

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA
CAMPUS DE ITAPEVA

DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA

**ANÁLISE DAS RESISTÊNCIAS DE EMBUTIMENTO E DE
COMPRESSÃO PARA MADEIRAS DE PINUS E EUCALIPTO**

Itapeva - SP

2011

DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA

**ANÁLISE DAS RESISTÊNCIAS DE EMBUTIMENTO E DE
COMPRESSÃO PARA MADEIRAS DE PINUS E EUCALIPTO**

Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Cristiane Inácio de Campos

Itapeva - SP

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

A447a Almeida, Diego Henrique de
Análise das resistências de embutimento e de compressão para madeiras de pinus e eucalipto / Diego Henrique de Almeida. -- Itapeva, 2011.
271 f.; il.

Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial Madeireira apresentado ao Campus Experimental de Itapeva – UNESP, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina.

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristiane Inácio de Campos.

Banca examinadora: Prof. Dr. Cláudio De Conti, Prof.^a Dr.^a Elen Aparecida Martines Morales.

Inclui bibliografia

1. Madeira -- Estruturas. 2. Pinus taeda. 3. Eucalipto. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 633.58

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNESP – Campus Experimental de Itapeva.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA
CAMPUS DE ITAPEVA

**ANÁLISE DAS RESISTÊNCIAS DE EMBUTIMENTO E DE
COMPRESSÃO PARA MADEIRAS DE PINUS E EUCALIPTO**

DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

Prof. Dr. José Cláudio Caraschi
Coordenador de Curso

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a. Dr.^a. Cristiane Inácio de Campos
Co - Orientadora – Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Cláudio De Conti
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof.^a Dr.^a Elen Aparecida Martines Morales
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, à minha mãe, ao meu irmão e à minha irmã, pelo carinho, amizade e respeito que há entre nós. Sem vocês essa nossa conquista seria impossível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS pela vida e por tudo que tenho conquistado.

Aos meus amados pais, Salomão de Almeida e Terezinha do Carmo Ferreira de Almeida, que sempre estão ao meu lado com respeito e amor.

Aos meus irmãos, Tiago Hendrigo de Almeida e Ingrid Gabriela de Almeida, que são meus melhores amigos.

À toda minha família que sempre me apoiou para concretização dessa etapa.

Às minhas queridas amigas Bruna de Souza Morita, Karla Aparecida Vieira Fonseca, Isabella Imakawa de Araújo e Regina de Souza Camilo.

Aos meus queridos amigos Saulo Pupo de Moraes, Bruno de Araújo Lima, Rafael Trentini de Freitas, Bruno Santos Ferreira, Marcel Yuzo Kondo e Hélder Kenzo Kondo.

Aos meus orientadores Dr. Julio Cesar Molina e Dr. Carlito Calil Junior, que me acolheram muito bem nas dependências do LaMEM/USP e desde que me aceitaram como orientado, sempre foram muito solícitos e pacienciosos nas suas explicações.

A todos os funcionários e professores do Campus da UNESP de Itapeva em especial: Dr.^a Cristiane Inácio de Campos, Dr.^a Maria Angélica Martins Costa e Dr. José Cláudio Caraschi.

À minha amiga Rosmari Pupo de Moraes pela amizade e pela oportunidade de lecionar na rede pública de Ensino do Estado de São Paulo.

Ao empresário Guilherme Corrêa Stamato e seus funcionários pelo estágio concedido na STAMADE PROJETOS E CONSUTORIA EM MADEIRAS.

Aos funcionários do LaMEM/USP em especial Jaime, Arnaldo, Silvio, Samuel e Salete pela ajuda em todos os ensaios realizados para este trabalho.

À minha amiga Valderez, pelas ajudas durante a revisão bibliográfica.

Ao empresário José Antônio Mohana Pinheiro e ao engenheiro Christian Schulte, além de todos os funcionários da INDÚSTRIA DE PORTAS BRAZIL pela acolhida e ensinamentos em São Luis do Maranhão.

EPÍGRAFE

“O Senhor disse a Abraão: Deixa sua terra, tua família e a casa de teu pai, e vai para a terra que eu te mostrar”.

(Gênesis 12,1)

RESUMO

As ligações em estruturas de madeira são os locais onde ocorrem as maiores concentrações de tensões e por isso são mais frágeis que o restante da estrutura. As ligações entre peças de madeira podem ser feitas por pinos metálicos (pregos ou parafusos). As resistências de compressão e de embutimento, influenciam significativamente no dimensionamento das ligações. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar as resistências de embutimento e de compressão nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras, utilizando corpos de prova padronizados pela ABNT NBR 7190/1997. As resistências de embutimento e de compressão foram avaliadas inicialmente de acordo com a ABNT NBR 7190/1997, que convencionou a deformação 2‰ para o limite de resistência ao embutimento e o quociente entre a força última e a área de aplicação da força no corpo de prova para a resistência à compressão. Posteriormente, a resistência ao embutimento foi avaliada pela norma europeia EUROCODE 5/1995, que estabelece o limite de 5 mm de deslocamento para a resistência ao embutimento. Foram ensaiados corpos de prova de *Pinus oocarpa*, *Cumaru* e *Pinus taeda* para calibração dos equipamentos e foram utilizados corpos de prova de *Pinus taeda* e *Eucalipto citriodora* para comparação dos resultados de resistência. Os resultados de resistência foram avaliados a partir de análise estatística. Os resultados das resistências de compressão para os corpos de prova de *Pinus taeda* não apresentaram diferenças significativas das resistências de embutimento nas direções paralela e normal às fibras. Para o *Eucalipto citriodora* somente na direção paralela às fibras a resistência à compressão diferiu significativamente em relação à resistência de embutimento. Para ambas as espécies, apenas as resistências de compressão paralela e inclinada à 45°, as quais foram condicionadas à deformação 2‰, não apresentaram diferenças significativas com relação as resistências à compressão determinadas de acordo com a ABNT NBR 7190/1997. Também, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas as resistências à compressão normal obtidas de acordo com ABNT NBR 7190/1997 e as resistências últimas à compressão normal. As resistências à compressão condicionadas à deformação 2‰ utilizando-se o LVDT e stroke diferiram significativamente apenas na direção paralela às fibras para a espécie *Eucalipto citriodora*. As resistências ao embutimento determinadas pela norma europeia foram maiores que as determinadas pela norma brasileira. As resistências ao embutimento determinadas convencionalmente utilizando as deformações do LVDT e stroke não diferiram em média para as três direções estudadas para ambas as espécies.

Palavras chaves: compressão; embutimento; estruturas de madeira; ligações; resistência.

ABSTRACT

The connections in the wood structures are the places with high concentrations of stresses and therefore are more fragile than the rest of the structure. The connections between pieces of wood can be made by metal pins (nails or screws). The compression and embedment strength has significant influence on the calculation of the connections. The main aim of this work was to evaluate the compression and embedment strength in the directions parallel, inclined at 45° and normal to the grain, using standard specimens according to ABNT NBR 7190/1997 standard. The compression and embedment strength were initially evaluated according to ABNT NBR 7190/1997, which admits the deformation of 2‰ as limit of embedment and the ratio between the ultimate strength and the area of application of load in the specimen for the compressive strength. Afterward, the embedment strength was evaluated by the EUROCODE 5 /1995 European standard, which use the limit of 5 mm of the displacement for the embedment. Specimens of *Pinus oocarpa*, *Cumaru* and *Pinus taeda* were used in tests to calibration of equipment and specimens of *Pinus taeda* and *Eucalipto citriodora* were used to compare the results of strength. The results of strength were evaluated based on statistical analysis. The results of compressive strength for the *Pinus taeda* showed no significant differences in embedment strength in the directions parallel and normal to the grain. For the *Eucalipto citriodora* only in the direction parallel to grain the compression strength was not significant compared with the embedment strength. For both species, only the parallel compression strength and inclined at 45° to the grain, which were admitted the strain of 2‰ were not significantly different compared with the compression strength determined according to ABNT NBR 7190/1997. The normal compression strength obtained according to ABNT NBR 7190/1997 and ultimate compression strength not presented significant differences. The compressive strength conditioned to deformation of 2‰ using the LVDT and stroke were not significantly only in the direction parallel to the grain to the species *Eucalipto citriodora*. The embedment strength obtained according to EUROCODE 5/1995 standard were higher than those obtained by ABNT NBR 7190/1997 standard. The embedment strength determined by the LVDT and stroke were not significantly for the three directions studied for both species.

Key words: compression; embedment; wood structures; connections; strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ligações por conectores metálicos. Fonte: Flach; Frenette (2000) apud Duarte (2004).	23
Figura 2: Tipos de pregos: (a) prego com uma cabeça (b) prego sem cabeça (c) prego com duas cabeças (d) prego ardox (e) prego anelar. Fonte: Duarte (2004).	24
Figura 3: Parafusos auto-atarraxantes para madeira: (a) cabeça chata (b) cabeça redonda (c) cabeça oval. Fonte: Wood Handbook (1999) apud Duarte (2004).	26
Figura 4: Parafuso auto-atarraxante de cabeça sextavada e rosca soberba. Fonte: Duarte (2004).	26
Figura 5: Parafusos auto-atarraxantes tipo torx. Fonte: Duarte (2004).	27
Figura 6: Tipos de parafusos comuns. Fonte: Soltis (1997) apud Duarte (2004).	27
Figura 7: Ligação com parafuso auto-atarraxante. Fonte: Pfeil, W; Pfeil, M. (2007).	29
Figura 8: Pinos metálicos em corte simples. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	30
Figura 9: Pinos metálicos em corte duplo. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	32
Figura 10: Espaçamentos mínimos em ligações por pinos metálicos. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	33
Figura 11: Modo de deformações dos pinos metálicos de acordo com cada correlação da Equação 5. Fonte: EUROCODE 5/1995.	34
Figura 12: Modo de deformações dos pinos metálicos de acordo com cada correlação da Equação 6. Fonte: EUROCODE 5/1995.	35
Figura 13: Ligações por contato. Fonte: Flach; Frenette (2000) apud Duarte (2004).	36
Figura 14: Ligações coladas. Fonte: Engineered Wood Products (2001) apud Duarte (2004).	37
Figura 15: Configuração do corpo de prova para ensaio de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	38
Figura 16: Diagrama tensão x deformação específica de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	39
Figura 17: Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	40

Figura 18: Diagrama de carregamento para ensaios de embutimento - EUROCODE 5/1995. Fonte: EUROCODE 5/1995.	43
Figura 19: Especificações do corpo de prova para o ensaio de compressão paralela (medidas em centímetros). Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	45
Figura 20: Configuração do ensaio para determinação da compressão paralela às fibras utilizando relógios comparadores. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	47
Figura 21: Diagrama de carregamento para ensaio de compressão paralela e normal às fibras. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	48
Figura 22: Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	49
Figura 23: Especificações do corpo de prova para o ensaio de compressão normal. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	49
Figura 24: Arranjo de ensaio para compressão normal às fibras utilizando relógios comparadores. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.	50
Figura 25: Medidas das dimensões dos corpos de prova com a utilização do paquímetro.	54
Figura 26: Corpo de prova para ensaio de compressão paralela de (a) <i>Pinus oocarpa</i> e (b) <i>Cumarú</i>	54
Figura 27: Corpos de prova de <i>Pinus taeda</i> para ensaio de compressão (a) paralela, (b) inclinada à 45° e (c) normal em relação às fibras.	55
Figura 28: Representação nos corpos de prova de embutimento das medidas (a) k, p e (b) n.	56
Figura 29: Pino metálico fixado no corpo de prova de <i>Pinus oocarpa</i> para o ensaio de embutimento.	57
Figura 30: Corpo de prova para ensaio de embutimento paralelo de (a) <i>Pinus oocarpa</i> e (b) <i>Cumarú</i>	57
Figura 31: Corpos de prova de <i>Pinus taeda</i> para ensaio de embutimento (a) paralelo, (b) inclinado à 45° e (c) normal às fibras.	58
Figura 32: Máquina universal de ensaios AMSLER.	59
Figura 33: Máquina universal de ensaios DARTEC.	60
Figura 34: Visualização do gráfico força (kN) x stroke (mm) durante ensaio na máquina DARTEC.	61
Figura 35: Corpos de prova de <i>Eucalypto citriodora</i> para ensaio de compressão (a) paralela, (b) inclinada à 45° e (c) normal em relação às fibras.	66

Figura 36: Corpos de prova de Eucalipto citriodora para ensaio de embutimento (a) paralelo, (b) inclinado à 45° e (c) normal em relação às fibras.	67
Figura 38: LVDT utilizado para determinação da deformação.	68
Figura 39: Diagrama para determinação da carga convencionada de compressão normal às fibras para Pinus taeda.	69
Figura 40: Diagrama para determinação da carga convencionada de compressão normal às fibras para Eucalipto citriodora.	69
Figura 40: Corpo de prova de Eucalipto citriodora para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.	70
Figura 41: Corpos de prova de densidade e umidade na estufa.	71
Figura 42: Esmagamento da madeira de Pinus taeda em ensaio de embutimento paralelo.	77
Figura 43: Fendilhamento na direção das fibras de Pinus taeda no ensaio de embutimento paralelo.	78
Figura 44: Fendilhamento na direção das fibras de Pinus taedano ensaio de embutimento normal.	78
Figura 45: Fendilhamento na direção das fibras de Pinus taeda no ensaio de embutimento inclinado à 45°.	79
Figura 46: Compressão do corpo de prova Pinus taeda durante o ensaio de compressão normal às fibras.	80
Figura 47: Deformação do corpo de prova de Pinus taeda durante o ensaio de compressão inclinada à 45°.	80
Figura 48: Ensaio de compressão paralela às fibras de Pinus taeda sem deformações consideráveis.	81
Figura 49: Deformação do corpo de prova de compressão paralela de Eucalipto citriodora considerando o (a) LVDT e o (b) stroke.	82
Figura 50: Deformação do corpo de prova de embutimento paralelo de Pinus taeda considerando o (a) LVDT e o (b) stroke.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de α_c para diferentes diâmetros de pinos.	41
Tabela 2: Valores médios das propriedades mecânicas das espécies utilizadas.....	52
Tabela 3: Coeficiente de minoração da resistência.	62
Tabela 4: Valores médios das propriedades mecânicas do Eucalipto citriodora.....	64
Tabela 5: Resistência à compressão paralela do Pinus oocarpa.	73
Tabela 6: Resistência à compressão paralela do Cumaru.....	74
Tabela 7: Resistência à compressão paralela do Pinus taeda (preliminar).....	74
Tabela 8: Resistência à compressão inclinada à 45° do Pinus taeda (preliminar).....	74
Tabela 9: Resistência à compressão normal do Pinus taeda (preliminar).	75
Tabela 10: Resistência ao embutimento paralelo do Pinus oocarpa.....	75
Tabela 11: Resistência ao embutimento paralelo do Cumaru.	76
Tabela 12: Resistência ao embutimento paralelo do Pinus taeda (preliminar).....	76
Tabela 13: Resistência ao embutimento inclinado à 45° do Pinus taeda (preliminar).	76
Tabela 14: Resistência ao embutimento normal do Pinus taeda (preliminar).	77
Tabela 15: Valores médios das propriedades das madeiras de Pinus taeda e Eucalipto citriodora.....	81
Tabela 16: Resistências à compressão paralela do Pinus taeda.....	83
Tabela 17: Resistências à compressão inclinada à 45° do Pinus taeda.....	84
Tabela 18: Resistências à compressão normal do Pinus taeda.	84
Tabela 19: Resistências à compressão paralela do Eucalipto citriodora.	84
Tabela 20: Resistências à compressão inclinada à 45° do Eucalipto citriodora.	85
Tabela 21: Resistências à compressão normal do Eucalipto citriodora.....	85
Tabela 22: Resistências ao embutimento paralelo do Pinus taeda.	87
Tabela 23: Resistências ao embutimento inclinado à 45° do Pinus taeda.	87
Tabela 24: Resistências ao embutimento normal do Pinus taeda.....	87
Tabela 25: Resistências ao embutimento paralelo do Eucalipto citriodora.....	88
Tabela 26: Resistências ao embutimento inclinado à 45° do Eucalipto citriodora.....	88
Tabela 27: Resistências ao embutimento normal do Eucalipto citriodora.	88

Tabela 28: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção paralela às fibras da madeira de Pinus taeda.....	90
Tabela 29: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Pinus taeda.	91
Tabela 30: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção normal às fibras da madeira de Pinus taeda.....	91
Tabela 31: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção paralela às fibras da madeira de Eucalipto citriodora.	92
Tabela 32: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Eucalipto citriodora.	93
Tabela 33: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção normal às fibras da madeira de Eucalipto citriodora.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

EN – Norma Europeia

LaMEM – Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeiras

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

NBR – Norma Brasileira

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

CI – corpo de prova de compressão inclinada à 45° em relação às fibras da madeira para ensaio definitivo

CN – corpo de prova de compressão normal às fibras da madeira para ensaio definitivo

CP – corpo de prova de compressão paralela às fibras da madeira para ensaio definitivo

E_{c0} – módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras da madeira

EI – corpo de prova de embutimento inclinado à 45° em relação às fibras da madeira para ensaio definitivo

EN – corpo de prova de embutimento normal em relação às fibras da madeira para ensaio definitivo

EP – corpo de prova de embutimento paralelo em relação às fibras da madeira para ensaio definitivo

TU – teor de umidade da madeira

Letras romanas minúsculas

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras da madeira

f_{c0,k} – valor característico da resistência à compressão paralela às fibras da madeira

f_{c0,k}' – valor característico da resistência à compressão paralela às fibras da madeira correspondente à deformação 2‰

f_{c45} – resistência à compressão inclinada à 45° em relação às fibras da madeira

f_{c45,k} – valor característico da resistência à compressão inclinada à 45° em relação às fibras da madeira

f_{c45,k}' – valor característico da resistência à compressão inclinada à 45° em relação às fibras da madeira correspondente à deformação 2‰

f_{c90} – valor da resistência à compressão normal em relação às fibras da madeira

f_{c90,k} – valor característico da resistência à compressão normal em relação às fibras da madeira

$f_{c90,k}'$ – valor característico da resistência última à compressão normal em relação às fibras da madeira

$f_{e0,k}$ – valor característico da resistência ao embutimento paralelo às fibras da madeira

$f_{e0,k}'$ – valor característico da resistência última ao embutimento paralelo às fibras da madeira

$f_{e45,k}$ – valor característico da resistência ao embutimento inclinado à 45° em relação às fibras da madeira

$f_{e45,k}'$ – valor característico da resistência última ao embutimento inclinado à 45° em relação às fibras da madeira

$f_{e90,k}$ – valor característico da resistência ao embutimento normal às fibras da madeira

$f_{e90,k}'$ – valor característico da resistência última ao embutimento normal às fibras da madeira

f_{t0} – resistência à tração paralela às fibras da madeira

f_{t90} – resistência à tração normal às fibras da madeira

f_v – resistência ao cisalhamento

Letras gregas

γ_s – coeficiente de ponderação da resistência

$\rho_{ap,12\%}$ – densidade aparente a 12% de umidade

$\rho_{bás}$ – densidade básica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS DO TRABALHO PROPOSTO	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1. Ligações em estruturas de madeira.....	22
3.2. Ligações por conectores metálicos	23
3.2.1. Pinos metálicos (pregos e parafusos).....	24
3.2.1.1. Pregos	24
3.2.1.2. Parafusos	25
3.2.2. Pré-furação das ligações	28
3.2.2.1. Pré-furação das ligações (ABNT NBR 7190/1997).....	28
3.2.2.2. Pré-furação das ligações (EUROCODE 5/1995)	28
3.2.3. Critérios de dimensionamento analítico de ligações com pinos metálicos.....	29
3.2.3.1. Dimensionamento analítico de ligações (ABNT NBR 7190/1997).....	29
3.2.3.2. Dimensionamento analítico de ligações (EUROCODE 5/ 1995)	33
3.3. Ligações por contato.....	35
3.4. Ligações coladas.....	36
3.5. Critérios de ensaios de embutimento.....	37
3.5.1. Ensaio de embutimento (ABNT NBR 7190/1997).....	38
3.5.2. Ensaio de embutimento (EUROCODE 5/1995)	41
3.6. Critérios para determinação da resistência ao embutimento em qualquer ângulo de atuação da carga.....	43
3.6.1. Resistência ao embutimento em qualquer ângulo (ABNT NBR 7190/1997).....	43
3.6.2. Resistência ao embutimento em qualquer ângulo (EUROCODE 5/1995).....	44
3.7. Ensaio de compressão paralela às fibras da madeira (ABNT NBR 7190/1997).....	45
3.8. Ensaio de compressão normal às fibras da madeira (ABNT NBR 7190/1997)	48
3.9. Considerações sobre a revisão bibliográfica	51
4. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1. Ensaios preliminares.....	52
4.1.1. Espécies de madeira utilizadas.....	52

4.1.2.	Confecção dos corpos de prova	53
4.1.2.1.	Corpos de prova para ensaios de compressão	53
4.1.2.2.	Corpos de prova para ensaios de embutimento	56
4.1.3.	Métodos de ensaios	59
4.1.3.1.	Métodos de ensaios de compressão.....	59
4.1.3.2.	Métodos de ensaios de embutimento	61
4.1.3.3.	Coeficiente de minoração da resistência	61
4.1.3.4.	Considerações sobre os ensaios preliminares.....	63
4.2.	Ensaio definitivos.....	64
4.2.1.	Espécies de madeira utilizadas.....	64
4.2.2.	Confecção dos corpos de prova	64
4.2.2.1.	Corpos de prova de Pinus taeda	65
4.2.2.2.	Corpos de prova de Eucalipto citriodora.....	65
4.2.3.	Métodos de ensaios	67
4.2.3.1.	Métodos de ensaios de compressão.....	68
4.2.3.2.	Métodos de ensaios de embutimento	70
4.2.3.3.	Métodos de ensaios de cisalhamento paralelo às fibras	70
4.2.3.4.	Métodos de ensaio de densidade básica e teor de umidade.....	71
4.2.3.5.	Métodos de ensaios de módulo de elasticidade paralelo às fibras	71
4.2.3.6.	Análise estatística.....	72
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5.1.	Ensaio preliminares.....	73
5.1.1.	Ensaio preliminares de compressão e embutimento.....	73
5.1.1.1.	Ensaio de compressão.....	73
5.1.1.2.	Ensaio de embutimento.....	75
5.1.2.	Modos de ruptura nos ensaios de embutimento e compressão com Pinus taeda	77
5.1.2.1.	Ensaio de embutimento.....	77
5.1.2.2.	Ensaio de compressão.....	79
5.2.	Ensaio definitivos.....	81
5.2.1.	Caracterização das espécies estudadas.....	81
5.2.2.	Resultados dos ensaios de compressão	82
5.2.3.	Resultados dos ensaios de embutimento.....	85

5.2.4. Resultados da análise estatística	89
6. CONCLUSÃO	95
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	97
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
9. REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES	99

1. INTRODUÇÃO

A madeira nos últimos anos está se destacando como um dos materiais utilizados como elementos estruturais e, isso se deve ao aumento da tecnologia empregada em seu beneficiamento, a industrialização de estruturas de madeira, a utilização de espécies de reflorestamento como Pinus e Eucalipto, a utilização de agentes preservantes com maior qualidade, entre outros fatores que influenciam na utilização da madeira como material estrutural.

As ligações em estruturas de madeira são utilizadas para a união entre elementos estruturais de madeira e são consideradas pontos de maior concentração de tensões, onde a preocupação com a segurança deve ser maior.

Podemos encontrar numa estrutura de madeira, vários tipos de ligação entre peças estruturais. Dentre os tipos de ligação podemos destacar a ligação que utiliza os pinos metálicos (pregos e parafusos). Também podemos encontrar as ligações coladas e as ligações por contato.

O dimensionamento das ligações entre elementos de madeira pode ser realizado por intermédio de normas nacionais e internacionais, como por exemplos, ABNT NBR 7190/1997 e EUROCODE 5/1995.

No dimensionamento de ligações por pinos entre elementos de madeira são considerados basicamente dois modos de ruptura: flexão do pino metálico ou embutimento do pino na madeira. Neste caso, para o dimensionamento das ligações em estruturas de madeira é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira como resistência ao embutimento e a compressão, como também do pino como resistência ao escoamento do aço.

Portanto, as ligações demandam estudos experimentais para avaliar o real comportamento da ligação em relação às propriedades mecânicas da madeira e também do aço utilizado no pino.

Os resultados obtidos a partir deste trabalho de pesquisa serão utilizados no atual projeto de revisão da ABNT NBR 7190/1997.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO PROPOSTO

Os objetivos gerais do seguinte trabalho de pesquisa são os seguintes:

- Determinação das resistências de embutimento e de compressão nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira segundo as recomendações da norma brasileira ABNT NBR 7190/1997;
- Comparação das resistências de embutimento com as resistências de compressão obtidas de acordo com as recomendações da ABNT NBR 7190/1997;
- Determinação das resistências de embutimento nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira segundo as recomendações da norma europeia EUROCODE 5/1995;
- Comparação das resistências de embutimento obtidas pela norma ABNT NBR 7190/1997 e EUROCODE 5/1995;
- Determinação de resistências à compressão de maneiras alternativas como: resistências paralela e inclinada à 45° em relação às fibras convencionadas à deformação específica 2‰ no diagrama tensão x deformação específica e resistência última à compressão normal em relação às fibras da madeira;
- Comparação das resistências de compressão obtidas pela norma ABNT NBR 7190/1997 com as obtidas de maneiras alternativas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordados alguns tópicos em relação ao dimensionamento de estruturas de madeira, ressaltando a importância dos tipos de ligações que ocorrem entre peças de madeiras e, também, os ensaios das propriedades mecânicas compressão e embutimento de acordo com os documentos normativos ABNT NBR 7190/1997 e EUROCODE 5/1995.

3.1. Ligações em estruturas de madeira

A execução de projetos com elementos estruturais de madeira que necessitem de grandes dimensões ou na construção de uma estrutura treliçada de madeira, por exemplo, onde várias peças são conectadas, existe a necessidade de que haja ligações entre elas que atendam as solicitações mecânicas necessárias (OLIVEIRA, 2001).

As ligações, definidas como emendas entre peças distintas de madeira, devem ser consideradas pontos vitais para o dimensionamento de uma estrutura, sendo nas ligações as maiores preocupações em relação à segurança da mesma. A ocorrência de falha em uma ligação pode colocar em risco todo o resto da edificação (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

Almeida (1990) apud Oliveira (2009) constatou que nas ligações ocorrem os pontos com maior concentração de tensões numa estrutura de madeira, e ainda consideram a região das ligações como pontos críticos.

Duarte (2004) disserta a respeito de três tipos básicos de ligações entre peças de madeira: ligações por conectores metálicos, que são as mais utilizadas, ligações por contato e ligações coladas. Numa estrutura, pode-se encontrar apenas um tipo de ligação ou então uma combinação entre eles.

3.2. Ligações por conectores metálicos

As ligações por conectores metálicos são aquelas onde há penetração do elemento metálico de ligação nas peças de madeira (Figura 1) e são tidas como semi-rígidas, pois permitem pequenos deslocamentos entre os materiais ligados.



Figura 1: Ligações por conectores metálicos. Fonte: Flach; Frenette (2000) apud Duarte (2004).

A ABNT NBR 7190/1997 e Molina (2008) exemplificam alguns tipos de conectores que podem ser utilizados em estruturas de madeira, desde que se realize o devido dimensionamento. Os conectores utilizados nas ligações são, neste caso, os seguintes:

- Pinos metálicos (pregos ou parafusos);
- Conectores metálicos (chapas com dentes estampados, anéis metálicos e barras de aço coladas).

3.2.1. Pinos metálicos (pregos e parafusos)

De acordo com Calil Junior; Lahr; Dias (2003) os pinos metálicos são os conectores mais utilizados na construção civil em madeira, pois permitem fácil instalação e podem ser utilizados em inúmeras configurações de ligações. Os pinos metálicos são exemplificados pelos pregos e pelos parafusos.

3.2.1.1. Pregos

Os pregos podem ser encontrados em vários tipos e tamanhos e são pinos mais simples se comparados com os parafusos. Podem ser encontrados pregos com uma, duas ou sem nenhuma cabeça, além de poderem possuir inúmeras configurações de seção transversal (quadrada, cilíndrica, helicoidal (ardox) ou anelar) e também, possui revestimento com o objetivo de aumentar a resistência à oxidação (Figura 2).



Figura 2: Tipos de pregos: (a) prego com uma cabeça (b) prego sem cabeça (c) prego com duas cabeças (d) prego ardox (e) prego anelar. Fonte: Duarte (2004).

Os pregos dos tipos ardox e anelar possuem suas hastes trabalhadas mecanicamente e, nesses casos existe um aumento na área de contato entre conector e a madeira sem aumento de massa do prego, quando comparado a pregos comuns. Então, por isso, a resistência à carga

axial desses pregos é sempre maior que a dos pregos comuns de mesmo diâmetro. De uma maneira geral, os pregos anelares suportam maiores cargas axiais estáticas e os pregos ardox suportam maiores cargas axiais dinâmicas que os demais pregos.

3.2.1.2. Parafusos

Basicamente, existem dois tipos de parafusos: comuns e auto-atarraxantes. A diferença entre eles é que os comuns atravessam toda a peça de madeira recebendo uma porca na sua extremidade e os auto-atarraxantes apresentam uma ponta na extremidade oposta à sua cabeça que não atravessa completamente as peças da ligação, por isso não são utilizados com porcas.

- **Parafusos auto-atarraxantes**

A utilização de parafusos auto-atarraxantes é vantajosa, em relação aos parafusos comuns, em ligações onde o comprimento necessário do parafuso é muito grande ou quando o acesso a um lado da ligação não é possível. Eles também são menos agressivos às peças de madeira, pois são inseridos somente de um dos lados da ligação, ficando uma das pontas do parafuso sempre embutida na peça (DUARTE, 2004).

Segundo Wood Handbook (1999) apud Duarte (2004) é possível dividir os parafusos auto-atarraxantes em três classes distintas: para madeira, de cabeça sextavada e rosca soberba e do tipo torx. As características de cada um dos tipos de parafusos auto-atarraxantes serão descritas a seguir:

- **Parafuso auto-atarraxante para madeira:** esses parafusos podem ser fabricados com bronze, aço e ter revestimentos específicos de níquel, cromo ou cádmio. Suas configurações são variadas, possuindo cabeças chata, oval e redonda (Figura 3). A inserção dele na madeira se dá somente por movimentos de torção e com pré-furação no diâmetro adequado;

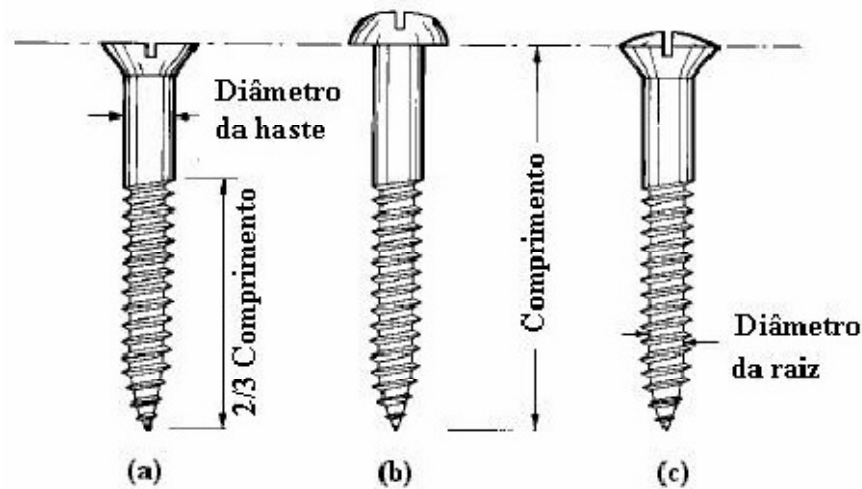


Figura 3: Parafusos auto-atarraxantes para madeira: (a) cabeça chata (b) cabeça redonda (c) cabeça oval. Fonte: Wood Handbook (1999) apud Duarte (2004).

- **Parafusos auto-atarraxantes de cabeça sextavada e rosca soberba:** esses tipos de parafusos possuem cabeça hexagonal e são inseridos na madeira com chave inglesa. Geralmente são fabricados com aços SAE 1010 ou 1020 ou inox (Figura 4).



Figura 4: Parafuso auto-atarraxante de cabeça sextavada e rosca soberba. Fonte: Duarte (2004).

- **Parafusos auto-atarraxantes do tipo torx:** esses tipos de parafusos possuem hastas esbeltas, pequenos diâmetros e variados comprimentos totalmente ou parcialmente rosqueados. O aço utilizado para fabricação desse tipo de parafuso é de elevada resistência (Figura 5).

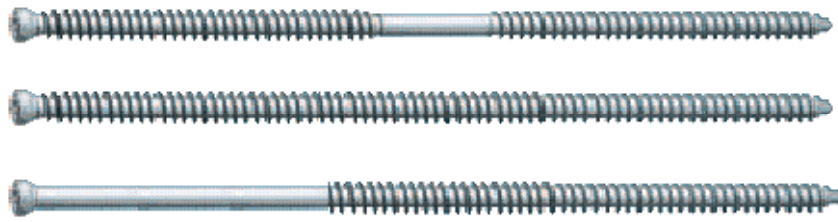


Figura 5: Parafusos auto-atarraxantes tipo torx. Fonte: Duarte (2004).

- **Parafusos comuns**

Segundo Soltis (1997) apud Duarte (2004) os parafusos comuns são encontrados em diversas configurações em relação às suas cabeças: sextavada, quadrada, oval e chata (Figura 6). Os parafusos comuns de cabeça oval possuem uma fenda para fixação e aperto do parafuso.

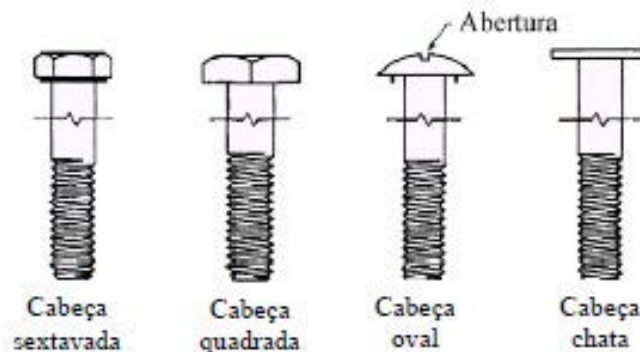


Figura 6: Tipos de parafusos comuns. Fonte: Soltis (1997) apud Duarte (2004).

Após os ajustes dos parafusos, as porcas são apertadas fortemente fazendo com que as peças de madeira sejam comprimidas na direção transversal, sendo esse esforço favorável à ligação, porque desenvolve atrito entre as partes a serem ligadas. Para haver a transferência do esforço à madeira, é necessária a utilização de arruelas.

3.2.2. Pré-furação das ligações

No momento em que ocorre a penetração do pino metálico na peça de madeira são geradas tensões nessa interface, antes mesmo de ocorrer o carregamento da ligação (OLIVEIRA, 2001).

A ABNT NBR 7190/1997 e a EUROCODE 5/1995 definem algumas relações no que se refere às pré-furações que devem ser realizadas na madeira para as ligações com pregos e parafusos.

3.2.2.1. Pré-furação das ligações (ABNT NBR 7190/1997)

Para as ligações com parafusos, a pré-furação deve ser realizada com diâmetro d_0 não maior que o diâmetro d do parafuso acrescido de 0,5 mm. Será considerada deformável, a ligação onde o diâmetro d_0 seja maior que o diâmetro d do parafuso.

Para as ligações pregadas, o diâmetro d_0 da pré-furação não pode ser maior que o diâmetro d_{ef} do prego, de acordo com o tipo de madeira. Se a madeira utilizada for dicotiledônea, $d_0 = 0,98 d_{ef}$, se a madeira for conífera, $d_0 = 0,85 d_{ef}$.

3.2.2.2. Pré-furação das ligações (EUROCODE 5/1995)

A EUROCODE 5/1995 recomenda pré-furação para ligações pregadas em caso de madeiras que possuam densidade maior que 500 kg/m^3 , sendo facultativa para madeiras com densidades menores.

Para as ligações que utilizam parafusos auto-atarraxantes, a pré-furação deve ser sempre realizada e a ponta do parafuso deve alcançar o quádruplo do diâmetro do parafuso para conseguir resistência ao corte (Figura 7).

No caso de ligações com parafusos comuns, recomenda-se folga máxima de 1 mm.

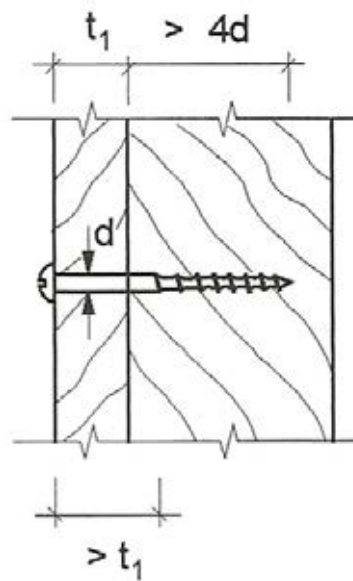


Figura 7: Ligação com parafuso auto-atarraxante. Fonte: Pfeil, W; Pfeil, M. (2007).

3.2.3. Critérios de dimensionamento analítico de ligações com pinos metálicos

A seguir serão apresentados os critérios de dimensionamento analítico para ligações com pinos metálicos de acordo com a ABNT NBR 7190/1997 e a EUROCODE 5/1995.

3.2.3.1. Dimensionamento analítico de ligações (ABNT NBR 7190/1997)

Os pinos metálicos são ajustados nos corpos de prova de modo a não ultrapassarem uma pequena folga (em torno de 1 mm). A ABNT NBR 7190/1997 recomenda que os parafusos estruturais tenham diâmetros no mínimo de 10 mm e resistência característica de escoamento (f_{yk}) de pelo menos 240 MPa.

Antes de começar a execução de uma estrutura de madeira, é importante que haja o dimensionamento dos elementos de ligação. Portanto, deve-se seguir o seguinte critério: $S_d \leq$

R_d , onde S_d é o valor da sollicitação de cálculo e R_d é o valor da resistência de cálculo dos elementos de ligação. Para isso deve-se levar em consideração que o estado limite da ligação pode estar envolvido com a resistência da madeira ou com defeitos no pino metálico.

A soma das resistências correspondentes às diferentes seções de corte de um pino metálico terá como resultado a resistência total desse parafuso.

O valor de cálculo da resistência de um pino metálico (Figura 8) correspondente a uma única seção de corte é determinado em função do valor do parâmetro β (Equação 1).

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (1)$$

Onde: β = razão entre a espessura convencional da peça de madeira e o diâmetro do pino (adimensional);

t = espessura da peça de madeira (mm);

d = diâmetro do pino (mm).

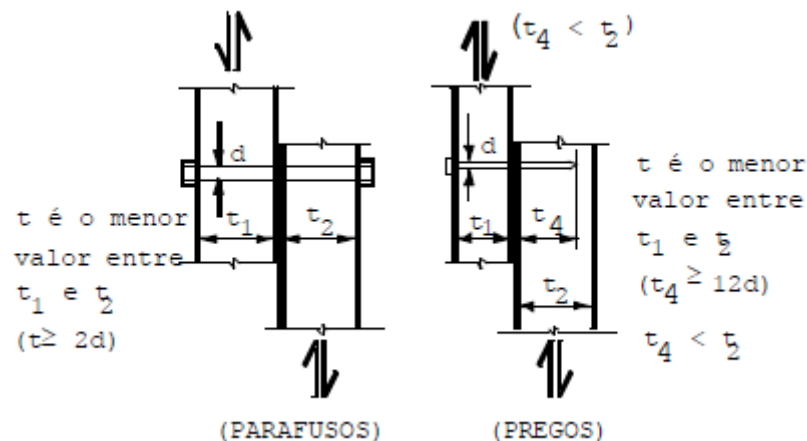


Figura 8: Pinos metálicos em corte simples. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

O valor limite do indicador do modo de ruptura da ligação é dado pela Equação 2.

$$\beta_{lim} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (2)$$

Onde: β_{lim} = valor limite do indicador do modo de ruptura (adimensional);

f_{yd} = resistência de cálculo ao escoamento do aço utilizado no conector metálico (MPa), determinada a partir do quociente entre f_{yk} e $\gamma_s=1,1$;

f_{ed} = resistência de cálculo de embutimento da madeira (MPa).

O valor de cálculo da resistência de um pino, correspondente a uma única seção de corte será dado em função da forma de ruptura esperada.

A primeira forma de ruptura que pode ocorrer é a flexão do pino, e isso ocorrerá quando $\beta > \beta_{lim}$. Neste caso, o valor de cálculo da resistência de um pino será determinado pela Equação 3.

$$R_{vd,1} = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{yd} \quad (3)$$

Onde: $R_{vd,1}$ = valor de cálculo da resistência de um pino (kN).

A segunda forma de ruptura que pode ocorrer é o embutimento na madeira, e isso ocorrerá quando $\beta \leq \beta_{lim}$. Neste caso, $R_{vd,1}$ será calculado pela Equação 4.

$$R_{vd,1} = 0,4 \cdot \frac{d^2}{\beta} \cdot f_{ed} \quad (4)$$

Quando existe o caso de pinos metálicos com duas linhas de corte (Figura 9), a ABNT NBR 7190/1997 determina que sejam aplicados os mesmos critérios anteriores para a determinação da resistência correspondente a cada uma das seções de corte, considerando-se t como o menor dos valores entre t_1 e $t_2/2$ em uma das seções, e entre $t_2/2$ e t_3 na outra seção.

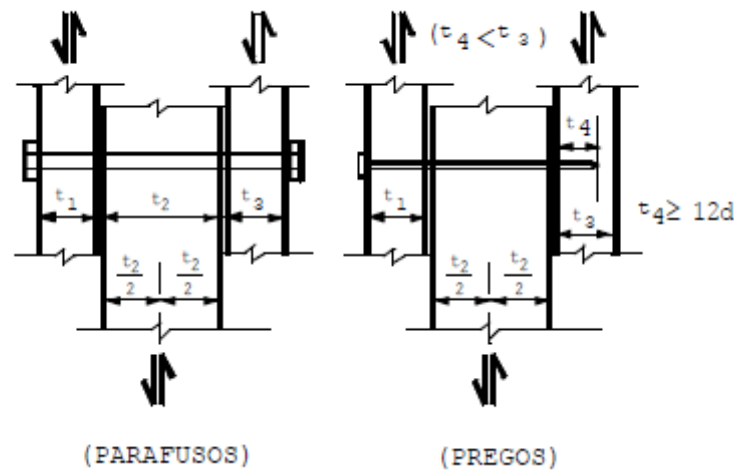


Figura 9: Pinos metálicos em corte duplo. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

A ABNT NBR 7190 1997 recomenda como espaçamentos mínimos para ligações com pinos (Figura 10), as seguintes configurações:

- a) do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde atuam tensões de compressão normal: $4d$;
- b) do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde atuam tensões de tração normal: $1,5d$;
- c) do centro do último pino à extremidade de peças tracionadas: $7d$;
- d) do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for paralelo às fibras: $1,5d$;
- e) do centro do último pino à extremidade de peças comprimidas: $4d$;
- f) entre os centros de dois pinos situados em duas linhas paralelas à direção das fibras, medido perpendicularmente às fibras: $3d$;
- g) entre o centro de dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras: pregos, cavilhas e parafusos ajustados $6d$; parafusos $4d$.

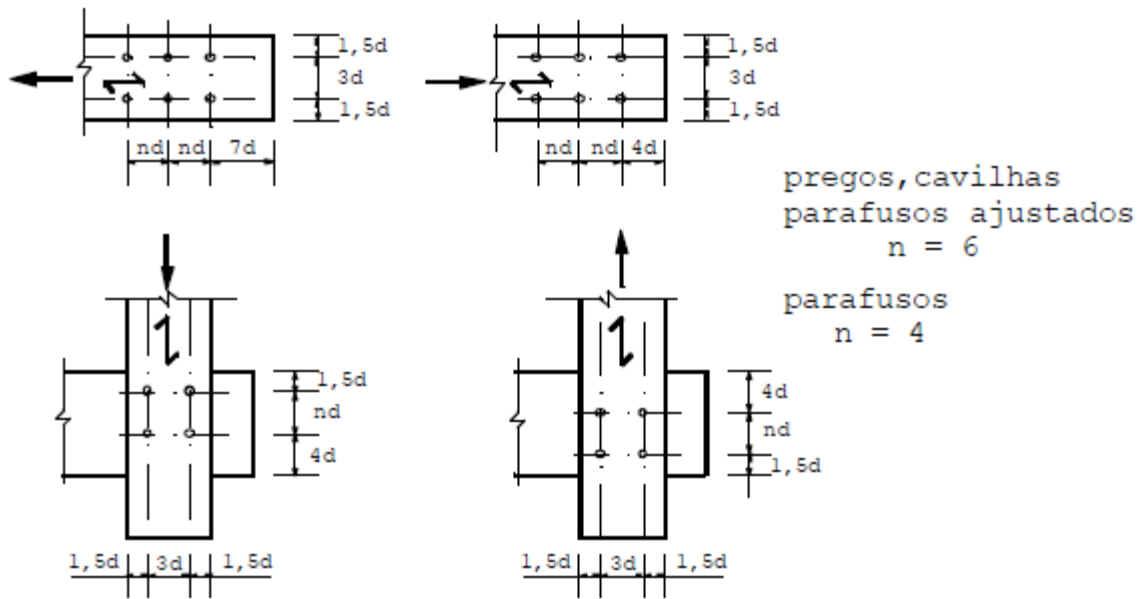


Figura 10: Espaçamentos mínimos em ligações por pinos metálicos. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

3.2.3.2. Dimensionamento analítico de ligações (EUROCODE 5/ 1995)

A norma europeia EUROCODE 5/1995 diferentemente da norma brasileira, não considera os mesmos critérios de dimensionamento de ligações quando os pinos metálicos possuem uma ou duas seções de corte.

Para uma seção de corte, a EUROCODE 5/1995 traz como valor característico de resistência de um pino metálico, o menor valor determinado entre toda série de correlações (Equação 5). A Figura 11 mostra o tipo de falha para cada correlação.

$$R_k = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \text{ (a)} \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \text{ (b)} \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \text{ (c)} \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta (1 + \beta) + \frac{4\beta (2 + \beta) M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \text{ (d)} \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta^2 (1 + \beta) + \frac{4\beta (1 + 2\beta) M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] \text{ (e)} \\ \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \text{ (f)} \end{array} \right. \quad (5)$$

Onde: R_k = valor característico de resistência de um parafuso;

t_1 e t_2 = espessura da madeira ou a penetração do pino nesta (Figura 11 (a));

$f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$ = valores característicos da resistência ao embutimento para espessura t_1 e t_2 ;

β = é a razão entre $f_{h,2,k}$ e $f_{h,1,k}$;

$M_{y,k}$ = valor característico do momento de escoamento do pino.

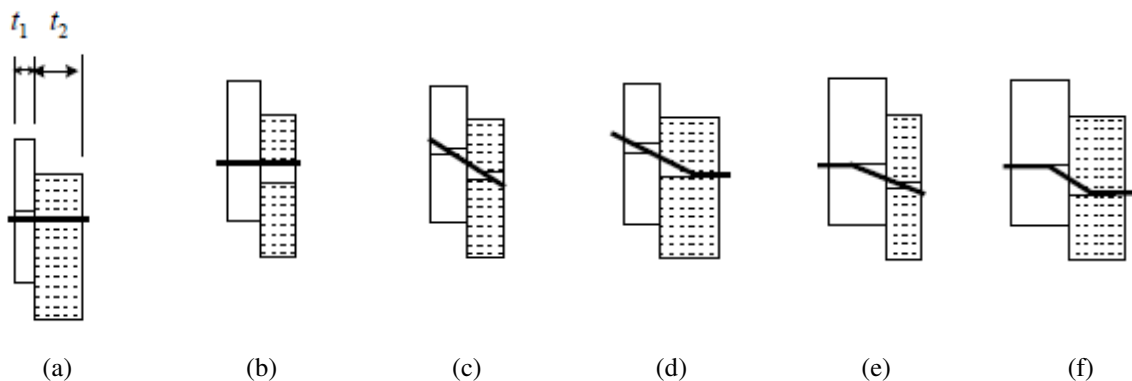


Figura 11: Modo de deformações dos pinos metálicos de acordo com cada correlação da Equação 5. Fonte: EUROCODE 5/1995.

Em se tratando de uma situação onde o pino possua duas seções de corte, a EUROCODE 5/1995 traz como valor característico de resistência de um parafuso, o menor valor determinado entre outra série diferente de correlações (Equação 6). Os modos de ruptura do pino em duas seções de corte podem ser visualizados na Figura 12.

$$R_k = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \text{ (g)} \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta \text{ (h)} \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta (1 + \beta) + \frac{4\beta (2 + \beta) M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \text{ (i)} \\ \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \text{ (j)} \end{array} \right. \quad (6)$$

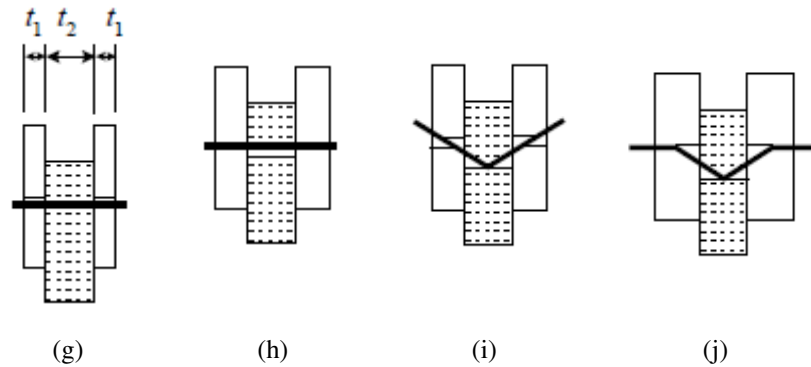


Figura 12: Modo de deformações dos pinos metálicos de acordo com cada correlação da Equação 6. Fonte: EUROCODE 5/1995.

3.3. Ligações por contato

São as ligações formadas somente com contato entre peças de madeira e são consideradas do tipo rígidas, pois não permitem deslizamentos entre as peças ligadas. São as ligações mais simples que existem e não garantem a continuidade das estruturas, a não ser que se utilize a ligação com pinos metálicos também. O entalhe pode ser caracterizado como um exemplo de ligação por contato e trabalha basicamente na compressão (Figura 13).



Figura 13: Ligações por contato. Fonte: Flach; Frenette (2000) apud Duarte (2004).

3.4. Ligações coladas

São as ligações formadas entre peças de madeira somente pela adição de um adesivo entre elas. A eficiência desse tipo de ligação está intimamente relacionada ao tipo de adesivo utilizado e o processo de fabricação. Esse tipo de ligação também é considerado rígido.

Tomando por base a qualidade e a segurança no dimensionamento das ligações em estruturas de madeira, as normas ABNT NBR 7190/1997 e EUROCEDE 5 não possuem dimensionamento a respeito desse tipo de ligação.

Geralmente utilizam-se ligações coladas para fixação de placas de pisos de madeira em vigas de sustentação (Figura 14).



Figura 14: Ligações coladas. Fonte: Engineered Wood Products (2001) apud Duarte (2004).

3.5. Critérios de ensaios de embutimento

Almeida (1987) relata que o embutimento que pode ocorrer em peças de madeira está relacionado aos estados múltiplos de tensões nas faces dos furos devido à grande pressão exercida pelo pino na madeira.

Nos itens seguintes serão especificados os ensaios de embutimento segundo as diretrizes da ABNT NBR 7190/1997 e da EUROCODE 5/1995.

3.5.1. Ensaio de embutimento (ABNT NBR 7190/1997)

Na ABNT NBR 7190/1997, a resistência é determinada convencionalmente tomando por base a maior tensão aplicada a corpos de provas livres de defeitos, até o aparecimento de fenômenos como ruptura e deformação específica excessiva.

Pode-se definir embutimento como a razão entre a força que causa a deformação específica residual 2‰ e a área de embutimento do parafuso. A área de embutimento é dada pelo produto do diâmetro do parafuso e a espessura da peça de madeira (Figura 15), de acordo com a Equação 7.

$$f_e = \frac{F_e}{t \cdot d} \quad (7)$$

Onde: F_e = força de embutimento que causa deformação específica de 2‰;

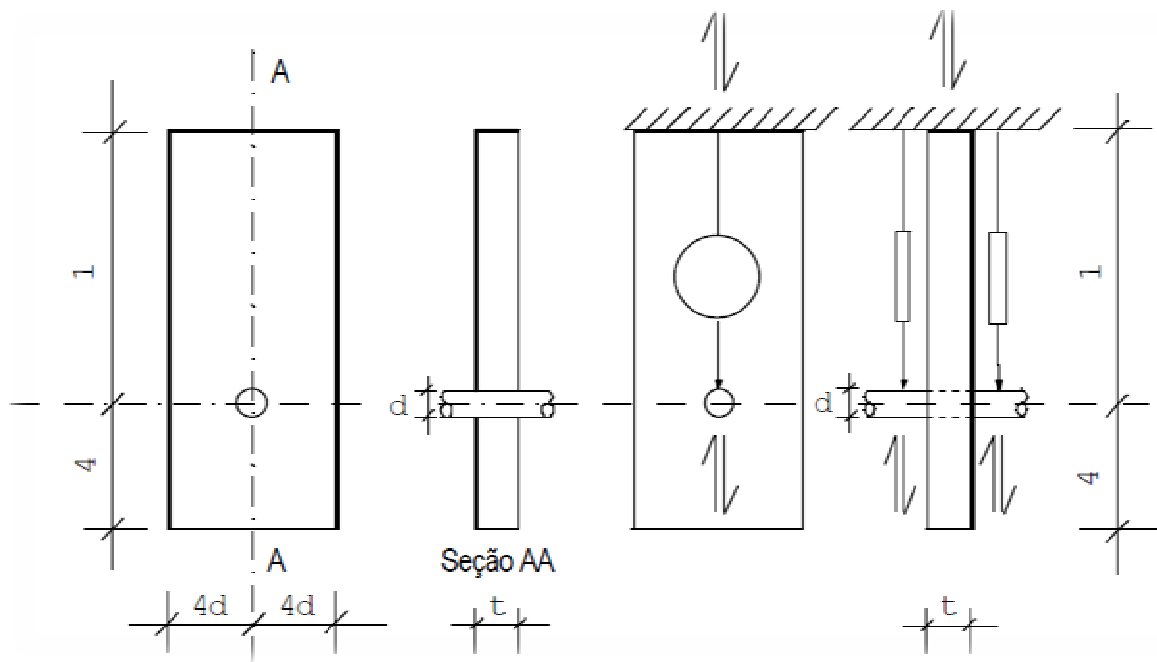


Figura 15: Configuração do corpo de prova para ensaio de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

Para essa finalidade, as resistências de embutimento nas direções paralela e normal às fibras da madeira, devem ser determinadas a partir do diagrama tensão x deformação específica de embutimento (Figura 16).

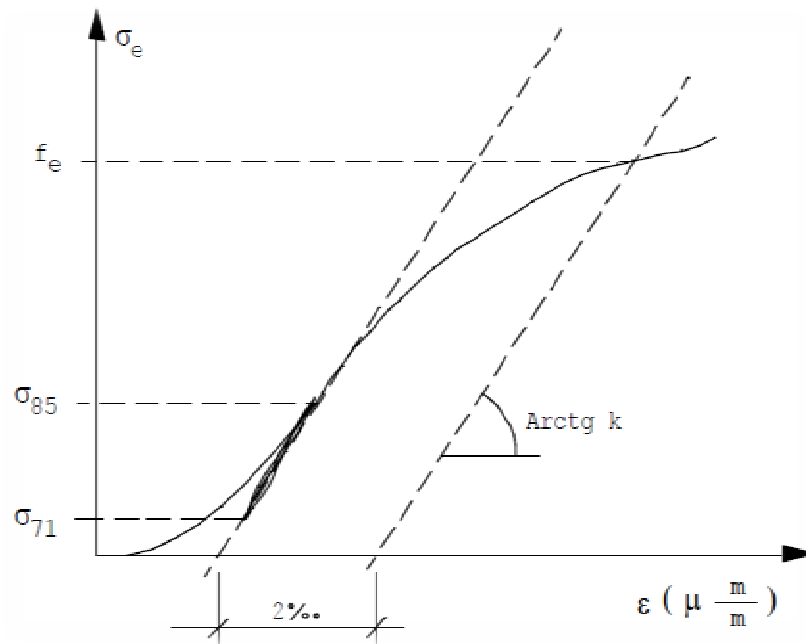


Figura 16: Diagrama tensão x deformação específica de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

Para haver a caracterização da resistência de embutimento na direção paralela às fibras o corpo de prova deve possuir forma prismática, de seção retangular com $8d$ de largura e $2d$ de espessura correspondentes a $\beta = t/d = 2$, com comprimento ao longo das fibras de $18d$. Para a resistência de embutimento na direção normal às fibras da madeira, o corpo de prova deve possuir as mesmas dimensões anteriores, tomando-se o eixo maior na direção normal às fibras da madeira.

Nos procedimentos adotados pela ABNT NBR 7190/1997 para os ensaios de embutimento, as medidas do deslocamento relativo devem ser feitas com um comprimento da base de medida de $14d$ e deve ser estimada a resistência ($f_{e0,est}$) por meio do ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionado da mesma amostra a ser investigada.

Conhecida a resistência de embutimento estimada, o carregamento deve ser aplicado de acordo com o procedimento constante no diagrama da Figura 17, obedecendo a uma taxa de carregamento igual a 10 MPa/min.

Os registros das forças e das deformações devem ser feitos para cada ponto do diagrama de carregamento e os ensaios devem ser realizados nas direções paralela e normal às fibras da madeira ($\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$).

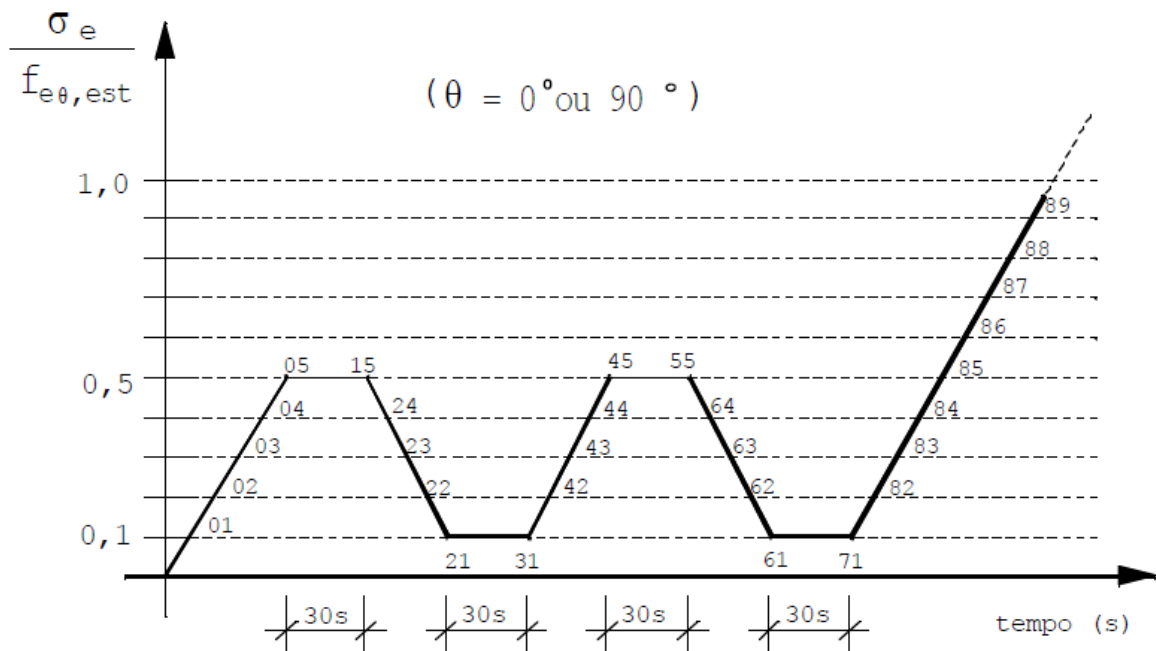


Figura 17: Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

A resistência da madeira ao embutimento nas direções paralela e normal às fibras da madeira podem ser determinadas, respectivamente, a partir das Equações 8 e 9, no caso de ausência de ensaios experimentais específicos. A resistência ao embutimento e à compressão na direção das fibras são obtidas em corpos de prova com configurações diferentes, podendo comprometer os o cálculo das ligações.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (8)$$

$$f_{e90} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (9)$$

Onde: α_e = coeficiente em função do diâmetro o pino (Tabela 1).

Tabela 1: Valores de α_e para diferentes diâmetros de pinos.

Diâmetro do pino (cm)	≤ 0,62	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2	2,5	3,1	3,8	4,4	5	≥ 7,5
α_e	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1

Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

3.5.2. Ensaio de embutimento (EUROCODE 5/1995)

De acordo com esse documento normativo, a determinação experimental da resistência ao embutimento de um pino na madeira, é caracterizada pela máxima força resistida pelo corpo de prova (Equação 10) ou a força que provoca o deslocamento relativo de 5 mm (Equação 11) entre a madeira e o pino metálico, escolhendo entre os dois o menor dos valores, dividida pelo produto entre o diâmetro do parafuso e a espessura da peça.

$$f_e = \frac{F_{m\acute{a}x}}{t \cdot d} \quad (10)$$

Onde: $F_{m\acute{a}x}$ = máxima força resistida pelo corpo de prova.

$$f_e = \frac{F_{5mm}}{t \cdot d} \quad (11)$$

Onde: F_{5mm} = força que provoca o deslocamento relativo de 5 mm na interface madeira/pino metálico.

Essa norma define o coeficiente de rigidez de embutimento, orientando-se a respeito da inclinação da reta secante à curva força x deslocamento para os pontos de força 0 e 40% da força de embutimento estimada ($F_{e,est}$), sendo calculada pela Equação 12.

$$k_{\text{ser}} = \frac{0,4 \cdot F_{e,\text{est}}}{u_{i,\text{mod}}} \quad (12)$$

Onde: k_{ser} = coeficiente de rigidez de embutimento;

$F_{e,\text{est}}$ = força de embutimento estimada;

$u_{i,\text{mod}}$ = deslizamento corrigido.

O deslizamento corrigido pela inclinação da secante nos pontos 01 e 04 do diagrama de carregamento para ensaio de embutimento de acordo com a EUROCODE 5/1995 (Figura 18), pode ser determinado pela Equação 13.

$$u_{i,\text{mod}} = \frac{4}{3} (u_{04} - u_{01}) \quad (13)$$

Onde: u_{01} = deslizamento ocorrido devido a carga de 10%;

u_{04} = deslizamento ocorrido devido a carga de 40%.

Os corpos de prova devem ser condicionados até atingir massa constante em ambiente com a umidade relativa do ar de $65\% \pm 5\%$ e a temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Na montagem, os dispositivos utilizados não devem provocar atrito entre si e o corpo de prova, assegurando não haver influência nos resultados.

A norma ainda especifica que, na aplicação da força, esta deve ser elevada até 40% da força de embutimento estimada e mantida por 30 segundos. Então, deve ser reduzida a 10% da força de embutimento estimada e mantida por 30 segundos. Na sequência, a força deve ser aumentada até que o valor máximo dessa força seja atingido, ou até quando a deformação atingir 5 mm a mais do que a deformação inicial do corpo de prova. A força deve ser aumentada ou diminuída na mesma razão carregamento x tempo de forma que a força máxima deva ser atingida com 300 ± 120 segundos (Figura 18).

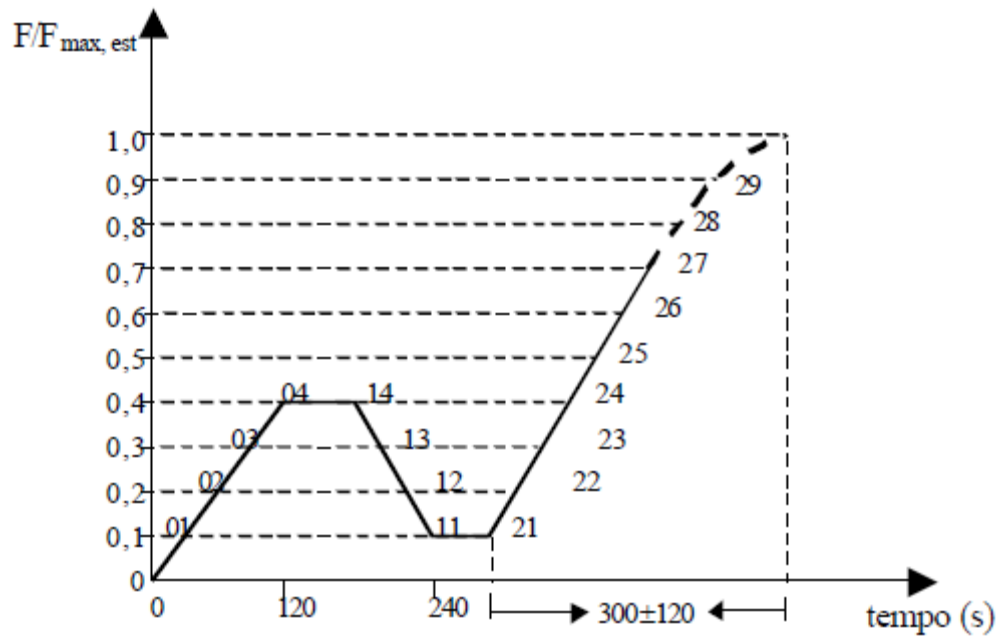


Figura 18: Diagrama de carregamento para ensaios de embutimento - EUROCODE 5/1995. Fonte: EUROCODE 5/1995.

3.6. Critérios para determinação da resistência ao embutimento em qualquer ângulo de atuação da carga

Nesse trecho serão especificados os métodos de cálculo para determinação da resistência ao embutimento quando a madeira é solicitada em qualquer ângulo de incidência pela carga, segundo as diretrizes da ABNT NBR 7190/1997 e da EUROCODE 5/1995.

3.6.1. Resistência ao embutimento em qualquer ângulo (ABNT NBR 7190/1997)

A resistência da madeira ao embutimento em uma direção qualquer, inclinada de um ângulo α em relação às fibras, pode ser calculada pela equação de Hankinson (Equação 14), com base nas resistências ao embutimento nas direções paralela e normal às fibras.

$$f_{e\alpha} = \frac{f_{e0} \cdot f_{e90}}{f_{e0} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{e90} \cdot \text{cos}^2 \alpha} \quad (14)$$

Onde: $f_{e\alpha}$ = resistência característica ao embutimento da madeira para forças em qualquer direção (N/mm²);

α = ângulo de incidência da carga em relação às fibras da madeira;

f_{e0} = resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira;

f_{e90} = resistência ao embutimento na direção normal às fibras da madeira.

3.6.2. Resistência ao embutimento em qualquer ângulo (EUROCODE 5/1995)

A resistência característica ao embutimento, segundo a EUROCODE 5/1995, para ligações parafusadas em madeira maciça, com parafusos que possuam até 3 cm de diâmetro, com forças aplicadas formando um ângulo α com a direção das fibras, pode ser determinada pela Equação 15.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha} \quad (15)$$

Onde: $f_{h,\alpha,k}$ = resistência característica ao embutimento da madeira para forças em qualquer direção (N/mm²);

$f_{h,0,k}$ = resistência característica ao embutimento da madeira para forças na direção paralela às fibras = 0,082 . (1 – 0,01d). ρ_k (N/mm²);

ρ_k = densidade da madeira (kg/m³);

$k_{90} = 1,35 + 0,015d$ para madeiras menos densas, com d em mm;

$k_{90} = 0,90 + 0,015d$ para madeiras mais densas, com d em mm;

No caso de ligações pregadas, utilizando pregos de até 8 mm de diâmetro, levando em consideração todos os ângulos em relação às direções das fibras da madeira, tem-se nas

Equações 16 e 17 os valores para a resistência característica ao embutimento dessas ligações ($f_{h,k}$), para os casos com e sem pré-furação, respectivamente.

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01d) \cdot \rho_k \quad (16)$$

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (17)$$

3.7. Ensaio de compressão paralela às fibras da madeira (ABNT NBR 7190/1997)

A finalidade do ensaio de compressão paralela às fibras é a determinação da rigidez e da resistência à compressão paralela às fibras da madeira, utilizando corpos de prova iguais aos da Figura 19.

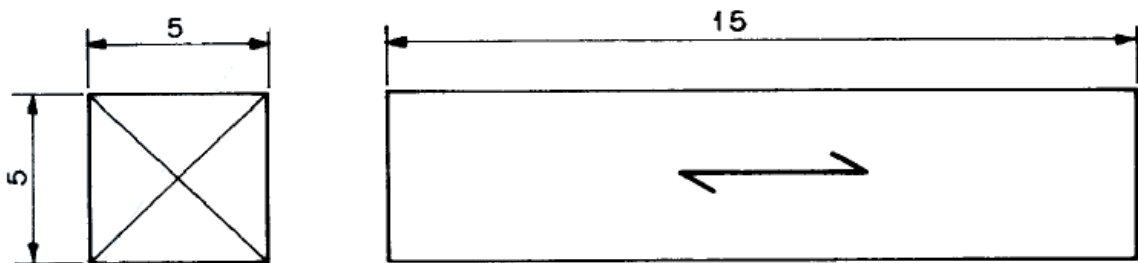


Figura 19: Especificações do corpo de prova para o ensaio de compressão paralela (medidas em centímetros).

Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

A resistência à compressão paralela às fibras é dada pela máxima tensão de compressão, que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e 15 cm de comprimento, conforme Equação 18.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (18)$$

Onde: $F_{c0,máx}$ = carga de ruptura à compressão paralela às fibras da madeira;

A = área de seção transversal do corpo de prova.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica.

Para essa finalidade, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação, de acordo com a Equação 19.

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (19)$$

Onde: $\sigma_{50\%}$ = tensão de compressão paralela correspondente a 50% da resistência;

$\sigma_{10\%}$ = tensão de compressão paralela correspondente a 10% da resistência última obtida para o corpo de prova;

$\varepsilon_{50\%}$ = deformação específica de compressão paralela referente a 50% da resistência;

$\varepsilon_{10\%}$ = deformação específica de compressão paralela referente a 10% da resistência última obtida para o corpo de prova;

Para a determinação das propriedades de resistência e de rigidez da madeira, as medidas dos lados do corpo de prova devem ser feitas com precisão de 0,1 mm, o ajuste deste na máquina de ensaio deve ser feito utilizando-se uma rótula entre o atuador e o corpo de prova.

A resistência deve ser determinada com carregamento monotônico crescente com uma taxa em torno de 10 MPa/min.

Para a determinação do módulo de elasticidade, devem ser realizadas medidas de deformações em pelo menos duas faces opostas do corpo de prova, podendo ser utilizados relógios comparadores, com precisão de 0,001mm, fixados por meio de duas cantoneiras metálicas pregadas no corpo de prova (Figura 20). Após os cálculos das porcentagens de carga a ser aplicada com relação ao valor da ruptura fazem-se as leituras obtidas nos relógios, obtendo-se a média das leituras. A deformação específica é calculada através da Equação 20.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (20)$$

Onde: Δl = deslocamento relativo do corpo de prova;

l_0 = comprimento da base de medida padronizada.

Para determinação da rigidez, a resistência da madeira deve ser estimada ($f_{c0,est}$) pelo ensaio destrutivo de um corpo de prova selecionado da mesma amostra a ser investigada. Conhecida a resistência estimada do corpo de prova gêmeo retirado da amostra, o carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de força e descarga, a uma taxa de 10 MPa/min para acomodação do corpo de prova e o módulo de elasticidade é obtido no terceiro ciclo de carga, de acordo com o procedimento especificado no diagrama de carregamento para ensaio de compressão (Figura 21).

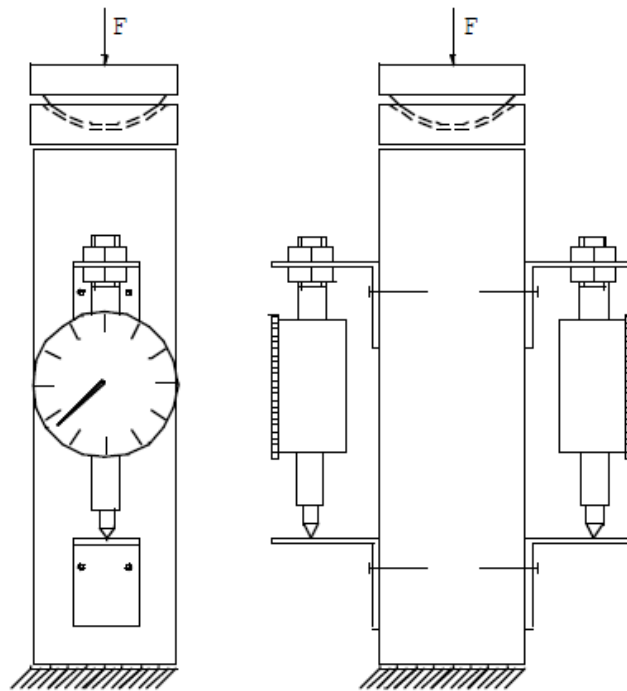


Figura 20: Configuração do ensaio para determinação da compressão paralela às fibras utilizando relógios comparadores. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

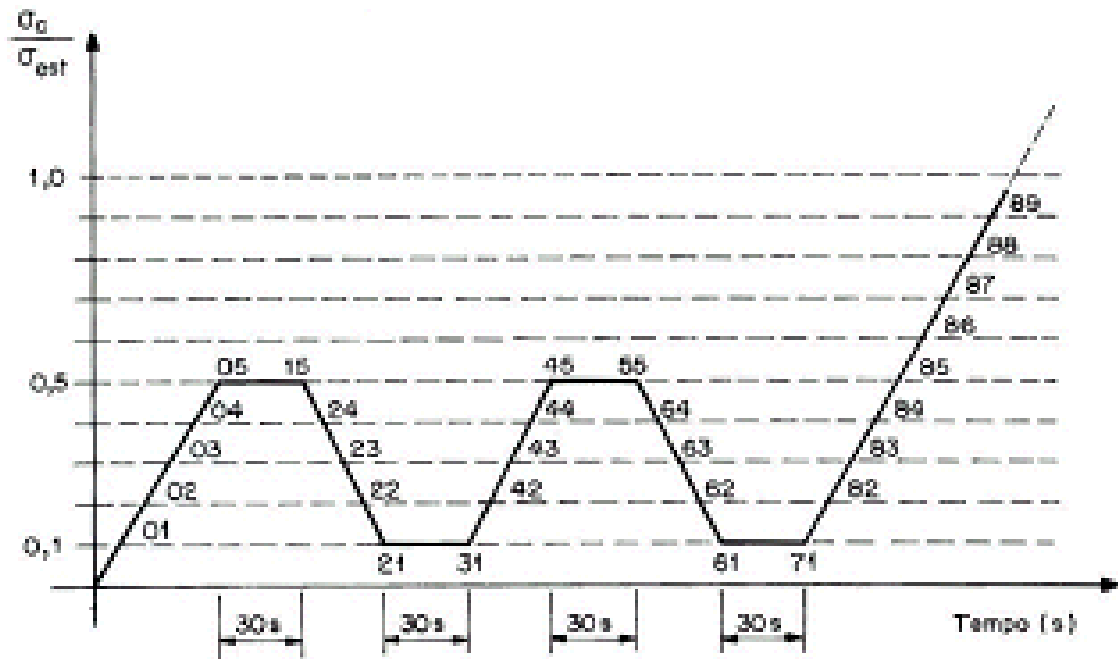


Figura 21: Diagrama de carregamento para ensaio de compressão paralela e normal às fibras. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

3.8. Ensaio de compressão normal às fibras da madeira (ABNT NBR 7190/1997)

A resistência à compressão normal às fibras da madeira é o valor convencional determinado pela deformação específica residual de 2‰, mostrado na Figura 22, obtida em um ensaio de compressão uniforme em corpos de prova que possuam as especificações da Figura 23.

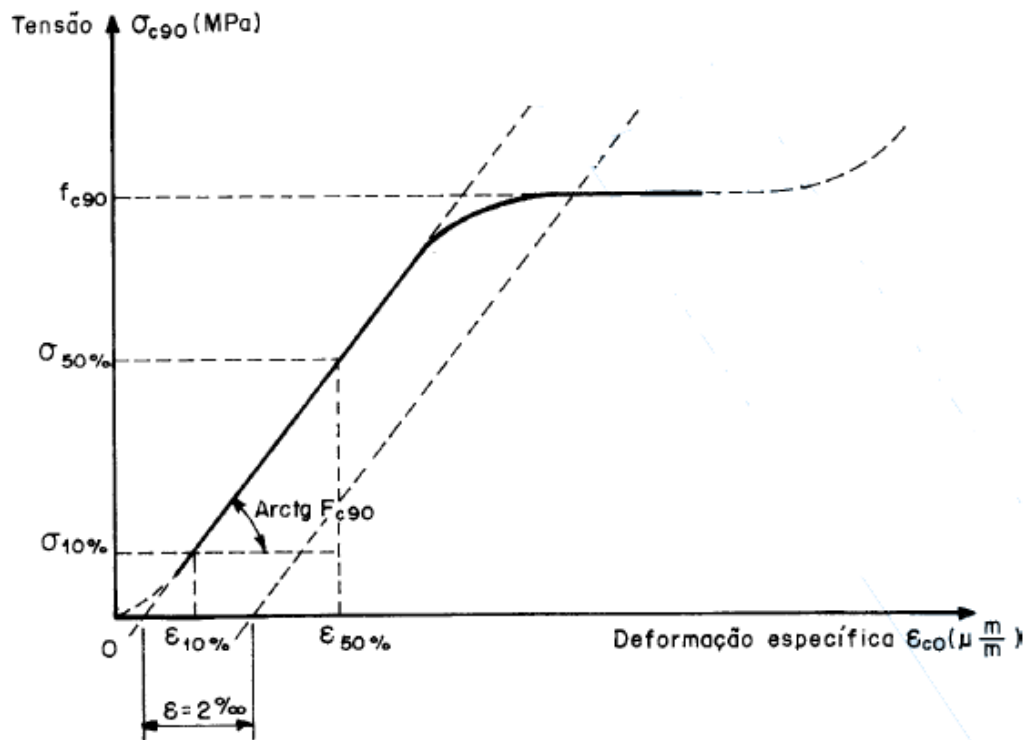


Figura 22: Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

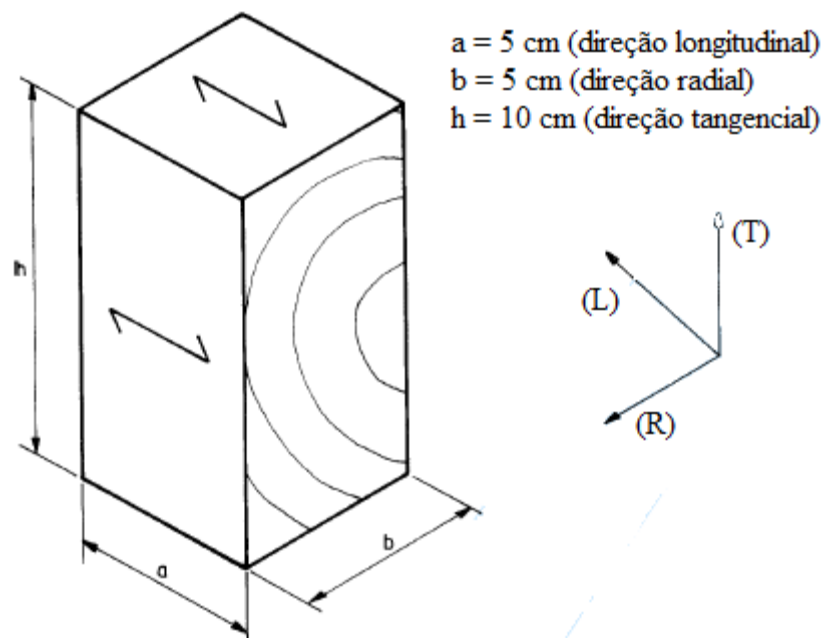


Figura 23: Especificações do corpo de prova para o ensaio de compressão normal. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

A resistência à compressão normal às fibras é dada pela máxima tensão de compressão, que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e 10 cm de comprimento, conforme Equação 21.

$$f_{c90} = \frac{F_{c90,m\acute{a}x}}{A} \quad (21)$$

Onde: $F_{c90,m\acute{a}x}$ = carga de ruptura no ensaio de compressão normal às fibras.

Para a determinação do módulo de elasticidade, devem ser realizadas medidas de deformações em pelo menos duas faces opostas do corpo de prova, podendo ser utilizados relógios comparadores, com precisão de 0,001mm (Figura 24). Após os cálculos das porcentagens necessárias fazem-se as leituras obtidas nos relógios, obtendo-se a média das leituras. A deformação é calculada então através da Equação 20.

Para determinação da rigidez, a resistência da madeira deve ser estimada ($F_{c90,est}$) pelo ensaio destrutivo de um corpo de prova selecionado da mesma amostra a ser investigada. Conhecida a resistência estimada da amostra, o carregamento deve ser aplicado com dois ciclos de força e descarga, a uma taxa de 10 MPa/min, de acordo com o procedimento especificado no diagrama de carregamento para ensaio de compressão (Figura 21).

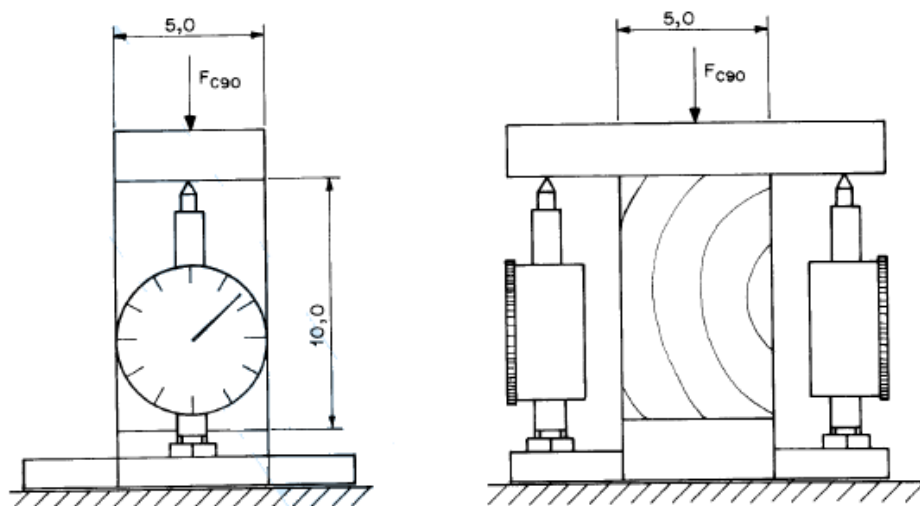


Figura 24: Arranjo de ensaio para compressão normal às fibras utilizando relógios comparadores. Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

3.9. Considerações sobre a revisão bibliográfica

Em relação à revisão bibliográfica, podemos realizar as seguintes considerações:

- Em estruturas de madeira é necessário realizar o dimensionamento dos elementos de ligação de maneira adequada aos documentos normativos, pois esses trechos em estruturas são tidos como críticos e podem colocar toda a estrutura em risco se não realizados os devidos dimensionamentos;
- O critério de ruptura para a determinação da resistência ao embutimento é diferente entre as normas ABNT NBR 7190/1997 e EUROCODE 5/1995. Pela ABNT NBR 7190/1997 a resistência de embutimento da ligação é convencionada a deformação 2‰ enquanto pela EUROCODE 5/1995 esta resistência é determinada pela força que provoca o deslocamento de 5 mm ou a resistência última ao embutimento;
- A resistência ao embutimento é determinada diferentemente da resistência à compressão na direção das fibras e estas são admitidas iguais no cálculo de ligações segundo a ABNT NBR 7190/1997. A resistência de embutimento é convencionada a deformação 2 ‰ e a resistência de compressão é obtida pelo quociente entre a força última de ruptura do corpo de prova padronizado e a área correspondente de aplicação dessa força;
- A norma ABNT NBR 7190/1997 passa por processo de revisão e o tema ligações em estruturas de madeira para esta norma encontra-se em fase de estudos e ajustes.
- Atualmente existe a necessidade de se quantificar os valores das resistências ao embutimento e também de compressão tendo-se em vista a obtenção de respostas mais próximas do comportamento real da estrutura quando se tratar do cálculo de ligações entre peças estruturais de madeira efetuados por pinos metálicos. Em muitos casos o cálculo de ligações por pinos metálicos com base nas recomendações da ABNT NBR 7190/1997 fornece um número exagerado de pinos nas ligações não correspondendo ao comportamento real da estrutura.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são fornecidas as informações referentes aos materiais e métodos utilizados neste trabalho para determinação das resistências ao embutimento e também à compressão nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira, assim como para a caracterização dos materiais e calibração da máquina de ensaios DARTEC.

4.1. Ensaios preliminares

Primeiramente foram realizados ensaios preliminares de embutimento e compressão em corpos de prova de três espécies de madeira tendo-se em vista a determinação de diretrizes para os ensaios definitivos utilizando a madeira disponível na EESC/LaMEM/USP.

4.1.1. Espécies de madeira utilizadas

Para os ensaios preliminares deste trabalho foram utilizadas três espécies distintas de madeira, sendo duas de reflorestamento e uma nativa. As espécies de reflorestamento utilizadas foram o Pinus oocarpa (*Pinnus oocarpa* Shiede) e o Pinus Taeda (*Pinnus taeda* L.) e a espécie nativa foi Cumaru (*Dipteryx odorata*).

A Tabela 2 contém os valores médios das propriedades mecânicas das espécies utilizadas nesse trabalho de acordo com a ABNT NBR 7190/1997 e Fernández (2010).

Tabela 2: Valores médios das propriedades mecânicas das espécies utilizadas.

Espécie	$\rho_{ap.12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
Pinus oocarpa	538,00	43,60	60,90	2,50	8,00	10904,00
Pinus taeda	645,00	44,40	82,80	2,80	7,70	13304,00
Cumaru	1060,00	98,70	128,20	4,90	22,40	18300,00

Fonte: ABNT NBR 7190/1997; FERNÁNDEZ, 2010.

4.1.2. Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados na oficina da EESC/LaMEM/USP. Foram confeccionados corpos de provas padronizados nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras com as dimensões pertinentes a cada tipo de ensaio, de acordo com as diretrizes normativas da ABNT NBR 7190/1997.

4.1.2.1. Corpos de prova para ensaios de compressão

Foram fabricados, para as três espécies, sete corpos de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras, totalizando 18 corpos de prova, sendo um deles para determinação da carga de ruptura estimada para cada espécie. Os corpos de prova foram numerados de 1 a 18 e tiveram suas dimensões aferidas com um paquímetro (Figura 25). Todos os corpos de prova possuíam seção transversal quadrada com dimensões aproximadas de 5 x 5 cm, comprimento de 15 cm e a base de medida considerada para os deslocamentos e deformações foi 10 cm.

Para o *Pinus taeda* ainda foram confeccionados sete corpos de prova para ensaios de compressão inclinada 45° e sete para compressão normal em relação às fibras da madeira, sendo para cada ensaio utilizado um corpo de prova para determinação da carga de ruptura estimada. Os corpos de prova para compressão inclinada à 45° possuíam comprimento de 15 cm e foram numerados de 19 a 24 e os de compressão normal possuíam 10 cm de comprimento e foram numerados de 25 a 30, para ambos a base de medida considerada foi 10 cm.



Figura 25: Medidas das dimensões dos corpos de prova com a utilização do paquímetro.

Os corpos de prova para os ensaios preliminares de compressão podem ser observados nas Figuras 26 e 27.



(a)



(b)

Figura 26: Corpo de prova para ensaio de compressão paralela de (a) *Pinus oocarpa* e (b) *Cumaru*.



(a)



(b)



(c)

Figura 27: Corpos de prova de Pinus taeda para ensaio de compressão (a) paralela, (b) inclinada à 45° e (c) normal em relação às fibras.

4.1.2.2. Corpos de prova para ensaios de embutimento

Foram fabricados, para as três espécies, sete corpos de prova para os ensaios de embutimento paralelo às fibras, sendo um deles para determinação da carga de ruptura estimada. Os corpos de prova foram numerados de 1 a 18 e tiveram suas dimensões aferidas com um paquímetro e a base de medida considerada foi de 14 d.

Todos os corpos de prova de embutimento possuíam medidas k , p e n iguais, respectivamente a 8 cm, 18 cm e 4 cm (Figura 28) e suas espessuras aproximadamente iguais a 2 cm. O pino utilizado para os ensaios era de aço e possuía diâmetro de 10 mm (Figura 29). As espessuras dos corpos de prova para os ensaios de embutimento paralelo às fibras para as três espécies podem ser observadas nas Tabelas 8, 9 e 10.

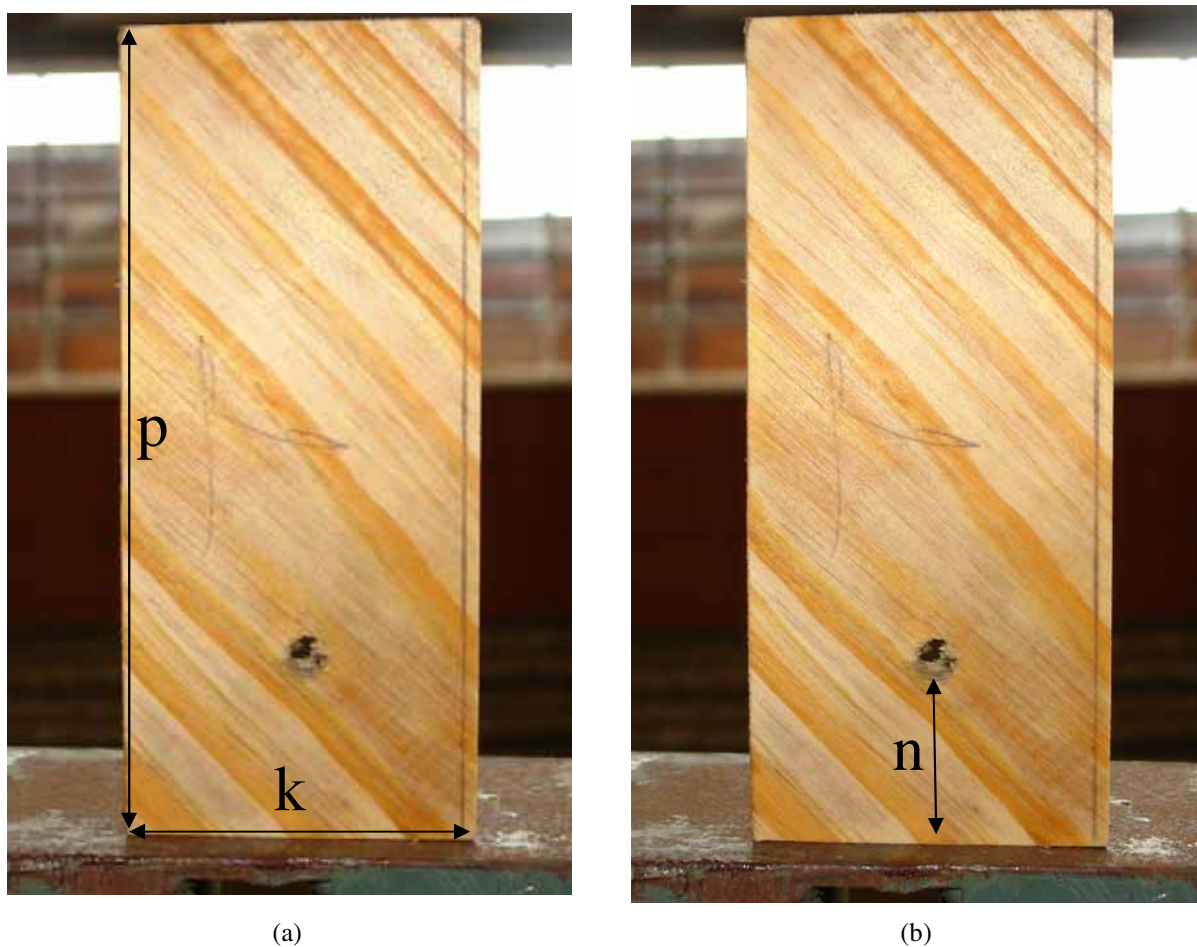


Figura 28: Representação nos corpos de prova de embutimento das medidas (a) k , p e (b) n .



Figura 29: Pino metálico fixado no corpo de prova de *Pinus oocarpa* para o ensaio de embutimento.

Também foram confeccionados corpos de prova para embutimento inclinado à 45° e normal em relação às fibras da madeira de *Pinus taeda*, numerados respectivamente de 19 à 24 e de 25 à 30.

Os corpos de prova para os ensaios de embutimento podem ser observados nas Figuras 30 e 31.



(a)



(b)

Figura 30: Corpo de prova para ensaio de embutimento paralelo de (a) *Pinus oocarpa* e (b) *Cumarú*.



(a)

(b)



(c)

Figura 31: Corpos de prova de Pinus taeda para ensaio de embutimento (a) paralelo, (b) inclinado à 45° e (c) normal às fibras.

4.1.3. Métodos de ensaios

Nos ensaios preliminares foram realizados os ensaios de compressão e embutimento paralelo às fibras para o Pinus oocarpa e para o Cumaru. Para o Pinus taeda foram realizados os ensaios de compressão e embutimento nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira.

4.1.3.1. Métodos de ensaios de compressão

Os ensaios de compressão nas três direções estudadas foram realizadas nas máquinas universais de ensaios mecânicos AMSLER, que possui capacidade de 250 kN (Figura 32) e DARTEC com capacidade de 100 kN (Figura 33). A AMSLER foi utilizada para os ensaios de compressão com Pinus oocarpa e Cumaru. Todos os ensaios com Pinus taeda foram realizados na DARTEC.



Figura 32: Máquina universal de ensaios AMSLER.



Figura 33: Máquina universal de ensaios DARTEC.

A máquina universal de ensaios eletrônica DARTEC possui sensores que captam deformações e cargas proferidas pela máquina que conduzem esses dados para os gráficos sem a necessidade de utilização de relógios comparadores ou extensômetros externos.

Durante os ensaios realizados na DARTEC, um diagrama carga x deslocamento é construído pelo seu próprio software (Figura 34). Então, para cada ponto da curva, pode-se determinar a carga e a respectiva deformação que foi causada no corpo de prova. Para os ensaios preliminares com *Pinus taeda* utilizou-se a deformação fornecida pelo stroke da máquina, que leva em consideração a deformação do sistema de ensaio.



Figura 34: Visualização do gráfico força (kN) x stroke (mm) durante ensaio na máquina DARTEC.

Para todos os ensaios de compressão foram inicialmente estimadas as cargas de ruptura dos corpos de prova e, na sequência, estes foram ensaiados de acordo com os procedimentos descritos nos itens 3.7 e 3.8.

4.1.3.2. Métodos de ensaios de embutimento

Todos os ensaios preliminares de embutimento foram realizados na DARTEC de acordo com o procedimento descrito no item 3.5.1.

4.1.3.3. Coeficiente de minoração da resistência

Segundo a norma europeia EN 13377/2002 é recomendável a utilização de pelo menos 10 repetições dos ensaios para determinação da resistência e, quanto maior o número de repetições (n), menor o coeficiente de minoração e maior a confiabilidade do ensaio.

A relação entre o número de repetições dos ensaios com o coeficiente de minoração da resistência (k_s) pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3: Coeficiente de minoração da resistência.

n	k _s	n	k _s	n	k _s
2	5,12	14	2	26	1,89
3	3,15	15	1,99	27	1,88
4	2,68	16	1,98	28	1,88
5	2,46	17	1,96	29	1,87
6	2,33	18	1,95	34	1,87
7	2,25	19	1,94	39	1,85
8	2,19	20	1,93	44	1,83
9	2,14	21	1,92	49	1,82
10	2,10	22	1,92	54	1,81
11	2,07	23	1,91	55	1,8
12	2,05	24	1,9	-	1,64
13	2,03	25	1,9	-	-

Fonte: EN 13377/2002.

Para determinação da resistência característica primeiramente aplicou-se a cada repetição a seguinte transformação (Equação 22).

$$y_i = \log_e R_{u,i} \quad (22)$$

Onde: $R_{u,i}$ = Resistência de cada repetição.

Após determina-se a média (y) e a variância (s_y) pelas Equações 23 e 24.

$$y = \frac{\sum y_i}{n} \quad (23)$$

$$s_y = \frac{\sum (y_i - y)^2}{(n-1)} \quad (24)$$

Calcula-se um percentil de 5% (y_5) considerando um nível de confiança de 75% através da Equação 25.

$$y_5 = y - (k_s \cdot s_y) \quad (25)$$

Finalmente a resistência característica ($R_{u,5}$) é determinada pela transformação obtida na Equação 26.

$$R_{u,5} = e^{y_5} \quad (26)$$

4.1.3.4. Considerações sobre os ensaios preliminares

A partir dos ensaios preliminares podemos tirar as seguintes considerações:

- A utilização da AMSLER para os ensaios de compressão foi limitada, pois permitiu registrar pontos de deformações somente até 70% da carga de ruptura estimada. Já para cargas próximas à ruptura foi necessária a estratégia de retirada dos relógios para não danificar o equipamento. Além disso, o registro da deformação pelos relógios comparadores podem ser prejudicados por causa de eventuais leituras erradas. Porém ela possui maior capacidade de carga e é necessária quando há necessidade de se estimar a carga de ruptura de madeiras mais duras;
- Foi observado que a utilização da DARTEC permitiu a obtenção das deformações dos corpos de prova a partir de um sistema totalmente automatizado. A máquina DARTEC fornece a deformação do corpo de prova diretamente pelo stroke da máquina (que considera a deformação total do sistema de ensaios) e também pela utilização de LVDT junto ao corpo de prova (que considera somente a deformação do corpo de prova). Neste caso, há a necessidade de se analisar nos ensaios definitivos as diferenças das respostas fornecidas para os dois casos para definição da melhor precisão para os resultados dos ensaios;
- Foi possível identificar alguns modos de ruptura nos ensaios de embutimento e compressão nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira de *Pinus taeda*.

4.2. Ensaios definitivos

Após os ensaios preliminares, foram realizados os ensaios definitivos de compressão e embutimento nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras em corpos de prova de duas espécies diferentes considerando as deformações dos corpos de prova fornecidas pelo LVDT e pelo stroke da máquina de ensaios DARTEC.

4.2.1. Espécies de madeira utilizadas

Para os ensaios definitivos foram utilizadas duas espécies de reflorestamento, o *Pinus taeda* e o Eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*).

A Tabela 4 contém os valores médios das propriedades mecânicas do Eucalipto citriodora segundo ABNT NBR 7190/1997.

Tabela 4: Valores médios das propriedades mecânicas do Eucalipto citriodora.

Espécie	$\rho_{ap.12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
Eucalipto citriodora	999,00	62,00	123,60	3,90	10,70	18421,00

Fonte: ABNT NBR 7190/1997.

4.2.2. Confeção dos corpos de prova

Para os ensaios de compressão e embutimento os corpos de prova foram confeccionados de acordo com o item 4.1.2 dos ensaios preliminares. Além disso, foram confeccionados corpos de prova para ensaios de determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, teor de umidade e densidade básica com a finalidade de caracterizar as espécies utilizadas, de acordo com a ABNT NBR 7190/1997.

4.2.2.1. Corpos de prova de Pinus taeda

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão e embutimento nos ensaios definitivos podem ser observados respectivamente nas Figuras 27 e 31.

4.2.2.2. Corpos de prova de Eucalipto citriodora

Para os ensaios com Eucalipto citriodora também foram confeccionados corpos de prova para verificação das resistências à compressão e ao embutimento ambos nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira. Os comprimentos dos corpos de prova para compressão foram os mesmos utilizados nos ensaios de compressão com Pinus taeda, com exceção aos corpos de compressão paralela que foram confeccionados com 9 cm de comprimento e seção transversal quadrada de 3 cm de lado, porque não foi possível romper um corpo de prova de compressão paralela na DARTEC com as dimensões descritas na ABNT NBR 7190/1997. Assim, optou-se por diminuir as dimensões dos corpos de prova padronizados segundo a ANBT NBR 7190/1997 nas mesmas proporções.

Os corpos de prova de Eucalipto citriodora para os ensaios de compressão paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira podem ser observados, nessa ordem, na Figura 35.

Os corpos de prova de Eucalipto citriodora para os ensaios de embutimento paralelo, inclinado à 45° e normal em relação às fibras da madeira, podem ser observados, nessa ordem, na Figura 36.

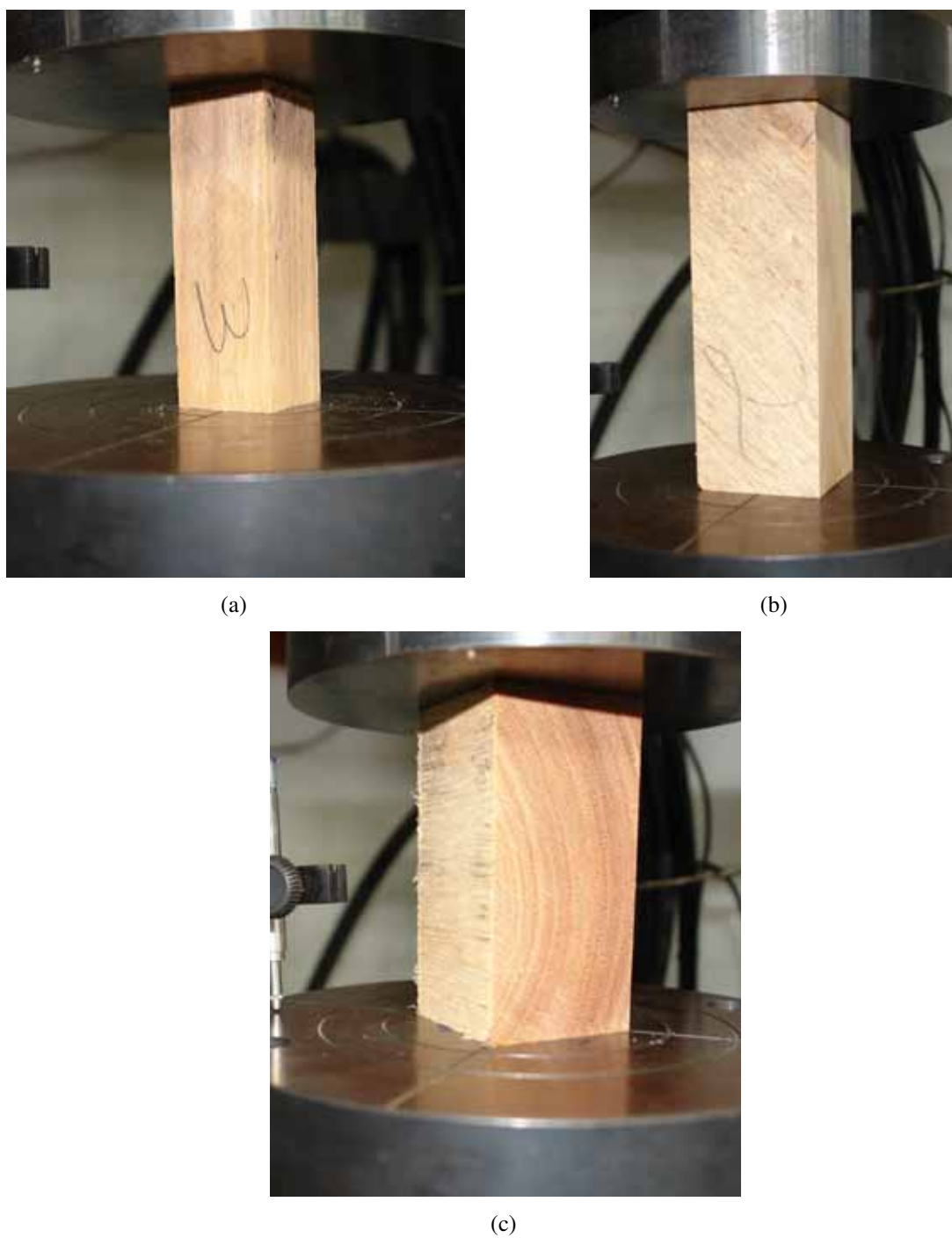


Figura 35: Corpos de prova de Eucalypto citriodora para ensaio de compressão (a) paralela, (b) inclinada à 45° e (c) normal em relação às fibras.

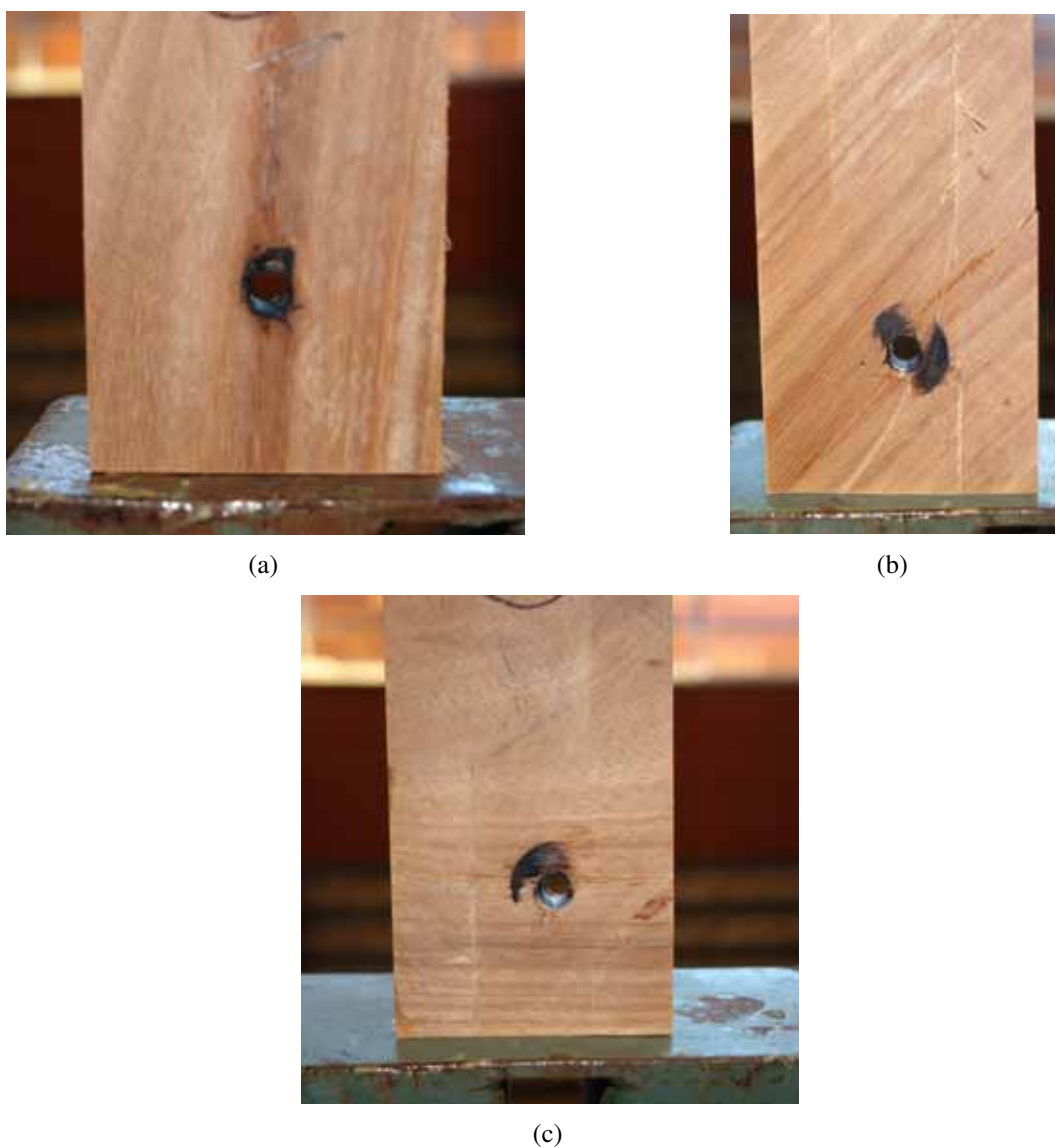


Figura 36: Corpos de prova de Eucalypto citriodora para ensaio de embutimento (a) paralelo, (b) inclinado à 45° e (c) normal em relação às fibras.

4.2.3. Métodos de ensaios

Apresenta-se neste item a metodologia utilizada nos ensaios definitivos para a verificação das resistências ao embutimento e compressão e também os ensaios para caracterização das espécies como resistência ao cisalhamento paralelo, teor de umidade e densidade básica.

4.2.3.1. Métodos de ensaios de compressão

Para ambas as espécies estudadas foram realizadas os mesmos métodos de ensaios utilizados nos ensaios preliminares. Porém, além da deformação fornecida pelo stroke da DARTEC, também considerou-se o LVDT (Figura 38), que fornece somente a deformação do corpo de prova.

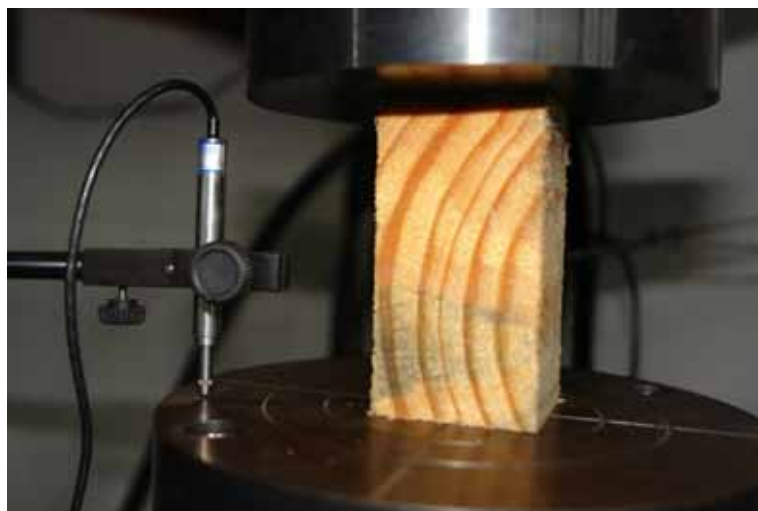


Figura 37: LVDT utilizado para determinação da deformação.

Para os ensaios de compressão normal às fibras da madeira a carga de ruptura foi estimada através da deformação de 2‰ no diagrama carga x deformação específica (Figuras 39 e 40).

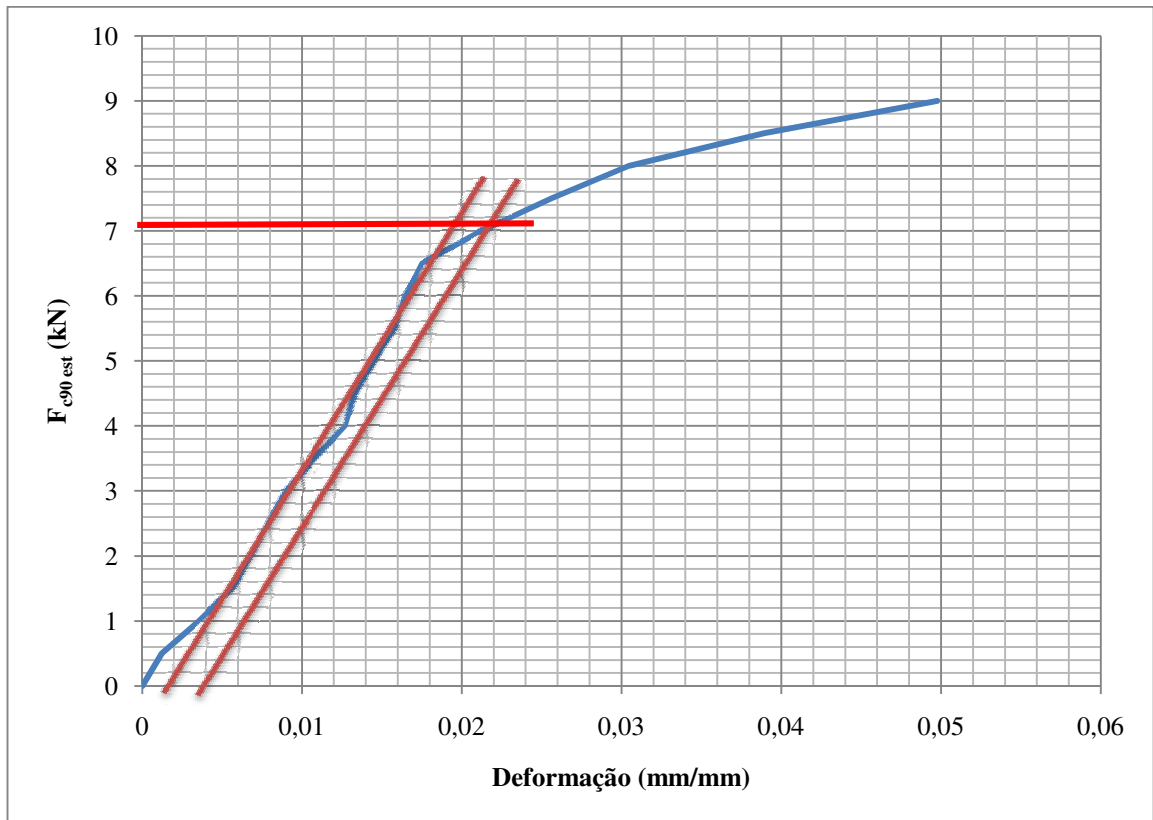


Figura 38: Diagrama para determinação da carga convencionada de compressão normal às fibras para Pinus taeda.

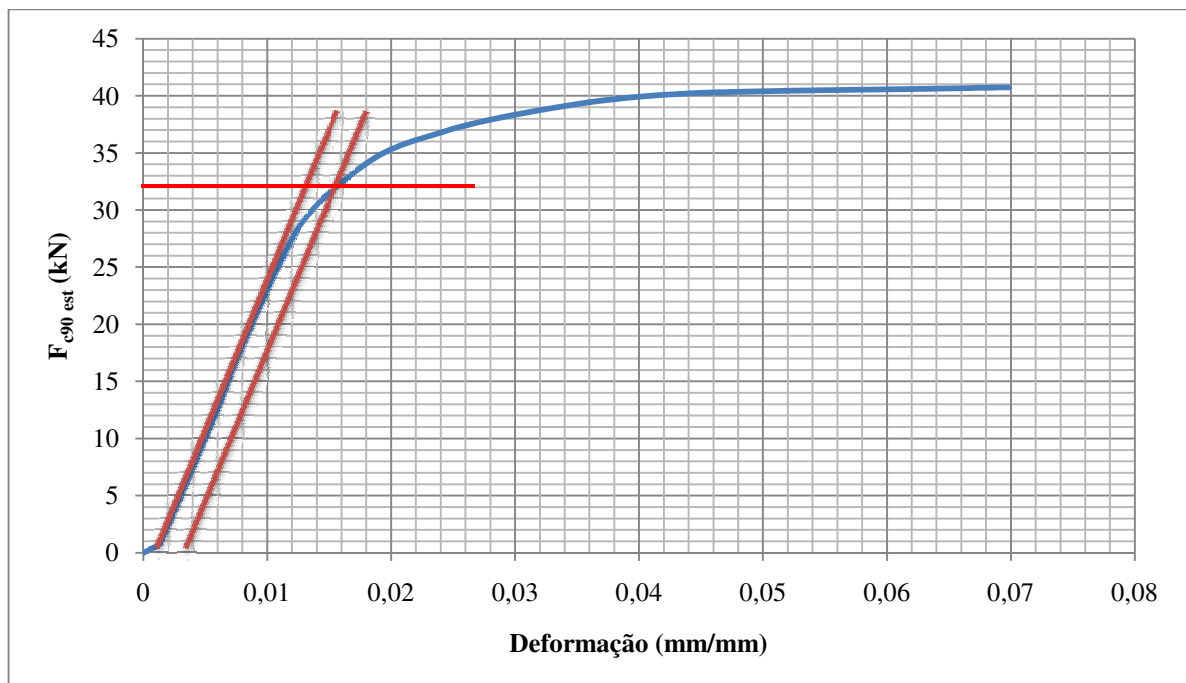


Figura 39: Diagrama para determinação da carga convencionada de compressão normal às fibras para Eucalipto citriodora.

4.2.3.2. Métodos de ensaios de embutimento

Para os ensaios de embutimento nas três direções estudadas, foram utilizados os mesmos procedimentos experimentais admitidos no item 4.1.3.2 dos ensaios preliminares com *Pinus taeda*, mas considerando-se agora, também, as deformações fornecidas pelo LVDT.

4.2.3.3. Métodos de ensaios de cisalhamento paralelo às fibras

Os ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foram realizados de acordo com o Apêndice B da ABNT NBR 7190/1997 (Figura 40).



Figura 40: Corpo de prova de Eucalipto citriodora para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

4.2.3.4. Métodos de ensaio de densidade básica e teor de umidade

Os ensaios para determinação da densidade básica das madeiras e dos seus teores de umidade (Figura 41) foram realizados de acordo com o Apêndice B da ABNT NBR 7190/1997.



Figura 41: Corpos de prova de densidade e umidade na estufa.

4.2.3.5. Métodos de ensaios de módulo de elasticidade paralelo às fibras

Os ensaios para determinação dos módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras das madeiras estudadas foram os mesmos descritos na seção 3.7 desse trabalho.

4.2.3.6. Análise estatística

As médias das resistências de embutimento e compressão determinadas nos ensaios definitivos foram divididas em seis grupos diferentes em uma mesma direção para cada espécie, em seguida as médias foram submetidas à análise estatística utilizando o software R. Foram realizados teste F e ANOVA entre as médias para descobrir se existiam diferenças significativas entre elas e, havendo diferenças significativas, foram realizados, respectivamente, testes t e Tukey ao nível de confiança de 95% para comparação entre elas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios preliminares e definitivos realizados neste trabalho.

5.1. Ensaaios preliminares

Os resultados dos ensaios preliminares foram os seguintes:

5.1.1. Ensaaios preliminares de compressão e embutimento

5.1.1.1. Ensaaios de compressão

Os resultados da resistência à compressão paralela dos corpos de prova e a resistência característica da madeira de *Pinus oocarpa*, *Cumaru* e *Pinus taeda*, segundo a ABNT NBR 7190/1997 e a EN 13377/2002, estão descritos, respectivamente, nas Tabelas 5, 6 e 7. Para os ensaios preliminares de compressão inclinada à 45° e normal para o *Pinus taeda* tem-se os resultados descritos nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 5: Resistência à compressão paralela do *Pinus oocarpa*.

Corpo de prova	f_{c0} (MPa)
1	33,40
2	31,84
3	30,83
4	33,54
5	37,09
6	40,35
Média	34,50
Desvio Padrão	3,56
$f_{c0,k}$	33,45

Tabela 6: Resistência à compressão paralela do Cumaru.

Corpo de prova	f_{c0} (MPa)
7	98,27
8	98,70
9	99,78
10	67,22
11	61,61
12	68,60
Média	82,36
Desvio Padrão	18,29
$f_{c0,k}$	71,37

Tabela 7: Resistência à compressão paralela do Pinus taeda (preliminar).

Corpo de prova	f_{c0} (MPa)
13	24,89
14	27,73
15	22,58
16	29,95
17	30,26
18	29,15
Média	27,42
Desvio Padrão	3,07
$f_{c0,k}$	26,27

Tabela 8: Resistência à compressão inclinada à 45° do Pinus taeda (preliminar).

Corpo de prova	f_{c45} (MPa)
19	7,37
20	8,04
21	5,70
22	7,50
23	7,56
24	7,47
Média	7,27
Desvio Padrão	0,80
$f_{c45,k}$	6,96

Tabela 9: Resistência à compressão normal do *Pinus taeda* (preliminar).

Corpo de prova	f_{c90} (MPa)
25	1,70
26	2,50
27	2,00
28	1,50
29	1,80
30	3,30
Média	2,13
Desvio Padrão	0,66
$f_{c90,k}$	1,69

5.1.1.2. Ensaios de embutimento

Os resultados da resistência ao embutimento paralelo às fibras das madeiras de *Pinus oocarpa*, *Cumaru* e *Pinus taeda* estão descritos, respectivamente, nas Tabelas 10, 11 e 12. Os resultados das Tabelas 13 e 14 referem-se, nessa ordem, aos ensaios preliminares de embutimento à 45° e normal para o *Pinus taeda*.

Tabela 10: Resistência ao embutimento paralelo do *Pinus oocarpa*.

Corpo de prova	f_{e0} stroke (MPa)
1	12,00
2	9,50
3	14,50
4	10,00
5	10,00
6	7,20
Média	10,53
Desvio Padrão	2,47
$f_{e0,k}$	9,03

Tabela 11: Resistência ao embutimento paralelo do Cumaru.

Corpo de prova	f_{e0} stroke (MPa)
7	84,00
8	82,00
9	63,00
10	70,00
11	64,00
12	80,00
Média	73,83
Desvio Padrão	9,35
$f_{e0,k}$	70,15

Tabela 12: Resistência ao embutimento paralelo do Pinus taeda (preliminar).

Corpo de prova	f_{e0} stroke (MPa)
13	23,00
14	23,00
15	19,50
16	30,50
17	20,80
18	26,00
Média	23,80
Desvio Padrão	3,96
$f_{e0,k}$	22,09

Tabela 13: Resistência ao embutimento inclinado à 45° do Pinus taeda (preliminar).

Corpo de prova	f_{e45} stroke (MPa)
19	12,00
20	9,00
21	11,20
22	12,00
23	9,20
24	10,80
Média	10,70
Desvio Padrão	1,32
$f_{e45,k}$	10,18

Tabela 14: Resistência ao embutimento normal do Pinus taeda (preliminar).

Corpo de prova	f_{e90} stroke (MPa)
25	7,20
26	8,00
27	9,60
28	10,40
29	6,00
30	8,80
Média	8,33
Desvio Padrão	1,61
$f_{e90,k}$	7,45

5.1.2. Modos de ruptura nos ensaios de embutimento e compressão com Pinus taeda

5.1.2.1. Ensaios de embutimento

Para o embutimento paralelo às fibras pode-se perceber que os modos de ruptura predominantes nos corpos de prova foram esmagamento (Figura 42) e também fendilhamento na direção das fibras (Figura 43).

**Figura 42:** Esmagamento da madeira de Pinus taeda em ensaio de embutimento paralelo.

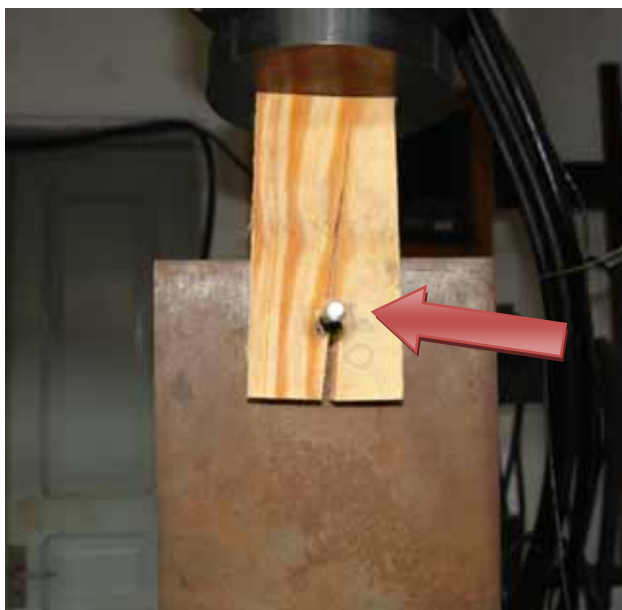


Figura 43: Fendilhamento na direção das fibras de Pinus taeda no ensaio de embutimento paralelo.

Para o embutimento normal às fibras o modo de ruptura observado foi o fendilhamento na direção das fibras (Figura 44).

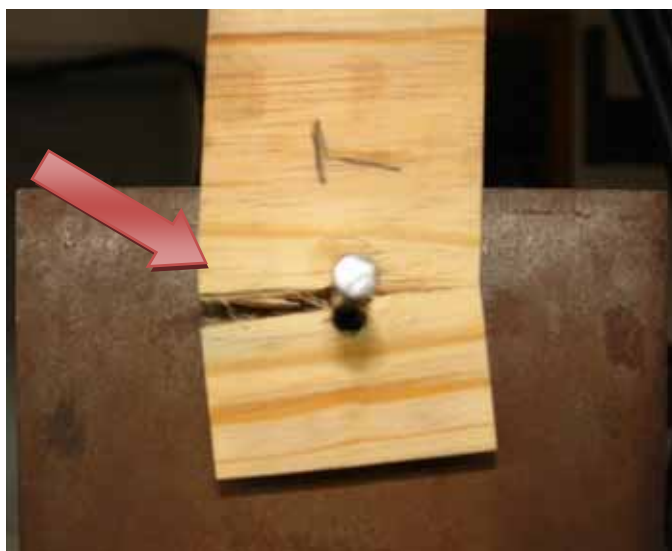


Figura 44: Fendilhamento na direção das fibras de Pinus taeda no ensaio de embutimento normal.

Para o embutimento inclinado às fibras o modo de ruptura observado foi apenas o fendilhamento na direção das fibras (Figura 45).

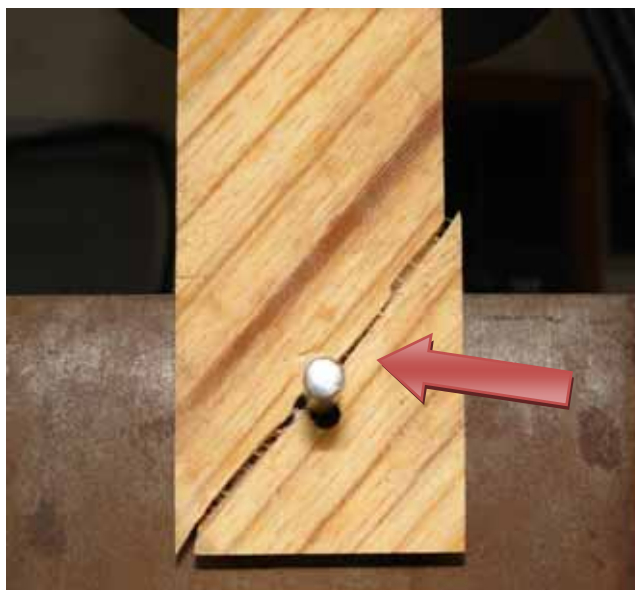


Figura 45: Fendilhamento na direção das fibras de *Pinus taeda* no ensaio de embutimento inclinado à 45° em relação às fibras.

5.1.2.2. Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão foram realizados nas três direções estudadas até a ruptura do corpo de prova. Nesses ensaios não foram observadas grandes mudanças nos corpos de prova após os ensaios terem ocorridos. Durante o carregamento foi observada a compressão dos corpos de prova nos ensaios de compressão normal (Figura 46) e compressão inclinada à 45° (Figura 47). Nos corpos de prova de compressão paralela não foi observada nenhuma mudança considerável (Figura 48). Isso se deve à madeira possuir maior resistência na direção paralela às fibras do que nas outras duas direções estudadas.

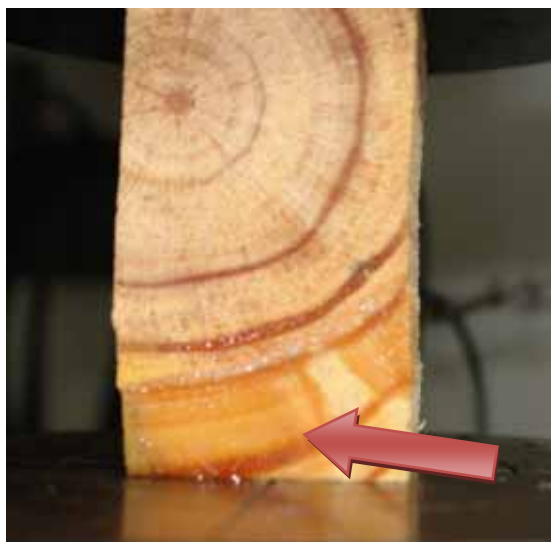


Figura 46: Compressão do corpo de prova Pinus taeda durante o ensaio de compressão normal às fibras.

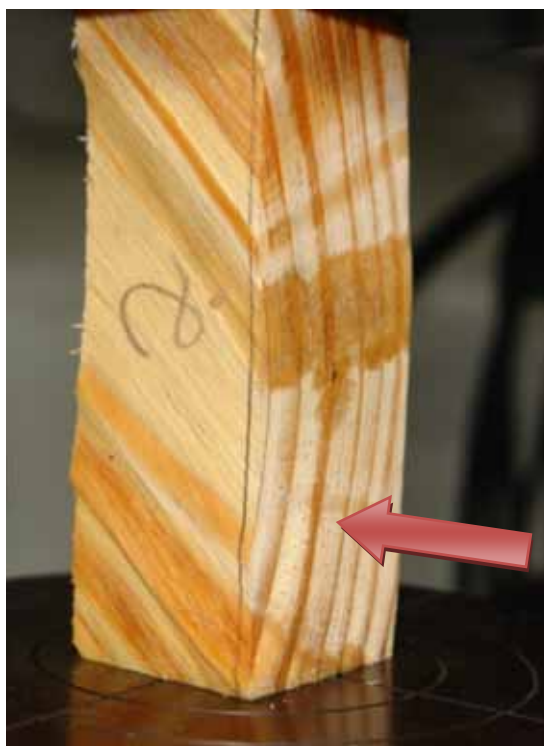


Figura 47: Deformação do corpo de prova de Pinus taeda durante o ensaio de compressão inclinada à 45° em relação às fibras.



Figura 48: Ensaio de compressão paralela às fibras de Pinus taeda sem deformações consideráveis.

5.2. Ensaaios definitivos

5.2.1. Caracterização das espécies estudadas

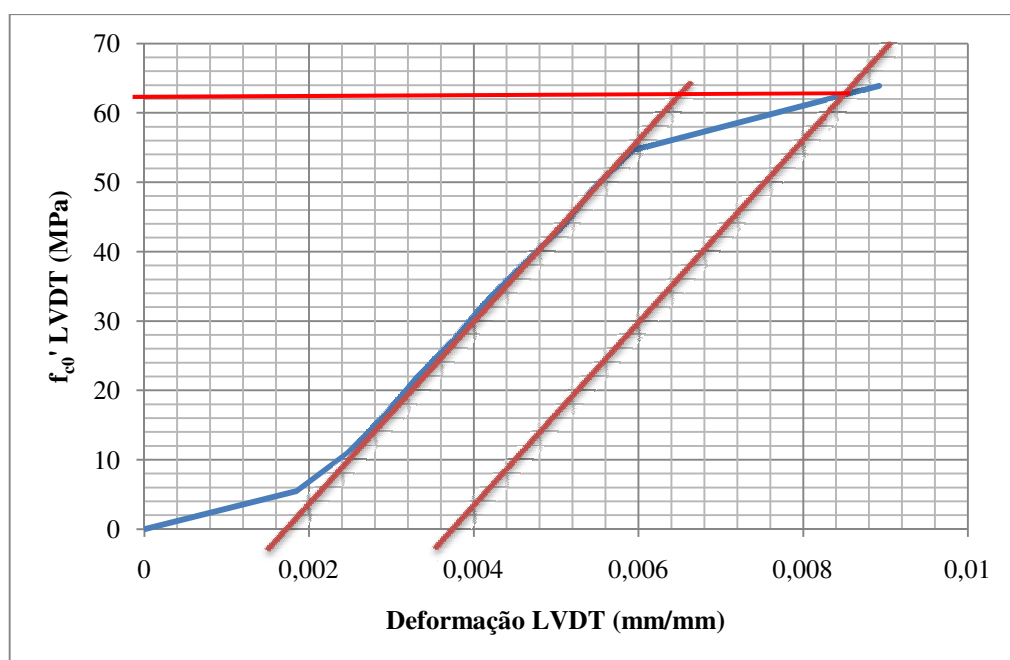
O teor de umidade, a densidade básica, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e os módulos de elasticidade determinados utilizando as deformações dos corpos de provas fornecidas pelo LVDT (E_{c0} LVDT) e pelo stroke (E_{c0} stroke) para as madeiras de Pinus taeda e de Eucalipto citriodora estão na Tabela 15.

Tabela 15: Valores médios das propriedades das madeiras de Pinus taeda e Eucalipto citriodora.

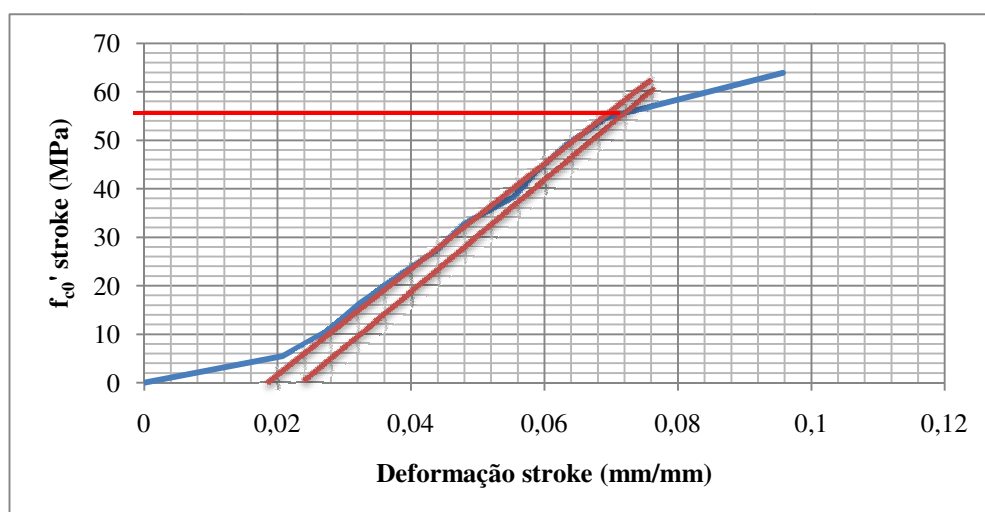
Espécie	TU (%)	$\rho_{bás}$ (kg/m ³)	f_v (MPa)	E_{c0} LVDT (MPa)	E_{c0} stroke (MPa)
Pinus taeda	86,65	520,00	7,65	2856,84	2827,11
Eucalipto citriodora	34,00	943,20	13,65	9735,77	898,55

5.2.2. Resultados dos ensaios de compressão

Para os ensaios de compressão paralela, inclinada à 45° e normal às fibras das madeiras de Pinus taeda e Eucalipto citriodora foram confeccionados os gráficos em relação à deformação medida pelo LVDT e stroke (Figura 49).



(a)



(b)

Figura 49: Deformação do corpo de prova de compressão paralela de Eucalipto citriodora considerando o (a) LVDT e o (b) stroke.

Após os ensaios, foram determinadas as resistências à compressão conforme a ABNT NBR 7190/1997, para as três direções estudadas, sendo que foram determinadas as resistências condicionadas na direção normal às fibras utilizando as deformações fornecidas pelo LVDT e pelo stroke, respectivamente (f_{c90} LVDT) e (f_{c90} stroke). Para as direções paralela e inclinada à 45° em relação às fibras foram determinadas as resistências à compressão convencionadas correspondente à deformação 2‰ nos diagramas carga x deformação específica considerando o LVDT (respectivamente (f_{c0} 'LVDT) e (f_{c45} 'LVDT)) e o stroke (respectivamente (f_{c0} 'stroke) e (f_{c45} 'stroke)). Além disso, também foi determinada a resistência última à compressão normal às fibras da madeira (f_{c90} ').

Os resultados da resistência à compressão paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da madeira segundo a ABNT NBR 7190/1997, condicionada nos gráficos de deformação pelo LVDT e stroke, a resistência última à compressão normal em relação às fibras e as respectivas resistências características segundo a EN 13377/2002 da madeira de Pinus taeda estão descritos nas Tabelas 16, 17 e 18. Para o Eucalipto citriodora os mesmos resultados estão nas Tabelas 19, 20 e 21.

Tabela 16: Resistências à compressão paralela do Pinus taeda.

Corpo de prova	f_{c0} (MPa)	f_{c0} ' LVDT (MPa)	f_{c0} ' stroke (MPa)
CP 1	26,74	25,00	25,00
CP 2	24,87	24,00	24,00
CP 3	21,40	19,50	19,50
CP 4	28,78	26,50	26,50
CP 5	19,04	19,00	19,00
CP 6	23,20	21,90	21,90
Média	24,00	22,65	22,65
Desvio Padrão	3,55	3,03	3,03
$f_{c0,k} / f_{c0,k}'$	22,53	21,46	21,46

Tabela 17: Resistências à compressão inclinada à 45° do Pinus taeda.

Corpo de prova	f_{c45} (MPa)	f_{c45}' LVDT (MPa)	f_{c45}' stroke (MPa)
CI 1	7,42	5,70	5,70
CI 2	5,26	4,35	4,35
CI 3	7,60	4,40	4,40
CI 4	7,15	4,30	4,30
CI 5	6,08	4,60	4,60
CI 6	7,45	5,60	5,60
Média	6,83	4,82	4,82
Desvio Padrão	0,94	0,65	0,65
$f_{c45,k} / f_{c45,k}'$	6,41	4,56	4,56

Tabela 18: Resistências à compressão normal do Pinus taeda.

Corpo de Prova	f_{c90}' (MPa)	f_{c90} LVDT (MPa)	f_{c90} stroke (MPa)
CN 1	2,26	1,60	1,60
CN 2	2,57	1,70	1,70
CN 3	3,20	2,30	2,30
CN 4	4,63	3,20	3,20
CN 5	2,79	1,90	1,90
CN 6	4,13	2,90	2,90
Média	3,26	2,27	2,27
Desvio Padrão	0,93	0,66	0,66
$f_{c90,k} / f_{c90,k}'$	2,62	1,81	1,81

Tabela 19: Resistências à compressão paralela do Eucalipto citriodora.

Corpo de prova	f_{c0} (MPa)	f_{c0}' LVDT (MPa)	f_{c0}' stroke (MPa)
CP 7	63,87	62,00	56,00
CP 8	69,75	68,00	56,00
CP 9	56,48	56,00	46,00
CP 10	63,02	69,00	48,00
CP 11	62,81	60,00	54,00
CP 12	60,94	60,00	46,00
Média	62,81	62,50	51,00
Desvio Padrão	4,31	5,05	4,85
$f_{c0,k} / f_{c0,k}'$	61,23	61,22	49,41

Tabela 20: Resistências à compressão inclinada à 45° do Eucalipto citriodora.

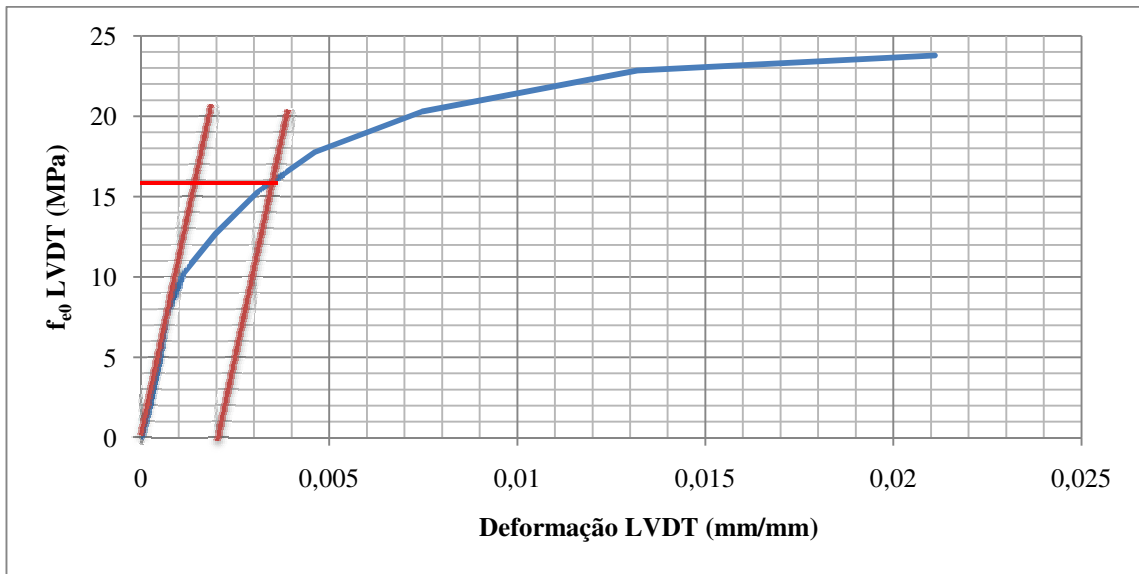
Corpo de Prova	f_{c45} (MPa)	f_{c45}' LVDT (MPa)	f_{c45}' stroke (MPa)
CI 7	19,52	15,70	14,70
CI 8	25,90	18,80	17,00
CI 9	26,79	20,00	17,00
CI 10	27,77	19,00	15,00
CI 11	25,78	19,00	15,00
CI 12	27,00	19,00	14,00
Média	25,46	18,58	15,45
Desvio Padrão	3,00	1,47	1,25
$f_{c45,k} / f_{c45,k}'$	18,58	18,15	15,10

Tabela 21: Resistências à compressão normal do Eucalipto citriodora.

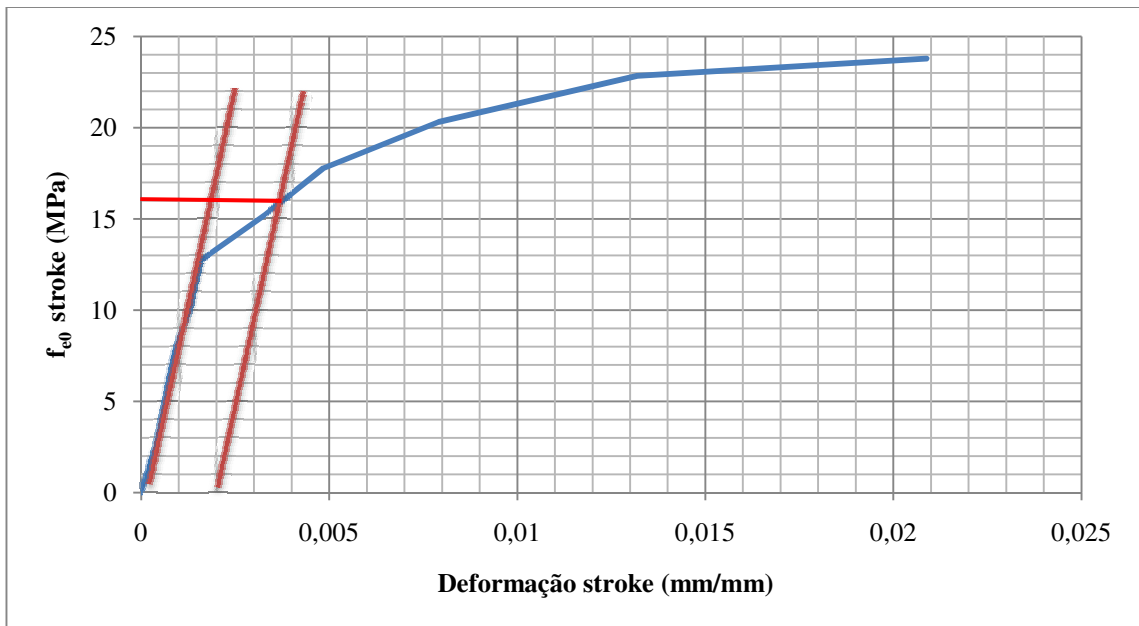
Corpo de prova	f_{c90} (MPa)	f_{c90} LVDT (MPa)	f_{c90} stroke (MPa)
CN 7	15,75	12,80	8,00
CN 8	19,92	14,00	13,50
CN 9	16,14	13,20	12,00
CN 10	19,68	14,00	10,20
CN 11	15,00	10,00	8,50
CN 12	18,66	12,80	12,00
Média	17,52	12,80	10,70
Desvio Padrão	2,15	1,47	2,17
$f_{c90,k} / f_{c90,k}'$	13,35	12,25	9,49

5.2.3. Resultados dos ensaios de embutimento

Foram confeccionados os gráficos em relação à deformação medida pelo LVDT e stroke para determinação das resistências ao embutimento das madeiras de Pinus taeda e Eucalipto citriodora segundo a ABNT NBR 7190/1997 (Figura 50) para a direção paralela (f_{e0} LVDT e f_{e0} stroke), inclinada à 45° (f_{e45} LVDT e f_{e45} stroke) e normal (f_{e90} LVDT e f_{e90} stroke) em relação às fibras.



(a)



(b)

Figura 50: Deformação do corpo de prova de embutimento paralelo de Pinus taeda considerando o (a) LVDT e o (b) stroke.

Foram determinadas as resistências ao embutimento segundo a EUROCODE 5 /1995 utilizando a força que caracteriza o deslocamento de 5 mm ou a força de ruptura antes dos 5 mm de deformação para as direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras (respectivamente f_{e0}' , f_{e45}' e f_{e90}'). Os resultados da resistência ao embutimento paralelo, inclinado à 45° e normal em relação às fibras segundo a ABNT NBR 7190/1997 através dos

gráficos das deformações LVDT e stroke, determinadas pela EUROCODE 5/1995 e as resistências características segundo a EN 13377/2002 da madeira de Pinus taeda estão descritos nas Tabelas 22, 23 e 24. Para o Eucalipto citriodora os mesmos resultados estão nas Tabelas 25, 26 e 27.

Tabela 22: Resistências ao embutimento paralelo do Pinus taeda.

Corpo de prova	f_{e0}' (MPa)	f_{e0} LVDT (MPa)	f_{e0} stroke (MPa)
EP 1	23,77	16,00	16,00
EP 2	28,66	22,00	22,00
EP 3	24,00	18,00	19,00
EP 4	30,38	24,00	24,00
EP 5	20,85	14,00	13,90
EP 6	31,10	24,00	23,00
Média	26,46	19,67	19,65
Desvio Padrão	4,16	4,27	4,06
$f_{e0,k} / f_{e0,k}'$	18,84	17,10	17,21

Tabela 23: Resistências ao embutimento inclinado à 45° do Pinus taeda.

Corpo de prova	f_{e45}' (MPa)	f_{e45} LVDT (MPa)	f_{e45} stroke (MPa)
EI 1	22,58	13,00	12,00
EI 2	22,59	11,70	12,80
EI 3	15,64	9,20	9,60
EI 4	17,53	8,40	8,40
EI 5	21,33	14,50	15,00
EI 6	29,00	17,00	17,50
Média	21,44	12,30	12,55
Desvio Padrão	4,66	3,24	3,37
$f_{e45,k} / f_{e45,k}'$	18,85	10,10	10,18

Tabela 24: Resistências ao embutimento normal do Pinus taeda.

Corpo de prova	f_{e90}' (MPa)	f_{e90} LVDT (MPa)	f_{e90} stroke (MPa)
EN 1	12,00	6,00	6,00
EN 2	12,40	6,60	6,60
EN 3	7,13	3,60	3,70
EN 4	5,80	2,80	2,80
EN 5	13,00	7,40	7,60
EN 6	17,86	10,00	9,60
Média	11,36	6,07	6,05
Desvio Padrão	4,36	2,62	2,50
$f_{e90,k} / f_{e90,k}'$	7,06	3,27	3,39

Tabela 25: Resistências ao embutimento paralelo do Eucalipto citriodora.

Corpo de prova	f_{e0}' (MPa)	f_{e0} LVDT (MPa)	f_{e0} stroke (MPa)
EP 7	77,92	68,00	66,00
EP 8	73,16	66,00	67,00
EP 9	78,60	68,0	68,00
EP 10	78,44	74,00	74,00
EP 11	79,81	74,00	72,00
EP 12	72,28	66,00	66,00
Média	76,70	69,33	68,83
Desvio Padrão	3,16	3,72	3,37
$f_{e0,k} / f_{e0,k}'$	74,55	68,61	68,12

Tabela 26: Resistências ao embutimento inclinado à 45° do Eucalipto citriodora.

Corpo de prova	f_{e45}' (MPa)	f_{e45} LVDT (MPa)	f_{e45} stroke (MPa)
EI 7	61,67	44,00	47,00
EI 8	73,07	64,00	62,00
EI 9	82,50	61,00	60,00
EI 10	84,76	55,00	56,00
EI 11	80,97	64,00	64,00
EI 12	68,65	54,00	55,00
Média	75,27	57,00	57,33
Desvio Padrão	9,04	7,69	6,12
$f_{e45,k} / f_{e45,k}'$	72,17	53,69	55,24

Tabela 27: Resistências ao embutimento normal do Eucalipto citriodora.

Corpo de prova	f_{e90}' (MPa)	f_{e90} LVDT (MPa)	f_{e90} stroke (MPa)
EN 7	75,62	53,00	55,00
EN 8	91,68	54,00	54,00
EN 9	83,24	72,00	73,00
EN 10	90,83	52,00	48,00
EN 11	76,19	72,00	74,00
EN 12	76,85	54,00	54,00
Média	82,41	59,50	59,67
Desvio Padrão	7,39	9,71	11,00
$f_{e90,k} / f_{e90,k}'$	80,64	55,36	54,29

5.2.4. Resultados da análise estatística

A análise de variância realizada entre as médias dos módulos de elasticidade paralelo às fibras da madeira de *Pinus taeda* ($F_5=1,1522$; $p>0,05$) utilizando o LVDT e o stroke não acusou diferenças significativas entre elas e de acordo com o teste t realizado, esses módulos de elasticidade não diferem significativamente entre si. Para o *Eucalypto citriodora*, a análise de variância ($F_5=314,0753$; $p<0,05$) acusou diferenças significativas entre as médias e, à partir do teste t foi possível determinar que existe diferença significativa entre os módulos de elasticidade paralelos às fibras determinados utilizando as deformações fornecidas pelo LVDT e pelo stroke.

A diferença significativa entre as médias dos módulos de elasticidade paralelos às fibras da madeira do *Eucalypto citriodora* determinados pode ser explicada pela diferença entre as deformações dos corpos de provas fornecidas pelo LVDT e pelo stroke. Quando se considera o stroke, a deformação do sistema de ensaio também é levada em consideração obtendo deformação maior do que a deformação apenas dos corpos de prova. Nesse caso sendo o *Eucalypto citriodora* uma madeira densa a diferença entre as deformações proferidas pelo LVDT e pelo stroke ficaram mais evidenciadas sendo que o mesmo não ocorreu com o *Pinus taeda* que é uma madeira menos densa. Para as comparações entre as médias para determinação das resistências ao embutimento e à compressão nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalypto citriodora* foi realizado o teste Tukey.

A análise de variância entre as médias dos ensaios de compressão e embutimento realizados na direção paralela em relação às fibras da madeira de *Pinus taeda* ($F_{5,30} = 2,959$; $p<0,05$) mostrou que há diferença significativa entre elas. A Tabela 28 mostra as médias de cada ensaio de resistência realizado na direção paralela em relação às fibras da madeira de *Pinus taeda* e as comparações entre as médias através do teste Tukey.

Pela análise da Tabela 28 podemos perceber que não houve diferenças significativas entre as médias das resistências de compressão e embutimento determinadas através da ABNT NBR 7190/1997. As médias para resistência à compressão determinadas de acordo com a ABNT NBR 7190/1997 e condicionada à 2‰ considerando as deformações fornecidas pelo LVDT e pelo stroke também não diferiam significativamente. As médias das

resistências ao embutimento paralelo às fibras determinadas pela norma brasileira considerando as deformações pelo LVDT e stroke não possuem diferenças significativas, porém, comparando-se as resistências ao embutimento determinadas pela norma brasileira e pela norma europeia essas sim possuem diferenças significativas entre suas médias.

Tabela 28: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção paralela às fibras da madeira de Pinus taeda.

Ensaio	Média (MPa)	Comparações
f_{c0}	24,00	abc
f_{c0}' LVDT	22,65	abc
f_{c0}' stroke	22,65	abc
f_{e0} LVDT	19,67	ab
f_{e0} stroke	19,65	a
f_{e0}'	26,46	c

A análise de variância entre as médias dos ensaios de compressão e embutimento realizados na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Pinus taeda ($F_{5,30}=32,566$; $p<0,05$) mostrou que há diferença significativa entre elas. A Tabela 29 mostra as médias de cada ensaio de resistência realizado na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Pinus taeda e as comparações entre as médias através do teste Tukey.

Através da Tabela 29 pode-se perceber que não existem diferenças significativas entre as médias dos ensaios de compressão determinadas segundo a ABNT NBR 7190/1997 e as resistências condicionadas à 2% considerando as deformações fornecidas pelo LVDT e pelo stroke e, também, entre as resistências condicionadas não há diferença significativa. Também podemos perceber que existem diferenças significativas entre as resistências de compressão e embutimento na direção inclinada à 45° para a madeira de Pinus taeda. As resistências ao embutimento determinadas pelo método da ABNT NBR 7190/1997 considerando o LVDT e o stroke não possuem diferenças significativas em relação às suas médias, porém, as duas diferem da resistência ao embutimento determinado pela EUROCODE 5/1995.

Tabela 29: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Pinus taeda.

Ensaio	Média (MPa)	Comparações
f_{c45}	6,83	a
f_{c45}' LVDT	4,82	a
f_{c45}' stroke	4,82	a
f_{e45} LVDT	12,30	b
f_{e45} stroke	12,55	b
f_{e45}'	21,44	c

A análise de variância entre as médias dos ensaios de compressão e embutimento realizados na direção normal às fibras da madeira de Pinus taeda ($F_{5,30}=12,829$; $p<0,05$) mostrou que há diferença significativa entre elas. A Tabela 30 mostra as médias de cada ensaio de resistência realizado na direção normal às fibras da madeira de Pinus taeda e as comparações entre as médias através do teste Tukey.

Através da análise do teste Tukey descrito na Tabela 30, podemos perceber que não existem diferenças significativas entre os modos para determinação de resistência à compressão. Também não há diferenças significativas entre as resistências de compressão e embutimento na direção normal às fibras da madeira de Pinus taeda. As médias das resistências de embutimento normal às fibras da madeira de Pinus taeda calculadas pelo método da EUROCODE 5/1995 e ABNT NBR 7190/1997 diferem significativamente. As médias determinadas para a resistência ao embutimento pela ABNT NBR 7190/1997 considerando o LVDT e o stroke não diferem significativamente.

Tabela 30: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção normal às fibras da madeira de Pinus taeda.

Ensaio	Média (MPa)	Comparações
f_{c90}'	3,26	a
f_{c90} LVDT	2,27	a
f_{c90} stroke	2,27	a
f_{e90} LVDT	6,07	a
f_{e90} stroke	6,05	a
f_{e90}'	11,36	b

A análise de variância entre as médias dos ensaios de compressão e embutimento realizados na direção paralela às fibras da madeira de Eucalypto citriodora ($F_{5,30}= 26,397$; $p<0,05$) mostrou que há diferença significativa entre elas. A Tabela 31 mostra as médias de

cada ensaio de resistência realizado na direção paralela às fibras da madeira de Eucalipto citriodora e as comparações entre as médias através do teste Tukey.

Através das comparações realizadas através do teste Tukey descritos na Tabela 31 é possível determinar que não existe diferença significativa entre as médias das resistências à compressão paralela às fibras determinadas pelo método da ABNT NBR 7190/1997 e condicionadas à 2‰ considerando a deformação fornecida pelo LVDT, porém essas duas médias diferem em relação à média de resistência à compressão condicionada à 2‰ quando se considera a deformação fornecida pelo stroke, essa diferença entre as médias pode ser devida à madeira do Eucalipto citriodora ser densa e a deformação do sistema de ensaio foi maior nesse caso. Excetuando-se a resistência condicionada à 2‰ considerando o stroke, as médias das resistências à compressão e embutimento na direção paralela às fibras da madeira de Eucalipto citriodora não possuem diferenças significativas entre si. As resistências ao embutimento determinadas pela ABNT NBR 7190/1997 considerando o LVDT e o stroke não diferiam significativamente, porém, ambas diferiram quando comparadas com a média determinada pela EUROCODE 5/1995.

Tabela 31: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção paralela às fibras da madeira de Eucalipto citriodora.

Ensaio	Média (MPa)	Comparação
f_{c0}	62,81	a
f_{c0}' LVDT	62,50	a
f_{c0}' stroke	51,00	b
f_{e0} LVDT	69,33	a
f_{e0} stroke	68,83	a
f_{c0}'	76,70	c

A análise de variância entre as médias dos ensaios de compressão e embutimento realizados na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Eucalipto citriodora ($F_{5,30} = 116,5$; $p < 0,05$) mostrou que há diferença significativa entre elas. A Tabela 32 mostra as médias de cada ensaio de resistência realizado na direção paralela às fibras da madeira de Eucalipto citriodora e as comparações entre as médias através do teste Tukey.

Analisando a Tabela 32 podemos analisar que não existem diferenças significativas entre as médias determinadas para a resistência à compressão inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Eucalipto citriodora. As médias dos métodos para determinação da

resistência ao embutimento paralelo utilizando a ABNT NBR 7190/1997 não diferiram entre si. A comparação das resistências ao embutimento e à compressão na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira do Eucalipto citriodora teve diferenças significativas quando comparadas pelo teste de Tukey. Houve diferenças significativas entre as médias dos ensaios de embutimento quando comparadas as médias determinadas pelo método da ABNT NBR 7190/1997 e pelo método da EUROCODE 5/1995.

Tabela 32: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção inclinada à 45° em relação às fibras da madeira de Eucalipto citriodora.

Ensaio	Média (MPa)	Comparação
f_{c45}	25,46	a
f_{c45}' LVDT	18,58	a
f_{c45}' stroke	15,45	a
f_{e45} LVDT	57,00	b
f_{e45} stroke	57,33	b
f_{e45}'	75,27	c

A análise de variância entre as médias dos ensaios de compressão e embutimento realizados na direção normal às fibras da madeira de Eucalipto citriodora ($F_{5,30}=119,36$; $p < 0,05$) mostrou que há diferença significativa entre elas. A Tabela 33 mostra as médias de cada ensaio de resistência realizado na direção normal às fibras da madeira de Eucalipto citriodora e as comparações entre as médias através do teste Tukey.

Através da análise das comparações da Tabela 33 podemos analisar que não houve diferenças significativas entre a resistência última à compressão normal às fibras e às resistências determinadas pela ABNT NBR 7190/1997 considerando o LVDT e o stroke. Também não houve diferenças significativas entre as médias das resistências ao embutimento determinadas pela ABNT NBR 7190/1997 considerando o LVDT e o stroke. As médias de resistência à compressão e ao embutimento na direção normal diferiram significativamente e, também, houve diferenças significativas quando comparadas as resistências ao embutimento determinadas pela norma brasileira e a norma europeia.

Tabela 33: Teste Tukey para as médias de resistências de compressão e embutimento na direção normal às fibras da madeira de Eucalipto citriodora.

Ensaio	Média (MPa)	Comparação
f_{c90}'	17,52	a
f_{c90} LVDT	12,80	a
f_{c90} stroke	10,70	a
f_{e90} LVDT	59,50	b
f_{e90} stroke	59,67	b
f_{e90}'	82,41	c

6. CONCLUSÃO

Nos ensaios preliminares de embutimento e compressão, o Cumaru obteve os maiores valores de resistência em ambos. Nos ensaios de compressão paralela às fibras o Pinus oocarpa obteve maior resistência que o Pinus taeda e, ao contrário ocorreu nos ensaios de embutimento paralelo às fibras.

A partir dos ensaios preliminares foi possível determinar os modos de ruptura dos corpos de prova de embutimento e compressão nas direções paralela, inclinada à 45° e normal em relação às fibras da espécie Pinus taeda. O modo de ruptura predominante nos ensaios de embutimento foi o fendilhamento na direção das fibras da madeira. Para a compressão observou-se somente o esmagamento do corpo de prova.

Nos ensaios definitivos de compressão e embutimento foi observado, em alguns casos, diferenças entre as deformações dos corpos de prova quando se considerava o LVDT e o stroke. Essas diferenças foram maiores nos ensaios com Eucalipto citriodora e isso pode ser devido à madeira dessa espécie ser mais densa que a madeira da espécie Pinus taeda proporcionando maior deformação do sistema de ensaio.

Foram determinados os módulos de elasticidade na direção paralela às fibras para caracterização das espécies utilizadas nos ensaios definitivos utilizando as deformações determinadas pelo LVDT e pelo stroke. Segundo a análise estatística, para o Pinus taeda não houve diferença significativa entre as médias dos módulos de elasticidade paralelos às fibras. Para o Eucalipto citriodora, as médias dos módulos de elasticidade determinados pelos dois métodos diferiram estatisticamente entre si.

Para os ensaios de compressão com Pinus taeda e Eucalipto citriodora nas três direções estudadas, a maior resistência foi determinada na direção paralela, depois na direção inclinada à 45° e por último na direção normal às fibras da madeira.

Nos ensaios de compressão com Pinus taeda e Eucalipto citriodora as resistências à compressão nas direções paralela, inclinada à 45° e normal às fibras condicionadas à 2% utilizando as deformações proferidas pelo LVDT e pelo stroke não diferiram significativamente das resistências determinadas pela método da ABNT NBR 7190/1997, excetuando-se as comparações entre as médias determinadas para a compressão paralela às fibras da madeira de Eucalipto citriodora .

A análise estatística também mostrou que não houve diferenças entre as médias das resistências à compressão condicionadas à 2‰ considerando o LVDT e o stroke nas três direções estudadas para a madeira de Pinus taeda. Para o Eucalipto citriodora, somente na direção paralela às fibras as médias diferiram significativamente.

Em relação aos resultados dos ensaios de compressão normal às fibras da madeira das espécies Pinus taeda e Eucalipto citriodora, conclui-se que foram equivalentes, do ponto de vista estatístico, as médias das resistências últimas e as condicionadas à 2‰ .

Para a espécie Pinus taeda não houve diferenças significativas entre as médias das resistências ao embutimento e à compressão determinadas pela ABNT NBR 7190/1997 nas três direções estudadas. Para o Eucalipto citriodora houve diferenças significativas entre as médias dos ensaios de compressão e embutimento determinadas pela ABNT NBR 7190/1997 nas direções inclinada à 45° e normal às fibras, sendo que, na direção paralela não houveram diferenças do ponto de vista estatístico.

Não houve diferenças significativas entre as médias das resistências ao embutimento determinadas pela ABNT NBR 7190/1997 considerando o LVDT e o stroke nas três direções estudadas para ambas as espécies utilizadas nos ensaios definitivos.

Para todos os ensaios de embutimento realizados nas três direções estudadas, não houve nenhuma igualdade entre as médias, considerando a análise estatística, das resistências determinadas pelo método da ABNT NBR 7190/1997 e pela EUROCODE 5/1995, sendo que isso se deve aos modos diferentes de determinação da resistência ao embutimento.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- A realização de uma análise numérica dos comportamentos das resistências ao embutimento e de compressão nas direções estudadas nesse trabalho considerando a não linearidade física dos materiais dos corpos de prova;
- Verificação dos corpos de prova utilizados para os ensaios de embutimento e de compressão segundo a EUROCODE 5/1995 para determinação das resistências aos embutimento e à compressão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.

DUARTE, R. S. **Avaliação do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em vigas de MLC**. 2004. 231 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13377**: Prefabricated timber formwork beams. requirements, classification and assessment. Bruxelas: CEN, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of timber structures – Parte 1 - 1: general rules and rules for buildings. Bruxelas: CEN, 1995.

FERNÁNDEZ, B. O. **Sistemas de treliças modulares para pontes de madeira: uma boa alternativa para o Estado do Pará**. 2010. 132 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

MOLINA, J. C. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes**. 2008. 269 f. Tese (doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

OLIVEIRA, M. A. M. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira**. 2001. 119 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PFEIL, W.; PFEIL, M. S. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

9. REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

CALIL JUNIOR, C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo.** 208 p. São Paulo: PINI, 2010.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **WOOD HANDBOOK - Wood as an engineering material.** Madison: WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 463p., 1999.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections.** International Association for Bridge and Structural Engineering. Zurich. vol. 9. p. 249-262. 1949.

MANRÍQUEZ, M. F; MORAES, P. D. Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento do Paricá. In: XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. **Anais...** Londrina: 2008. 13 p.

MOLITERNO, A. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira.** 3. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2009.

MORALES, E. A. M. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira: proposta para simplificação de procedimentos metodológicos.** 2002. 112 f. Dissertação (mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Departamento de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SILVA, C. C. **Análise teórica e experimental de vigas de madeira de seção transversal I para uso em fôrmas para concreto.** 2010. 100 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SILVA, W. **O teste de tukey no software R: uma nova abordagem via linguagem C++.** 2003. 78 f. Monografia (graduação em Ciência da Computação) – Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

SOUZA, F. **Propriedades mecânicas, físicas, biológicas e avaliação não-destrutiva de painéis de lâminas paralelas (LVL) com madeira de *Pinus oocarpa* EP. *kesiya*.** 2009. 133 f.

Dissertação (mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

STAMATO, G. C. **Resistência ao embutimento da madeira compensada.** 1998. 135 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

STAMATO, G. C. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada.** 2002. 158 f. Tese (doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.