Walter Pfeil, Michèle Pfeil. - 6.ed., rev. e ampl. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro : LTC, 2017.

Pioneer Log Homes of B.C. – **Homes Under Construction**. Disponível em <<https://www.pioneerloghomesofbc.com/galleries-videos/under-construction/nggallery/page/4>>. Acesso em 28/10/2019.

VALE, Clécio Magalhães do. **Ligações estruturais para madeira roliça de Eucalyptus de pequeno diâmetro**. 127 p. Tese de doutorado. Lavras, UFLA. 2011.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Estudo de elementos estruturais de madeira**. 2007. 70 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.