



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS REFERÊNCIAS
NORMATIVAS PARA O DIMENSIONAMENTO DE
LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM MADEIRA**

ORIENTANDO:

Elbio Silva Oliveira

ORIENTADORA:

Profª. Ângela do Valle, Drª.

Florianópolis, Novembro de 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS REFERÊNCIAS NORMATIVAS PARA O DIMENSIONAMENTO
DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM MADEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, a ser defendido pelo aluno Elbio Silva Oliveira, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profª. Ângela do Valle, Drª.

Florianópolis, Novembro de 2008.

ELBIO SILVA OLIVEIRA

DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM MADEIRA: COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Profª. Lia Caetano Bastos, Drª.

Coordenadora do curso de Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

Profª. Ângela do Valle, Drª.

(Orientadora)

Prof. Carlos Alberto Szücs, Dr.

Profª. Poliana Dias de Moraes, Drª.

Florianópolis, Novembro de 2008.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio para que me tornasse o que sou hoje.

Aos meus grandes amigos Diego Rabelo, Diego Lenz, Fernanda, Jefferson, Luana, Luciane e Thiago, dentre tantos outros, que há anos estão do meu lado suportando dias de irritação por noites mal dormidas, mudanças drásticas de humor, ausências, mas que também dividiram e compartilharam grandes momentos de minha vida.

Aos meus colegas de curso, com quem muito aprendi, não somente sobre a Engenharia, mas também sobre a vida.

A todos os professores por quem passei, pois me forneceram a base de tudo que sei, e me deram algo que nunca ninguém vai conseguir me tirar: o conhecimento.

À professora Ângela do Valle, pelo grande auxílio e orientação neste um ano e meio em que convivemos.

À professora Poliana Dias de Moraes que me ajudou em momentos de dúvidas.

Ao professor Carlos Alberto Szücs, que além dos ensinamentos e vivência, forneceu as madeiras para a realização dos estudos de caracterização.

Ao Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira – GIEM – e ao Laboratório de Experimentação em Estruturas – LEE – por fornecerem a infra-estrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas do GIEM que acompanharam e auxiliaram no meu desenvolvimento, seja com o conhecimento ou com palavras amigas na hora certa.

Ao Eng. Rodrigo Figueiredo Terezo e a Arq^a. Rute Ângela Driemeyer que me aconselharam em vários momentos da pesquisa, além da amizade compartilhada neste tempo de vivência.

Um agradecimento muito especial ao meu amigo Eng. Manuel Jesús Manríquez Figueroa, cujo auxílio foi inestimável para meu trabalho. Agradeço pelos artigos, pelas dicas, pelas horas gastas comigo na execução de meus ensaios, pelas brincadeiras, enfim, por toda a ajuda incondicional. Obrigado.

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre os ombros de gigantes!”

(Isaac Newton)

RESUMO

A idéia desta pesquisa surgiu devido a um impasse em dimensionamentos de ligações parafusadas em madeiras. Isto se deve ao fato de que a atual norma de projetos em madeira (NBR 7190: 1997) apresenta, para o dimensionamento de uma ligação parafusada em madeira, um número de parafusos, segundo alguns pesquisadores, superior ao valor apresentado pela antiga norma (NB-11: 1951).

Esta monografia visa, então, apresentar os resultados obtidos com a comparação entre os dimensionamentos de ligações parafusadas em uma treliça de madeira, por três metodologias distintas: O método apresentado pela NB-11: 1951, o método apresentado pela NBR 7190: 1997 e o método do Eurocode 5: 2004.

Esta pesquisa tem por objetivo determinar se realmente há um aumento significativo do número de conectores metálicos obtidos pelo dimensionamento da atual norma brasileira NBR 7190: 1997 em comparação com os critérios das normas NB-11: 1951 e Eurocode 5: 2004 (EC5: 2004). Caso esta hipótese se confirme, tentar-se-á localizar o Parâmetro que influencia em tal aumento, a fim de verificar se a alteração deste traria efeito significativo a algum princípio de segurança e economia.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMENTOS..... | III |
| RESUMO..... | IV |
| SUMÁRIO | V |
| LISTA DE FIGURAS..... | VII |
| LISTA DE TABELAS..... | IX |
| 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS E METODOLOGIA..... | 3 |
| 2.1. OBJETIVO GERAL | 3 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 2.3. METODOLOGIA DA PESQUISA | 4 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 3.1. ESTRUTURA DA MADEIRA | 8 |
| 3.2. A MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO | 10 |
| 3.3. CRITÉRIOS DE PROJETO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS | 11 |
| 3.3.1. NB-11: 1951 | 11 |
| 3.3.2. NBR 7190: 1997..... | 17 |
| 3.3.3. EC5: 2004 | 21 |
| 4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO PINUS TAEDA..... | 28 |
| 4.1. MATERIAL | 28 |
| 4.2. AMOSTRAGEM E CORPOS-DE-PROVA..... | 29 |
| 4.2.1. <i>Ensaio do teor de umidade da madeira e massa específica</i> | 30 |
| 4.2.2. <i>Ensaio de compressão paralela às fibras</i> | 30 |
| 4.2.3. <i>Ensaio de embutimento paralelo às fibras – NBR 7190: 1997</i> | 31 |
| 4.2.4. <i>Ensaio de embutimento paralelo às fibras – EC5: 2004</i> | 32 |
| 4.2.5. <i>Ensaio de embutimento perpendicular às fibras – EC5: 2004</i> | 33 |
| 4.3. ENSAIO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA | 34 |
| 4.3.1. <i>Metodologia do ensaio</i> | 35 |
| 4.3.2. <i>Realização do ensaio</i> | 35 |
| 4.3.3. <i>Resultados</i> | 37 |
| 4.4. ENSAIO DE MASSA-ESPECÍFICO APARENTE DA MADEIRA | 37 |
| 4.4.1. <i>Metodologia do ensaio</i> | 38 |
| 4.4.2. <i>Realização do ensaio</i> | 38 |
| 4.4.3. <i>Resultados</i> | 39 |
| 4.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DA MADEIRA | 39 |
| 4.5.1. <i>Metodologia do ensaio</i> | 40 |
| 4.5.2. <i>Realização do ensaio</i> | 40 |
| 4.5.3. <i>Resultados</i> | 42 |
| 4.6. ENSAIO DE EMBUTIMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA..... | 43 |
| 4.6.1. <i>Metodologia do ensaio – NBR 7190: 1997</i> | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 4.6.2. <i>Realização do ensaio – NBR 7190: 1997</i> | 44 |
| 4.6.3. <i>Resultados – NBR 7190: 1997</i> | 46 |
| 4.6.4. <i>Metodologia do ensaio – EC5: 2004</i> | 47 |
| 4.6.5. <i>Realização do ensaio – EC5: 2004</i> | 48 |
| 4.6.6. <i>Resultados – EC5: 2004</i> | 49 |
| 4.7. ENSAIO DE EMBUTIMENTO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DA MADEIRA..... | 51 |
| 4.7.1. <i>Metodologia do ensaio – EC5: 2004</i> | 51 |
| 4.7.2. <i>Realização do ensaio – EC5: 2004</i> | 51 |
| 4.7.3. <i>Resultados – EC5: 2004</i> | 53 |
| 4.8. ENSAIO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS | 54 |
| 5. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES..... | 58 |
| 5.1. LIGAÇÕES SOLICITADAS PARALELAMENTE ÀS FIBRAS DA MADEIRA | 65 |
| 5.2. LIGAÇÕES SOLICITADAS PERPENDICULARMENTE ÀS FIBRAS DA MADEIRA..... | 67 |
| 5.3. LIGAÇÕES SOLICITADAS A 65° COM RELAÇÃO ÀS FIBRAS DA MADEIRA..... | 70 |
| 5.4. ANÁLISES DE RUPTURA POR FLEXÃO DOS PARAFUSOS..... | 71 |
| 5.5. RESULTADOS DO NÚMERO DE PARAFUSOS..... | 75 |
| 5.6. ENSAIO PARA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES | 77 |
| 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES..... | 80 |
| 7. RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 86 |
| 7.1. RECOMENDAÇÕES DE PESQUISA | 86 |
| 7.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 86 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 88 |
| ANEXOS | 90 |
| ANEXO A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS..... | 90 |
| ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EMBUTIMENTO PARALELO ÀS FIBRAS – NBR 7190: 1997..... | 90 |
| ANEXO C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EMBUTIMENTO PARALELO ÀS FIBRAS – EC5: 2004 | 90 |
| ANEXO D – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EMBUTIMENTO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS – EC5: 2004 | 90 |
| ANEXO E – RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS LIGAÇÕES | 90 |
| ANEXO F – RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA PROPOSTA..... | 90 |
| ANEXO G – RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES DA ESTRUTURA..... | 90 |
| ANEXO H – QUANTIFICAÇÃO DAS CARGAS DE UMA ESTRUTURA | 90 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 – Jequitibá branco. Fonte: < http://arvores.cjb.net >, com acesso em 27/10/2008. | 8 |
| Figura 3.2 - Corte transversal de um tronco de árvore. Fonte: COSTA, 2001. | 10 |
| Figura 3.3 - Ábacos de dimensionamento de ligações parafusadas pela NB-11. Fonte: PFEIL, 1994. | 12 |
| Figura 3.4 - Modelo de ligação parafusada de corte duplo. Fonte: PFEIL, 1994. | 14 |
| Figura 3.5 - Gráfico da interpolação dos valores de η e α_e | 15 |
| Figura 3.6 - Modelo de ligação com solicitação inclinada. Fonte: MOLITERNO, 1981. | 16 |
| Figura 3.7 - Modelo de cálculo da resistência da ligação parafusada. Fonte: NBR 7190: 1997. | 17 |
| Figura 3.8 - Espessura convencional para um plano de corte. Fonte NBR 7190: 1997. | 20 |
| Figura 3.9 - Espessura convencional para dois planos de corte. Fonte NBR 7190: 1997. | 20 |
| Figura 3.10 - Momento de plastificação do parafuso. Fonte AITIM, 2000. | 21 |
| Figura 3.11 - Tipos de solicitações de corte no parafuso. Fonte: AITIM, 2000. | 22 |
| Figura 3.12 - Valores de K_{mod} em função da classe de serviço. Fonte: AITIM, 2000. | 24 |
| Figura 3.13 - Modos de falhas em ligações parafusadas para corte simples. Fonte: AITIM, 2000. | 25 |
| Figura 3.14 - Modos de falhas em ligações parafusadas para corte duplo. Fonte: AITIM, 2000. | 26 |
| Figura 4.1 - Ficha de caracterização do Pinus taeda. Fonte: VALLE, DENARDI e OLIVEIRA, 2008. | 28 |
| Figura 4.2 - Amostra de Pinus taeda utilizado na caracterização. Fonte: ACERVO. | 29 |
| Figura 4.3 - Detalhe do local da extração dos corpos-de-prova. Fonte: NBR 7190: 1997. | 29 |
| Figura 4.4 - Dimensões do corpo-de-prova. | 30 |
| Figura 4.5 - Corpos-de-prova utilizados nos ensaios. Fonte: ACERVO. | 30 |
| Figura 4.6 - Dimensões do corpo-de-prova de compressão paralela segundo a NBR 7190: 1997. | 30 |
| Figura 4.7 - Corpos-de-prova para o ensaio de compressão paralela às fibras, Fonte: ACERVO. | 31 |
| Figura 4.8 - Dimensões do corpo-de-prova de embutimento paralelo segundo a NBR 7190: 1997. | 31 |
| Figura 4.9 - Corpos-de-prova para o ensaio de embutimento paralelo às fibras. Fonte: ACERVO. | 32 |
| Figura 4.10 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de embutimento. Fonte: ACERVO. | 32 |
| Figura 4.11 - Dimensões do corpo-de-prova de embutimento paralelo segundo o EC5: 2004. | 32 |
| Figura 4.12 - Corpos-de-prova para o ensaio de embutimento paralelo às fibras. Fonte: ACERVO. | 33 |
| Figura 4.13 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de embutimento. Fonte: ACERVO. | 33 |
| Figura 4.14 - Dimensões do corpo-de-prova de embutimento perpendicular segundo o EC5: 2004. | 33 |
| Figura 4.15 - Corpos-de-prova para o ensaio de embutimento perpendicular. Fonte: ACERVO. | 34 |
| Figura 4.16 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de embutimento. Fonte: ACERVO. | 34 |
| Figura 4.17 - Balança eletrônica utilizada na pesagem dos corpos-de-prova. Fonte: ACERVO. | 36 |
| Figura 4.18 - Estufa utilizada para secagem dos corpos-de-prova. Fonte: ACERVO. | 36 |
| Figura 4.19 - Paquímetro utilizado na medição dos corpos-de-prova. Fonte: ACERVO. | 38 |
| Figura 4.20 - Máquina de carga utilizada no ensaio. Fonte: MAESTRI. | 40 |
| Figura 4.21 - Modelo de execução do ensaio. Fonte: MANRIQUEZ. 2008. | 41 |
| Figura 4.22 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO. | 41 |
| Figura 4.23 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO. | 42 |
| Figura 4.24 - Parafusos utilizados no ensaio. Fonte: ACERVO. | 44 |
| Figura 4.25 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO. | 45 |
| Figura 4.26 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO. | 46 |
| Figura 4.27 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO. | 48 |
| Figura 4.28 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO. | 49 |
| Figura 4.29 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO. | 52 |
| Figura 4.30 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO. | 52 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 4.31 - Dimensões do corpo-de-prova de ligações. | 54 |
| Figura 4.32 - Corpos-de-prova para o ensaio das ligações. Fonte: ACERVO. | 55 |
| Figura 4.33 - Parafusos usados nas ligações. Fonte: ACERVO. | 55 |
| Figura 4.34 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO. | 56 |
| Figura 5.1 - Detalhe das barras escolhidas para dimensionamento de suas ligações. | 58 |
| Figura 6.1 - Curva de Gauss probabilística. Fonte: ALMEIDA. | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Valores dos coeficientes η e α_e : a)segundo a norma; b)interpolados. | 15 |
| Tabela 3.2 - Parâmetro α_e sugerido pela norma. | 19 |
| Tabela 4.1 - Resultado das pesagens dos corpos-de-prova para ensaio do teor de umidade. | 37 |
| Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de peso-específico aparente. | 39 |
| Tabela 4.3 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova. | 43 |
| Tabela 4.4 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova. | 43 |
| Tabela 4.5 - Resultado da caracterização à compressão paralela às fibras. | 43 |
| Tabela 4.6 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova. | 47 |
| Tabela 4.7 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova. | 47 |
| Tabela 4.8 - Resultado da caracterização ao embutimento paralelo às fibras. | 47 |
| Tabela 4.9 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova. | 50 |
| Tabela 4.10 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova. | 50 |
| Tabela 4.11 - Resultado da caracterização ao embutimento paralelo às fibras. | 50 |
| Tabela 4.12 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova. | 53 |
| Tabela 4.13 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova. | 54 |
| Tabela 4.14 - Resultado da caracterização ao embutimento paralelo às fibras. | 54 |
| Tabela 4.15 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova. | 57 |
| Tabela 4.16 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova. | 57 |
| Tabela 4.17 - Variação das densidades das ligações. | 57 |
| Tabela 5.1 - Resumo das cargas (kN) aplicadas no dimensionamento das ligações. | 59 |
| Tabela 5.2 - Resumo da caracterização simplificada de algumas espécies. | 60 |
| Tabela 5.3 - Valores corrigidos das resistências das espécies. | 61 |
| Tabela 5.4 - Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 10 mm e ângulo de 0°. | 63 |
| Tabela 5.5 - Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 20 mm e ângulo de 0°. | 64 |
| Tabela 5.6 - Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 10 mm e ângulo de 90°. | 64 |
| Tabela 5.7 - Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 20 mm e ângulo de 90°. | 64 |
| Tabela 5.8 - Resistência da ligação obtida com inclinação de 65° e com fator minorador. | 74 |
| Tabela 5.9 - Resistência da ligação obtida com inclinação de 65° e sem fator minorador. | 74 |
| Tabela 5.10 - Número de parafusos obtidos com inclinação de 65° e com fator minorador. | 75 |
| Tabela 5.11 - Número de parafusos obtidos com inclinação de 65° e sem fator minorador. | 76 |
| Tabela 5.12 - Resistências características da ligação. | 77 |
| Tabela 5.13 - Resistências de cálculo da ligação com fator minorador. | 77 |
| Tabela 5.14 - Resistências de cálculo da ligação sem fator minorador. | 78 |
| Tabela 5.15 - Comparação dos valores do dimensionamento das ligações. | 78 |
| Tabela 5.16 - Comparação dos valores do dimensionamento das ligações. | 79 |
| Tabela 6.1 - Valores comparativos da resistência de ligações em madeira. | 83 |
| Tabela 6.2 - Angelim pedra verdadeiro à 0° (esquerda) e a 90° (direita). | 84 |
| Tabela 6.3 - Cedro amargo à 0° (esquerda) e a 90° (direita). | 85 |

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O dimensionamento de estruturas é um processo que envolve muito da personalidade do projetista, pois é nessa fase que se arbitram as decisões de projeto. Por este motivo o resultado do projeto pode sofrer algumas variações de um projetista para outro. O mesmo ocorre para as diferentes normas: elas são baseadas nas boas técnicas praticadas pelos profissionais e pesquisadores na área, variando entre as diversas regiões. Ainda assim, estas normas devem apresentar quesitos básicos de segurança.

Mas, como saber até que ponto estas variações são aceitáveis, ou verificar se as diferenças já consistem em um equívoco de dimensionamento?

Um dos objetivos da normalização de critérios de projeto e princípios de dimensionamento é garantir um nível adequado de qualidade, segurança e conforto do usuário das estruturas, respeitando sempre as razões econômicas, de maneira a se obter uma baixa relação custo/benefício.

Segundo Cordovil, “segurança de uma estrutura pode ser entendida como a capacidade que essa estrutura tem de suportar as diversas ações que venham a solicitá-la durante a sua vida útil, mantendo as condições de funcionamento previstas na sua construção.” Desta maneira, tem-se um nível mínimo de segurança, sugerido em norma, e tão logo um projeto ultrapasse tais níveis, este excesso poderá ser considerado como prejudicial ao custo do projeto.

Recentes pesquisas desenvolvidas pelo autor mostraram que, segundo alguns autores da área de madeiras, o número de parafusos obtidos em dimensionamentos de ligações em madeira segundo a NBR 7190: 1997 apresentaram-se maiores que o número obtido pela norma NB-11: 1951, para uma mesma ligação.

Para se verificar tal situação de projeto analisar-se-á, segundo prescrições da NBR 7190: 1997, a validade de tal aumento no número de conectores metálicos do tipo parafuso nas ligações em madeira que esta norma apresenta, do ponto de vista da segurança e da economia, em comparação com sua norma predecessora.

Faz-se então como objetivo da pesquisa propiciar uma comparação entre os critérios de dimensionamento de ligações parafusadas em madeira apresentado pela atual norma brasileira de projetos em madeira, a NBR 7190: 1997, e os critérios apresentados pela NB-11: 1951 (antiga norma de projetos em madeira) e o EC5: 2004 (norma européia de projetos em madeira), verificando a variância dos resultados comparados.

Este e os demais objetivos desta pesquisa serão alcançados por meio de pesquisas bibliográficas, cuja área de pesquisa possui vasto material publicado, através da experiência dos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho, além de ensaios mecânicos que servirão de indicativo sobre os dados obtidos na pesquisa teórica.

Para o correto desenvolvimento deste trabalho, conta-se com auxílio da Professora e Orientadora desta pesquisa, a Drª. Ângela do Valle, além do espaço e material cedido pelo Grupo Interdisciplinar de Estudos Da Madeira – GIEM –, e auxílio dos próprios integrantes do Grupo (professores, alunos de graduação, alunos de mestrado e de doutorado).

2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

De maneira a organizar e gerir esta pesquisa de modo adequado, traçaram-se alguns objetivos que foram atingidos ao longo do desenvolvimento do trabalho e, com isto, obtiveram-se os resultados esperados. Estes objetivos seguem nos itens 2.1 e 2.2.

2.1. *Objetivo Geral*

O objetivo deste trabalho é comparar o resultado do dimensionamento de ligações parafusadas em treliças de madeira, segundo as prescrições de três referências normativas: NBR 7190: 1997, NB-11: 1951 e EC5: 2004, a fim de verificar a hipótese de ocorrência de possíveis distorções quanto ao número de parafusos encontrados pelo critério da atual norma brasileira de projeto de estruturas em madeira (NBR 7190: 1997).

2.2. *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

- Levantar material bibliográfico sobre ligações em estruturas de madeira para servir de referência para o início da pesquisa;
- Caracterizar uma espécie de madeira para utilização na pesquisa;
- Quantificar os esforços de cálculo para uma treliça de cobertura, aplicando cada uma das normas;
- Pré-dimensionar a mesma treliça de cobertura já citada a partir dos dados obtidos da caracterização da espécie de madeira escolhida, por cada um dos critérios normativos;
- Dimensionar uma ligação parafusada, com diferentes parâmetros de geometria, para seis espécies de madeira, segundo cada uma das normas;
- Efetuar a comparação entre os resultados obtidos do dimensionamento da ligação segundo a NBR 7190: 1997, o EC5: 2004 e a NB-11: 1951;
- Analisar a influência de alguns parâmetros do critério de projeto da NBR 7190: 1997 no dimensionamento de ligações parafusadas;

- Verificar se é verdadeira a hipótese da existência de distorções quanto ao número de parafusos encontrados pelo critério da NBR 7190: 1997 para ligações.

2.3. Metodologia Da Pesquisa

A fim de atingir os objetivos propostos para esta pesquisa, a seguinte metodologia de trabalho foi traçada:

(1)

Efetuar um vasto levantamento teórico, através de literaturas técnicas da área, artigos, trabalhos acadêmicos, sítios eletrônicos, além de se aprofundar no estudo das normas em questão no trabalho.

Todo este embasamento teórico fornecerá a base do trabalho, pois através dele se entenderá o funcionamento dos parâmetros utilizados por cada referência normativa, podendo-se assim trabalhar e modificar estes parâmetros com senso crítico.

Por fim, nesta primeira etapa de pesquisa teórica, serão redigidos itens que explicarão o funcionamento dos critérios de projeto de ligações parafusadas em estruturas de madeira, segundo prescrições de cada referência normativa.

(2)

Nesta segunda etapa do trabalho será desenvolvida a caracterização da espécie *Pinus taeda*. Esta caracterização será executada com ensaios de umidade e densidade aparente, além de ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras e embutimento paralelo às fibras. Estes ensaios serão feitos segundo prescrições da NBR 7190: 1997. Os ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras também serão executados segundo prescrições do EC5: 2004.

Serão ensaiadas também algumas ligações, para identificar o funcionamento real e compatibilizar o comportamento destas ligações em serviço e a formulação teórica proposta pelas normas. Estão previstos ensaios de quatro ligações simples, com um parafuso, montadas de maneira a gerar uma situação de solicitação paralela às fibras e duplo corte.

Todos os resultados serão organizados em planilhas eletrônicas e gráficos, e disponibilizados no texto e em anexos, para posterior análise.

(3)

Na terceira parte do trabalho será feito o dimensionamento de uma estrutura de cobertura em madeira, cuja concepção será abordada no **ANEXO I**. Este dimensionamento será efetuado no Estado Limite Último (ELU), com o objetivo de gerar valores reais de carregamentos, para posterior dimensionamento das ligações desta estrutura.

Estes dimensionamentos serão executados por meio de planilhas eletrônicas programadas, e serão utilizados dados de caracterizações de 6 espécies de madeira, dados estes obtidos através da pesquisa teórica. As espécies que serão utilizadas estarão divididas em 3 classes, de acordo com suas densidades: alta, média e baixa densidade. Estas espécies serão descritas no decorrer da pesquisa.

A escolha por esta divisão foi feita com o objetivo de expandir os resultados e torná-los mais significativos, gerando mais material para as análises.

Definidas as espécies, serão recolhidos dados de caracterizações mecânicas e, com o auxílio das planilhas eletrônicas, se efetuará o dimensionamento por cada uma das referências normativas. Ao final, será gerado um quadro resumo das cargas atuantes na estrutura, para que sejam escolhidas as ligações a serem dimensionadas.

Todo este processo irá acontecer também para a espécie cuja caracterização foi executada pelo autor (*Pinus taeda*).

(4)

Na parte do dimensionamento das ligações, serão utilizados todos os dados reunidos até aqui: as cargas provenientes do **ANEXO I**, para avaliar o número de parafusos, os dados das 6 espécies de madeiras divididas de acordo com suas densidades e os dados oriundos da caracterização do *Pinus taeda*.

As ligações que serão dimensionadas terão ângulo de 0° (análise paralela às fibras), ângulo de 90° (análise perpendicular às fibras) e ângulo de 65° (análise intermediária) entre a força aplicada e as fibras. Os ângulos de 0° e 90° foram selecionados para as análises por representarem os valores extremos da inclinação entre peças. O ângulo de 65° foi selecionado, pois é o ângulo entre as barras mais solicitadas da treliça que será detalhada no capítulo 5.

Todos os dimensionamentos das ligações serão feitos por cada uma das normas através de planilhas eletrônicas programáveis, e os resultados serão mostrados através de gráficos e tabelas.

Para cada um dos ângulos citados acima, será feita a variação do dimensionamento com e sem o fator minorador (0,4) apresentado pela NBR 7190: 1997.

Nos resultados iniciais será apresentada a resistência obtida para uma dada ligação, por cada uma das normas, em função do diâmetro do parafuso utilizado. Após, será mostrado o resultado do dimensionamento quando ocorrer falha por flexão do parafuso. Em seguida serão feitas análise do número de parafusos obtidos em cada ligação.

Para a análise final serão mostrados os resultados obtidos para o dimensionamento das ligações, utilizando os dados obtidos da caracterização do *Pinus taeda*. Os valores estimados pelo equacionamento teórico serão comparados aos obtidos com os ensaios mecânicos das ligações, para uma verificação do que foi estimado através do equacionamento teórico e o que realmente ocorre em situações reais.

O resultado do dimensionamento das ligações com os dados do *Pinus taeda*, em conjunto com os ensaios das ligações forneceram também base para o cálculo de fatores de segurança globais, com o intuito de compará-los com os fatores que são atualmente aplicados nas normas.

(5)

Com todo o conteúdo proposto já cumprido, serão efetuadas análises de todo o material pertinente, além de exemplificar as situações encontradas com qualquer meio que possa auxiliar no desenvolvimento da proposta inicial de verificar a validade do equacionamento da NBR 7190: 1997.

Serão organizados também os anexos, que apresentam o material que não foi exposto no texto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Observou-se, durante a aplicação do processo de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira com a referência normativa NBR 7190: 1997 que, para certa espécie de madeira, o número de parafusos resultantes deste dimensionamento se mostrou elevado em comparação à norma precedente (NB-11: 1951). Isto conduz a projetos com maior custo e mais exigências na execução das peças em madeira. Contudo há de se verificar se estes resultados se aplicam também a outras espécies de madeira.

Desta forma, surgiu a idéia da pesquisa deste assunto com finalidade de encontrar alguma evidência de tal suposição e, caso esta se mostre verdadeira, encontrar indicativos dos motivos de tal diferença no critério de segurança nos dimensionamento de ligações em madeiras. Assim, procedeu-se com a proposta de um plano de trabalho.

Para se obter os dados iniciais da pesquisa, alguns trabalhos já publicados estudados com o objetivo de juntar um número de informações suficientes para o embasamento teórico da pesquisa.

Entre estes trabalhos, podemos citar:

- ✓ Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada (STAMATO; 2002);
- ✓ Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira (OLIVEIRA; 2001);
- ✓ O impacto da norma 7190:1997 – projeto de estruturas de madeira na disciplina “estruturas de madeira” (TERNI, OLIVEIRA e FERREIRA; 2001);
- ✓ Comparativo de dimensionamento de uma ligação por critérios normativos e experimentais (LIMA e TEREZO; 2003);
- ✓ Estructuras de madera – diseño y cálculo (AITIM, 2000),
- ✓ Avaliação numérica do modelo de cálculo das ligações mecânicas da NBR 7190: 1997 (VELOSO, ALVIM e ALMEIDA, 2000).

Estas publicações forneceram as bases iniciais desta pesquisa. Além destas, esta monografia está baseada nas seguintes referências normativas:

- ✓ NB-11: 1951 – Projeto de estruturas de madeira;

- ✓ NBR 7190: 1997 – Projeto de estruturas de madeira;
- ✓ EC5: 2004 (EN 1995-1.1:2004) – Design of timber structures-Common rules and rules for buildings.

3.1. Estrutura Da Madeira

A madeira, dentre os vários materiais da construção civil, se destaca por ser um material renovável, devido à sua origem. Resultado do processo de crescimento das árvores, este material oferece várias qualidades apreciáveis em diversas áreas, dentre estas a área da construção civil.

Contudo, diferente dos outros materiais clássicos da construção civil (o aço e o concreto, por exemplo), algumas considerações a mais devem ser feitas antes de se iniciar o uso da madeira. Como este material não recebe a manufatura do ser - humano, em se tratando de suas qualidades iniciais, suas características são, então, definidas pela sua origem e composição.

A madeira, por este motivo, não pode ser considerada isotrópica e homogênea, como se faz com os demais materiais. Além do mais, a mesma espécie de madeira pode apresentar diferentes características dependendo da sua idade e da região de seu cultivo.



Figura 3.1 – Jequitibá branco. Fonte: <<http://arvores.cjb.net>>, com acesso em 27/10/2008.

Todos estes fatores fazem com que, para se projetar em madeira, o projetista seja um conhecedor das características deste material tão comum e tão complexo em sua essência.

As características da madeira, como já explicitado anteriormente, são intrínsecas à sua composição. Logo, é bastante importante explicar, sucintamente, como está organizada esta composição.

Consideradas como vegetais superiores, as árvores estão divididas em gimnospermas e angiospermas. A principal divisão das gimnospermas é a ordem das coníferas e a principal divisão das angiospermas é a ordem das dicotiledôneas.

As coníferas e dicotiledôneas são amplamente denominadas como árvores de madeira macia e madeira dura, respectivamente, devido a suas características físico-mecânicas.

Por ser formada por uma estrutura fibrosa (que varia bastante entre as coníferas e dicotiledôneas), a madeira se apresenta com um comportamento bastante ortotrópico, ou seja, suas características variam de acordo com a direção espacial à qual esta madeira é solicitada.

Com relação à seção do tronco das árvores, pode-se dividir a madeira em quatro regiões principais:

- ✓ **Casca:** é a parte externa da árvore, responsável pela proteção do tronco;
- ✓ **Cambio:** é uma fina camada entre o lenho e a casca, responsável pela produção de células destas duas camadas, propiciando o crescimento no diâmetro do tronco e dos galhos;
- ✓ **Lenho:** é a parte do tronco de onde se extrai a madeira. É dividida em duas regiões distintas:

Alburno: parte externa e menos resistente do lenho. Possui coloração clara e é responsável pelo transporte da seiva bruta para toda a árvore;

Cerne: parte interna e mais resistente do lenho. Possui coloração escura;

- ✓ **Medula:** tecido mole do centro do tronco.

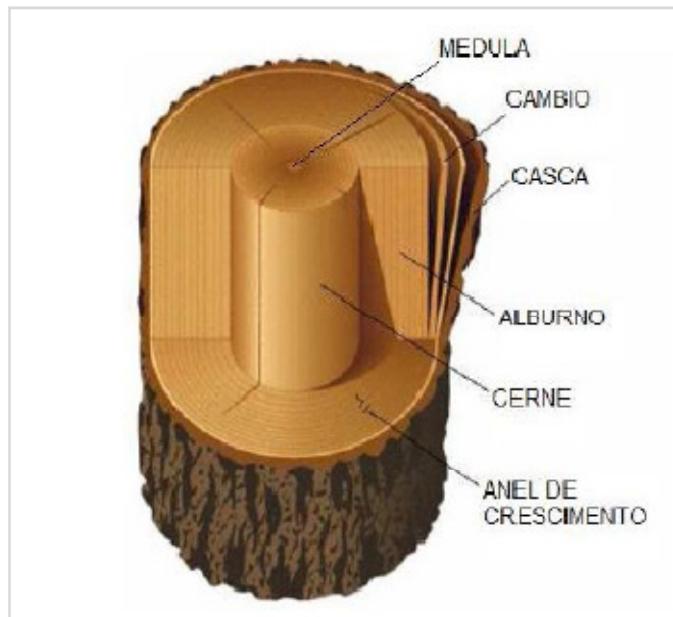


Figura 3.2 - Corte transversal de um tronco de árvore. Fonte: COSTA, 2001.

As madeiras utilizadas na construção são extraídas do lenho do tronco, preferencialmente do cerne, mas dependendo de sua utilização, parte do alburno também pode ser aproveitada.

Ainda no tronco, pode-se identificar a variação de crescimento da madeira, o que afeta a sua resistência. Esta variação se dá devido à diferença da taxa de crescimento das madeiras nas épocas de outono/inverno com crescimento mais lento – maior resistência, e primavera/verão com crescimento mais acelerado – menor resistência. Esta diferença fica explicita nos anéis de crescimento da madeira, devido a diferença de resistência e coloração destes anéis.

Todas estas características apresentadas fazem da madeira um material com características bastante próprias e diversificadas.

3.2. A Madeira Como Material De Construção

Em se tratando de pesquisas com madeira, torna-se muito importante a apresentação das características do material. Tendo em vista a origem da madeira, devemos conhecê-la para uma maior compreensão do comportamento do material.

Desde antes da história a humanidade utiliza dos recursos a sua volta para sua própria sobrevivência, entre estes recursos está a madeira. Vendo na madeira um material de grande aptidão, faz-se seu uso desde a construção de móveis, brinquedos,

até meios de transporte como carroças e barcos, e propriamente como material de construção, seja para vedação ou com finalidade estrutural.

Na construção, a madeira serve para a confecção de vários elementos construtivos (viga, pilares, soalhos, coberturas, entre vários outros). Contudo, a utilização da madeira é muitas vezes vista como limitada a tapumes de vedação da obra, escoramentos e fôrmas.

Uma das razões para tal fenômeno é um forte preconceito com relação ao uso deste material. Visto como sendo algo de baixa durabilidade, devido talvez à falta de conhecimento dos projetistas e construtores sobre as propriedades da madeira, há uma recusa grande em se utilizar deste material para construção de edificações.

“Quando uma construção, seja em concreto armado ou em aço, não atinge as expectativas, o evento é considerado inesperado cabendo ao engenheiro grande parte da responsabilidade pelas falhas ocorridas. No entanto, se o mesmo ocorrer em uma construção em madeira, a percepção do público, em geral, é que esta consequência é esperada como decorrência da utilização da madeira. Neste caso, a culpa é atribuída, na maioria das vezes, sobre o material e não sobre o engenheiro ou construtor, mesmo que a causa dos problemas esteja relacionada ao uso inadequado da madeira ou até mesmo devido a um detalhamento incorreto das peças.”(VALLE, DENARDI e OLIVEIRA, 2008).

Estruturas duráveis em madeira requerem artifícios e considerações das propriedades do material, tratamentos preservativos adequados, avaliação dos potenciais perigos que possam afetar a madeira e a seleção do detalhes construtivos apropriados para cada situação.

3.3. Critérios De Projeto De Ligações Parafusadas

Nesta seção serão descritos e comparados os critérios de dimensionamento de ligações parafusadas em madeira segundo prescrições das 3 normas em estudo: NBR 7190: 1997, NB-11: 1951 e do EC5: 2004.

3.3.1. NB-11: 1951

A NB-11: 1951 – Projeto de estruturas de madeira, norma que precedeu a NBR 7190: 1997, apresenta um modelo de dimensionamento de ligações parafusadas que

foi concebido com base em critérios de tensões admissíveis. Esta norma apresenta alguns ábacos de dimensionamento das ligações parafusadas para algumas espécies de madeiras. Neste relatório estarão apresentadas as equações que originaram estes ábacos.

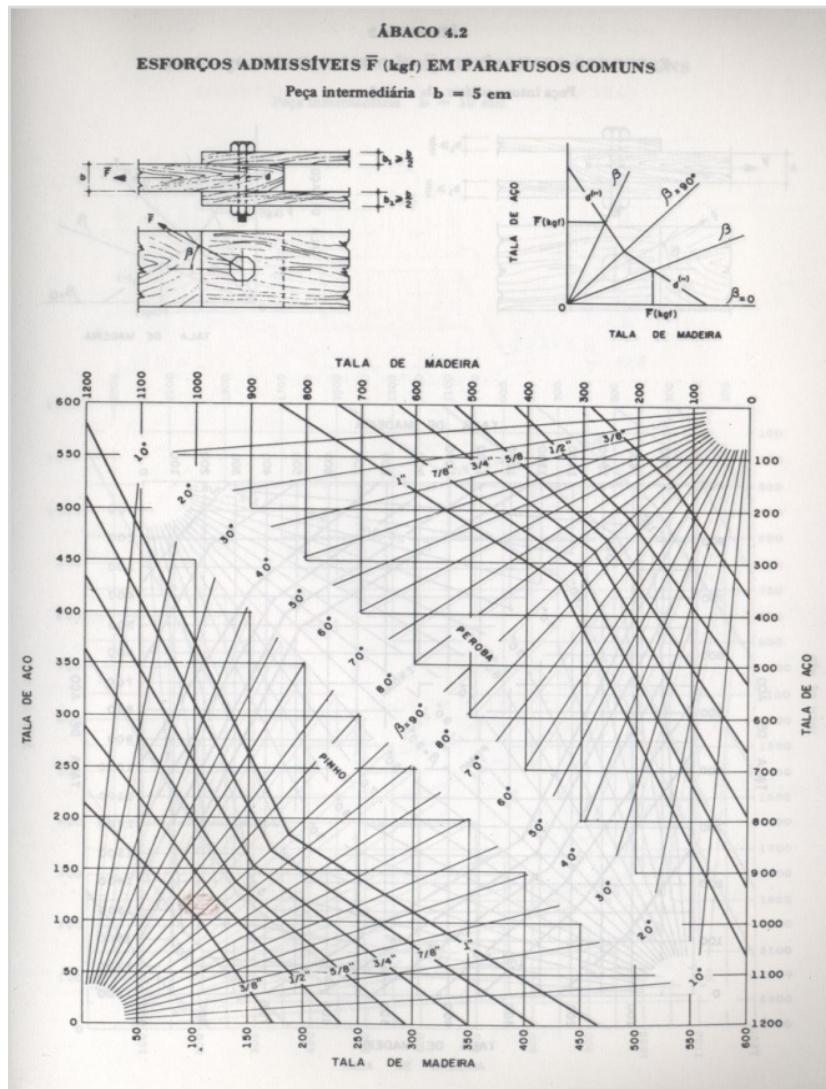


Figura 3.3 - Ábacos de dimensionamento de ligações parafusadas pela NB-11. Fonte: PFEIL, 1994.

Para o dimensionamento das ligações parafusadas em madeira verificam-se duas situações prováveis de colapso da peça:

- ✓ Falha por flexão do parafuso;
- ✓ Falha por embutimento do pino na madeira;

Para resolver esta problemática, a antiga norma sugere a aplicação de um coeficiente K, que relaciona a resistência de flexão do parafuso com a resistência ao embutimento da madeira. Assim este fator K, aplicado nas equações de resistência da ligação, corrige estes valores e garante a segurança da ligação.

Para o cálculo da resistência da ligação, devem ser conhecidas as tensões resistentes básicas de compressão normal e paralela às fibras da madeira, sobre a área projetada do parafuso na madeira. Estas tensões são dadas por:

$$\overline{\sigma_p} = 0,9 \times \overline{\sigma_c}$$

$$\overline{\sigma_n} = 0,25 \times \overline{\sigma_p}$$

$\overline{\sigma_c}$ é denominado tensão admissível à compressão simples, e é obtido multiplicando-se a resistência última da madeira (f_c - quociente entre a força de ruptura da madeira verde e a área da seção do corpo-de-prova do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira) por coeficientes minoradores:

- ✓ 0,75 – dispersão dos ensaios;
- ✓ 0,62 – efeito da duração da carga;
- ✓ 0,60 – qualidade da madeira (considerar segunda categoria);
- ✓ 0,72 – coeficiente de segurança $\left(\frac{1}{1,4}\right)$.

$$f_c = \frac{F_u}{A}$$

Destes valores tiramos:

$$\overline{\sigma_c} = 0,75 \times 0,62 \times 0,60 \times 0,72 \times f_c$$

$$\overline{\sigma_c} = 0,20 \times f_c$$

A força resistente da ligação com solicitação paralela às fibras é dada pela equação:

$$F_p = 0,8 \times \overline{\sigma_p} \times w_p \times b \times d$$

Sendo:

- ✓ w_p – fator de correlação entre a flexão do parafuso e a resistência da madeira;
- ✓ b – espessura da peça central de madeira;
- ✓ d – diâmetro d parafuso;
- ✓ 0,8 – coeficiente de ajuste para ligações com talas laterais de madeira.

De maneira similar, obtemos a equação da resistência da ligação com solicitação perpendicular (normal) às fibras da madeira:

$$F_n = 0,8 \times \bar{\sigma}_n \times w_n \times b \times d \times \eta$$

As forças resistentes obtidas pelo equacionamento da NB-11 se referem à dois planos de corte do parafuso. O tipo de ligação para o qual a formulação apresentada pela antiga norma é válida é do tipo corte duplo, como está mostrado na Figura 3.4.

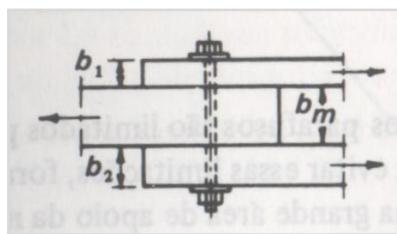


Figura 3.4 - Modelo de ligação parafusada de corte duplo. Fonte: PFEIL, 1994.

O coeficiente η , dado em função do diâmetro do parafuso, funciona como coeficiente de majoração da resistência da ligação parafusada em madeira. A norma NB-11: 1951 apresenta uma tabela para determinados diâmetros de parafusos. Tendo em vista que se estará trabalhando com planilhas eletrônicas e no objetivo de facilitar os cálculos, linearizaram-se estes valores, para um determinado intervalo de diâmetros, chegando-se nesta equação:

$$\eta = 5,325 \times d^{-0,45}$$

$$R^2 = 0,995$$

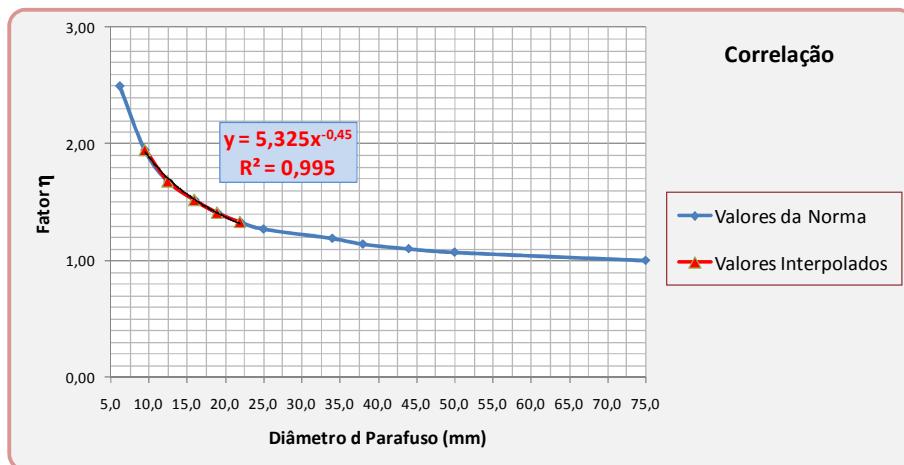
Esta equação é válida somente com diâmetros compreendidos entre 9,5 mm e 22,0 mm.

Para norma NBR 7190: 1997 o valor do coeficiente η foi renomeado para coeficiente α_e , contudo os valores permaneceram os mesmos. Logo, todas as considerações que foram feitas nesta interpolação estarão valendo também para aplicação do coeficiente α_e nos cálculos segundo as prescrições da NBR 7190: 1997.

Tabela 3.1 - Valores dos coeficientes η e α_e : a)segundo a norma; b)interpolados.

| d (mm) | $\eta - \alpha_e$ | d (mm) | $\eta - \alpha_e$ |
|--------|-------------------|--------|-------------------|
| 6,2 | 2,50 | 10,0 | 1,89 |
| 9,5 | 1,95 | 11,0 | 1,81 |
| 12,5 | 1,68 | 12,0 | 1,74 |
| 16,0 | 1,52 | 13,0 | 1,68 |
| 19,0 | 1,41 | 14,0 | 1,62 |
| 22,0 | 1,33 | 15,0 | 1,57 |
| 25,0 | 1,27 | 16,0 | 1,53 |
| 34,0 | 1,19 | 17,0 | 1,49 |
| 38,0 | 1,14 | 18,0 | 1,45 |
| 44,0 | 1,10 | 19,0 | 1,42 |
| 50,0 | 1,07 | 20,0 | 1,38 |
| 75,0 | 1,00 | | |

Fonte: modificado da NB-11: 1951.

Figura 3.5 - Gráfico da interpolação dos valores de η e α_e .

O coeficiente w foi inserido na formulação para prever uma relação entre a resistência do parafuso à flexão e a resistência da madeira ao embutimento pelo parafuso. Se a ligação tende a romper pelo embutimento da madeira, o fator w auxilia como redutor da resistência da ligação, aumentando o número de parafusos, reduzindo a probabilidade do rompimento por embutimento.

As equações para o cálculo deste parâmetro seguem:

$$w = 0,226 + \frac{0,63 \times k}{100} + \frac{0,58 \times k^2}{10000} \text{ para } k \leq 33,3$$

$$w = 0,25 + \frac{0,75 \times k}{100} \text{ para } k > 33,3$$

Para esforço perpendicular às fibras

$$k = 26,2 \times \frac{\overline{\sigma_e}}{\overline{\sigma_n}} \times \frac{d^2}{b^2}$$

Para esforço paralelo às fibras

$$k = 59 \times \frac{\overline{\sigma_e}}{\overline{\sigma_p}} \times \frac{d^2}{b^2}$$

O termo na formulação representa a tensão de escoamento do aço do parafuso.

Um critério a ser respeitado com relação às dimensões das peças de madeira da ligação é que o valor de b_1 seja maior ou igual à metade do valor de b . Esta imposição garante a segurança e o funcionamento da ligação para ambas as peças de madeira, bem como para o parafuso. Um exemplo das dimensões das peças segue na Figura 3.6.

$$b_1 \geq \frac{b}{2}$$

Para os casos de ligações parafusadas em madeira, cujo sentido do esforço seja diferente do sentido paralelo ou perpendicular, a norma apresenta a equação de Hankinson. Esta equação fornece uma estimativa da resistência madeira inclinada em relação às fibras, através da suposição de linearidade entre a resistência paralela e perpendicular.

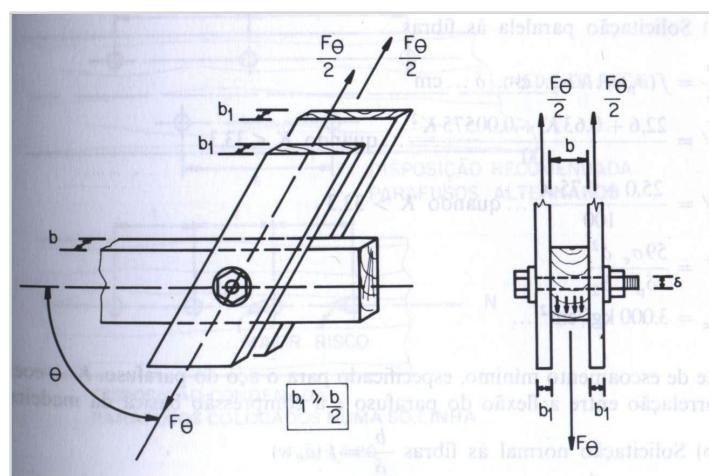


Figura 3.6 - Modelo de ligação com solicitação inclinada. Fonte: MOLITERNO, 1981.

$$F_\theta = \frac{F_p \times F_n}{F_p \times \sin^2 \theta + F_n \times \cos^2 \theta}$$

A obtenção do número de parafusos para uma determinada ligação se dá pela expressão:

$$N = \frac{F_s}{F}$$

Sendo:

- ✓ F_s - esforço atuante na ligação;
- ✓ F – força resistente da ligação.

3.3.2. NBR 7190: 1997

A NBR 7190: 1997 – Projeto de estruturas de madeira, é a norma vigente atualmente no País. Esta norma recomenda, para ligações por pinos metálicos, que se verifiquem duas situações para o dimensionamento da ligação:

- ✓ Embutimento do pino metálico na madeira, ocasionando falha da ligação através da ruptura por esmagamento da madeira;
- ✓ Flexão do pino metálico, ocasionando falha da ligação através da ruptura por deformação do pino metálico.

I - Embutimento na madeira

$$\beta \leq \beta_{lim}$$

$$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed}$$

II - Flexão do pino

$$\beta > \beta_{lim}$$

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd}$$

Figura 3.7 - Modelo de cálculo da resistência da ligação parafusada. Fonte: NBR 7190: 1997.

O número de pinos metálicos necessários, segundo a NBR 7190: 1997, é expresso pelo esforço atuante na ligação (F_s) já majorado pelo coeficiente de ponderação, divido pela resistência da ligação por pinos metálicos ($R_{vd,1}$), como é mostrado na Figura 3.7. A força resistente $R_{vd,1}$ é a força resistida por um plano de corte do parafuso.

$$N = \frac{F_s}{R_{vd,1}}$$

Para obtenção da resistência da ligação por pinos metálicos, calcula-se o parâmetro β da ligação, comparando-o com o parâmetro β_{lim} . Esta comparação irá determinar o tipo de falha mais provável a ocorrer na ligação, indicando a equação correta a ser utilizada. Ambos os parâmetros são obtidos pelas expressões:

$$\beta_{lim} = 1,25 \times \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e\theta,d}}}$$

$$\beta = \frac{t}{d}$$

Sendo:

✓ f_{yd} a resistência ao escoamento do pino metálico, dada por:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_w}$$

$$\gamma_w = 1,1$$

$$f_{yk} = 240 \text{ MPa (Parafusos)}$$

$$f_{yk} = 600 \text{ MPa (Pregos)}$$

✓ $f_{e\theta,d}$ a resistência ao embutimento da madeira, em uma dada inclinação θ com relação as fibras.

Esta resistência pode ser estimada através de ensaios mecânicos, ou através da fórmula de Hankinson, na falta de resultados de ensaios. O ângulo θ é o ângulo medido entre as peças da ligação.

$$f_{e\theta,d} = \frac{f_{e0,d} \times f_{e90,d}}{f_{e0,d} \times \sin^2 \theta + f_{e90,d} \times \cos^2 \theta}$$

$$f_{e0,d} = f_{c0,d}$$

$$f_{e90,d} = 0,25 \times f_{c0,d} \times \alpha_e$$

Tabela 3.2 - Parâmetro α_e sugerido pela norma.

| d (mm) | α_e |
|--------|------------|
| 10 | 1,89 |
| 11 | 1,81 |
| 12 | 1,74 |
| 13 | 1,68 |
| 14 | 1,62 |
| 15 | 1,57 |
| 16 | 1,53 |
| 17 | 1,49 |
| 18 | 1,45 |
| 19 | 1,42 |
| 20 | 1,38 |

Fonte: modificado da NBR 7190: 1997.

- ✓ d é o diâmetro do pino metálico usado na ligação.
- ✓ t é denominado espessura convencional das peças envolvidas, e depende do tipo da ligação. Na Figura 3.8 e na Figura 3.9 seguem os modelos para determinação da espessura convencional (t).

O parâmetro α_e serve para levar em consideração o efeito da dimensão do parafuso na compressão normas às fibras da madeira. De maneira a facilitar o processo de dimensionamento das ligações parafusadas que será apresentado adiante, foi feita a linearização destes valores para um determinado intervalo de diâmetros, alterando, de forma mínima, estes valores. Estas considerações já foram demonstradas e explicadas item anterior desta pesquisa.

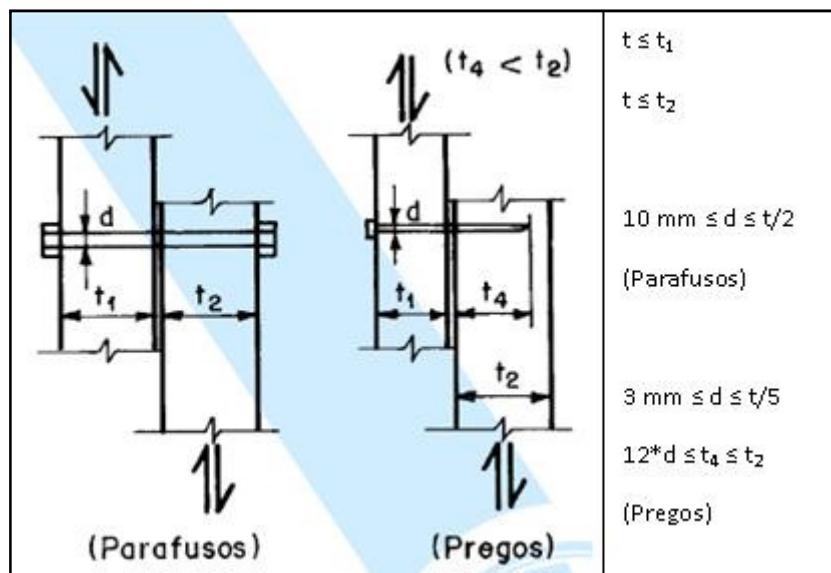


Figura 3.8 - Espessura convencional para um plano de corte. Fonte NBR 7190: 1997.

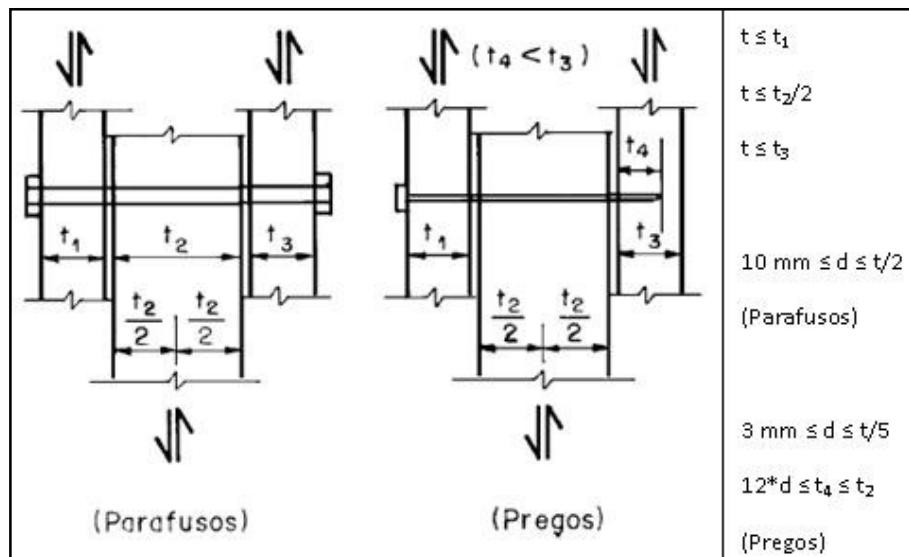


Figura 3.9 - Espessura convencional para dois planos de corte. Fonte NBR 7190: 1997.

Para aplicação dos critérios descritos neste item, com relação às solicitações e resistências de cálculo, utilizou-se de um K_{mod} condizente com as condições de alta umidade (0,45).

Definida as limitações sugeridas pela norma NBR 7190: 1997, parte-se para a determinação dos esforços de dimensionamento atuantes na ligação, para que seja verificado seu dimensionamento.

3.3.3. EC5: 2004

Com base em normas européias e no próprio EC5: 2004, este tópico irá tratar do dimensionamento pelas recomendações desta norma.

Ao se fazer a comparação entre as normas, deve-se ter em mente que a norma européia possui alguns itens cujo desenvolvimento ocorreu de maneira empírica, valendo então para as madeiras daquela região. Ainda que a maior parte do EC5 possua completa fundamentação teórica e, portanto tem validade para variadas situações, esta comparação deve ser feita com cuidado, fazendo-se claro cada passo do desenvolvimento de cálculo pelo EC5: 2004.

Para a verificação da resistência de ligações parafusada em madeira, o EC5: 2004 determina que se execute o ensaio dos parafusos, de maneira a determinar o momento de plastificação dos mesmos. Caso não haja a possibilidade de execução destes ensaios, a norma estipula expressões para estimar os valores do momento de plastificação dos parafusos.

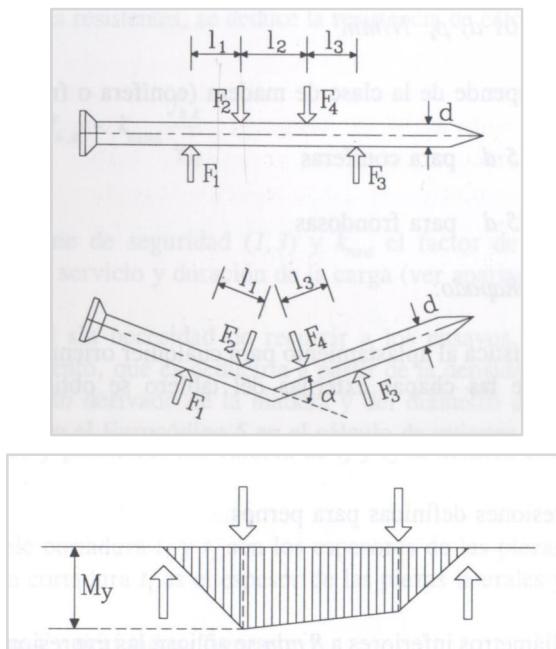


Figura 3.10 - Momento de plastificação do parafuso. Fonte AITIM, 2000.

$$M_{y,k} = 0,3 \times f_{u,k} \times d^{2,6}$$

$$M_{y,d} = \frac{M_{y,k}}{\gamma_m}$$

Sendo:

- ✓ $M_{y,k}$ representa o momento resistente de plastificação característico dos parafusos (kN.mm);
- ✓ $M_{y,d}$ representa o momento resistente de plastificação de projeto dos parafusos(kN.mm);
- ✓ γ_m é o coeficiente de minoração do momento resistente dos parafusos de aço;
- ✓ $f_{u,k}$ representa a tração característica do parafuso (MPa);
- ✓ d é o diâmetro do parafuso (mm).

Para o cálculo da resistência das ligações parafusadas em madeira, o EC5: 2004 simula algumas situações de projeto, efetuando a estimativa de resistência de cada situação e supõe, por motivos de segurança da estrutura, ser a resistência da ligação o menor dos valores obtidos.

Toda a formulação do EC5, no que diz respeito ao dimensionamento de ligações em madeira, foi concebida através dos estudos de Johansen. Desta maneira, todo o equacionamento fornecido por esta norma apresenta extensa fundamentação teórica, podendo ser aplicado para diversas situações. Esta é a grande diferença entre o EC5 e a NBR 7190, pois a norma brasileira não se utilizou de modelos teóricos para a concepção de sua formulação de dimensionamento de ligações parafusadas em madeira.

Para o prosseguimento das expressões de dimensionamento das ligações parafusadas em madeira, algumas notações são apresentadas:

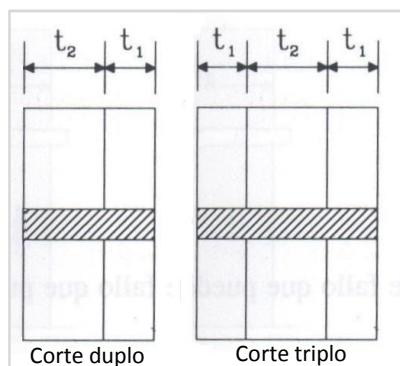


Figura 3.11 - Tipos de solicitações de corte no parafuso. Fonte: AITIM, 2000.

- ✓ t_1 e t_2 – espessura das peças de madeira da ligação (no caso de corte duplo, t_1 será a espessura das peças externas e t_2 a espessura da peça interna);
- ✓ $f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$ – resistência ao embutimento das peças de madeira de espessura t_1 e t_2 , respectivamente;
- ✓ R_d – resistência da ligação, por plano de corte;
- ✓ F_s – força solicitante da ligação;
- ✓ N – número de parafusos na ligação.

$$f_{h,d} = K_{mod} \times \frac{f_{h,k}}{\gamma_m}$$

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

$$N = \frac{F_s}{R_d}$$

O parâmetro apresentado nas formulações acima representa β coeficiente entre as resistências ao embutimento da madeira exterior e da madeira interior. Este parâmetro prevê duas situações:

- ✓ Madeira exterior e interior com inclinações diferentes em relação às fibras da madeira, apresentando então resistências ao embutimento diferentes;
- ✓ Uso de madeiras diferentes no dimensionamento da ligação.

Em se tratando de dimensionamentos no Estado Limite Último (ELU), o EC5: 2004 sugere a utilização dos seguintes fatores de ponderação:

- ✓ $\gamma_m = 1,1$ (Pequena variabilidade);
- ✓ $\gamma_m = 1,3$ (Grande variabilidade).

O fator de modificação (K_{mod}) é utilizado para correção do tempo de duração da carga e teor de umidade da madeira. Este fator depende da classe de serviço em que se encontra a peça de madeira. As classes de serviço definidas pelo EC5: 2004 são:

- ✓ **Classe de serviço 1:** Se caracteriza pela exposição da madeira a um teor de umidade, em uma temperatura de 20 ± 2 °C, que somente excede 65% poucas vezes ao ano;
- ✓ **Classe de serviço 2:** Se caracteriza pela exposição da madeira a um teor de umidade, em uma temperatura de 20 ± 2 °C, que somente excede 85% poucas vezes ao ano;
- ✓ **Classe de serviço 3:** Se caracteriza pela exposição da madeira a um teor de umidade superior ao da classe de serviço 2.

Determinada a classe de serviço em que se encontra a peça de madeira estudada, parte-se para a verificação do K_{mod} , que se encontra na Figura 3.12.

| Clase de duración de la carga | Clase de servicio | | |
|-------------------------------|-------------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Permanente | 0,60 | 0,60 | 0,50 |
| Larga duración | 0,70 | 0,70 | 0,55 |
| Media duración | 0,80 | 0,80 | 0,65 |
| Corta duración | 0,90 | 0,90 | 0,70 |
| Instantánea | 1,10 | 1,10 | 0,90 |

Figura 3.12 - Valores de K_{mod} em função da classe de serviço. Fonte: AITIM, 2000.

Para os dimensionamentos desta pesquisa, o K_{mod} adotado foi de 0,5 (carga permanente, classe de serviço 3).

Ligações em madeira – corte simples

Para a situação do corte simples, o EC5: 2004 sugere a análise de 6 diferentes modos de a ligação atingir a ruptura, como segue na Figura 3.13.

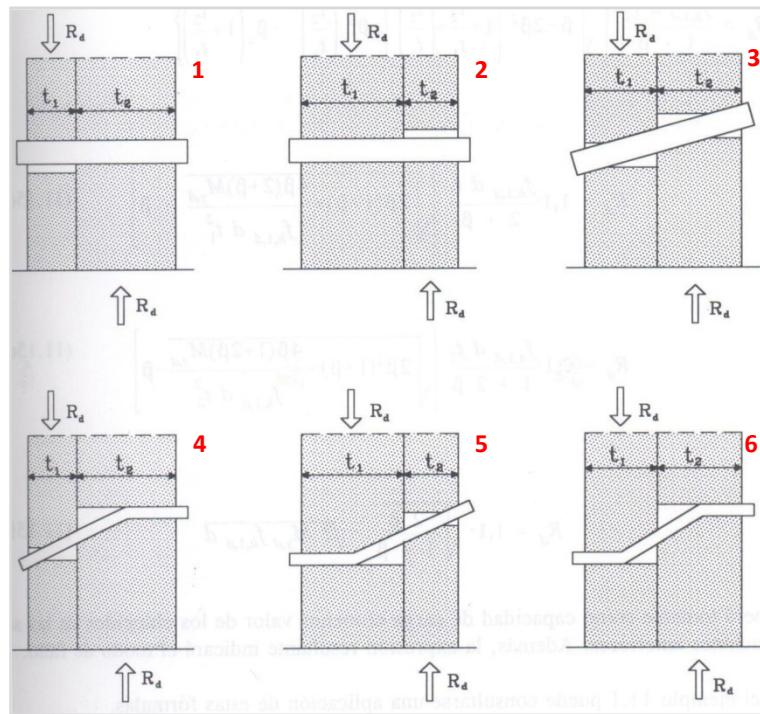


Figura 3.13 - Modos de falhas em ligações parafusadas para corte simples. Fonte: AITIM, 2000.

Os modelos 1 e 2 representam a falha da ligação por embutimento na madeira exterior e interior, respectivamente. O modelo 3 representa a falha por embutimento simultâneo do parafuso nas duas peças de madeira.

Os modelos 4 e 5 representam a falha da ligação por flexão do parafuso causado pela madeira exterior e interior, respectivamente. O modelo 6 representa a falha por flexão simultânea do parafuso nas causada pelas duas peças de madeira.

As expressões para a verificação de cada uma das situações seguem:

$$R_d = f_{h,1,d} \times t_1 \times d$$

$$R_d = f_{h,1,d} \times t_2 \times d \times \beta$$

$$R_d = \frac{f_{h,1,d} \times t_1 \times d}{1 + \beta} \left\{ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \times \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \times \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \times \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right\}$$

$$R_d = 1,05 \times \frac{f_{h,1,d} \times t_1 \times d}{2 + \beta} \left\{ \sqrt{2\beta \times (1 + \beta) + \left[\frac{4\beta \times (2 + \beta) \times M_{y,d}}{f_{h,1,d} \times d \times t_1^2} \right]} - \beta \right\}$$

$$R_d = 1,05 \times \frac{f_{h,1,d} \times t_2 \times d}{1 + 2\beta} \left\{ \sqrt{2\beta^2 \times (1 + \beta) + \left[\frac{4\beta \times (1 + 2\beta) \times M_{y,d}}{f_{h,1,d} \times d \times t_2^2} \right]} - \beta \right\}$$

$$R_d = 1,15 \times \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \times \sqrt{2 \times M_{y,d} \times f_{h,1,d} \times d}$$

O critério de segurança do EC5 prescreve que se devem analisar cada uma destas expressões e utilizar como esforço resistente da ligação (R_d) o menor dos quatro valores obtidos.

Ligações em madeira – corte duplo

Para a situação do corte duplo, o EC5: 2004 sugere a análise de 4 diferentes modos de a ligação chegar a ruptura, como segue na Figura 3.14.

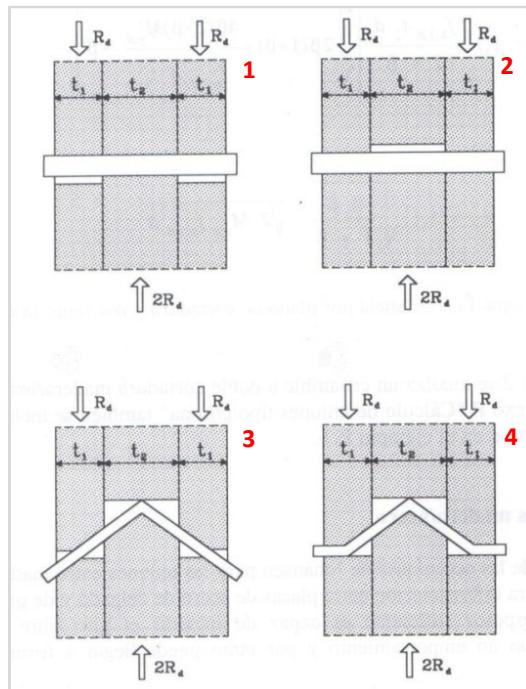


Figura 3.14 - Modos de falhas em ligações parafusadas para corte duplo. Fonte: AITIM, 2000.

Os modelos 1 e 2 representam a falha da ligação por embutimento na madeira exterior e interior, respectivamente.

Os modelos 3 e 4 representam a falha da ligação por flexão do parafuso causado pela madeira exterior e interior, respectivamente.

As expressões para a verificação de cada uma das situações seguem:

$$R_d = f_{h,1,d} \times t_1 \times d$$

$$R_d = 0,5 \times f_{h,1,d} \times t_2 \times d \times \beta$$

$$R_d = 1,05 \times \frac{f_{h,1,d} \times t_1 \times d}{2 + \beta} \left\{ \sqrt{2\beta \times (1 + \beta) + \left[\frac{4\beta \times (2 + \beta) \times M_{y,d}}{f_{h,1,d} \times d \times t_1^2} \right]} - \beta \right\}$$

$$R_d = 1,15 \times \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \times \sqrt{2 \times M_{y,d} \times f_{h,1,d} \times d}$$

O critério de segurança do EC5 prescreve que se devem analisar cada uma destas expressões e utilizar como esforço resistente da ligação (R_d) o menos dos quatro valores obtidos.

4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO PINUS TAEDA

Para se obter parâmetros de comparação com as estimativas teóricas das resistências das ligações, optou-se por realizar a caracterização da espécie de madeira *Pinus Taeda*.

Os ensaios realizados para obtenção desta caracterização foram:

- ✓ Ensaio do teor de umidade;
- ✓ Ensaio de peso-específico;
- ✓ Ensaio de compressão paralela às fibras;
- ✓ Ensaio de embutimento paralelo às fibras;
- ✓ Ensaio de embutimento perpendicular às fibras.

Algumas considerações a respeito dos ensaios são apresentadas pelo autor, devidos a alguns contratemplos decorrentes dos procedimentos de ensaio. Detalhes e explanações destas considerações serão fornecidos no decorrer deste trabalho.

4.1. Material

Neste tópico do trabalho está descrito como se realizou a caracterização da madeira escolhida pelo autor desta pesquisa. A espécie de madeira escolhida foi o *Pinus taeda*. Algumas características desta espécie seguem na Figura 4.1. Esta espécie foi escolhida pela disponibilidade de tal madeira, por parte do Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira – GIEM. Foram selecionadas peças de seção 5x10 cm, que foram desdobradas nas dimensões necessárias para confecção dos corpos-de-prova.

| <i>Pinus taeda</i> , Pinaceae (PINUS-TAEDA) | |
|--|---|
| Outros Nomes Populares | Pinus, pinheiro-americano, pinheiro-amarelo. |
| Características Gerais | Cor amarelo pálido, aspecto fibroso atenuado; textura fina, cheiro e gosto resinoso; grã direita. |
| Durabilidade Natural e Trabalhabilidade Química | Esta madeira não é considerada naturalmente durável, mas tem boa impregnabilidade por produtos químicos, devido a alta permeabilidade do cerne. |
| Uso na Construção Civil | Na construção civil têm usos leves internos e em esquadrias. |

Figura 4.1 - Ficha de caracterização do *Pinus taeda*. Fonte: VALLE, DENARDI e OLIVEIRA, 2008.

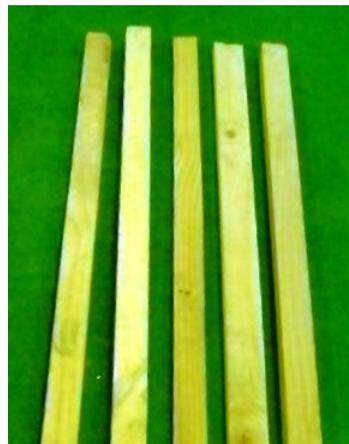


Figura 4.2 - Amostra de Pinus taeda utilizado na caracterização. Fonte: ACERVO.

4.2. Amostragem e Corpos-de-prova

Com relação à amostragem dos corpos-de-prova, estes foram obtidos de um único lote de madeiras. Na madeira destinada aos ensaios realizou-se uma classificação visual, conforme sugere a norma NBR 7190: 1997 - Anexo B, de maneira a garantir que os corpos-de-prova se apresentassem isentos de defeitos. Estes foram retirados de regiões afastadas das extremidades das peças de, pelo menos, cinco vezes a menor dimensão da seção transversal da peça considerada, mas de distância não menor que 30 cm da extremidade, respeitando os critérios de amostragem prescritos pela NBR 7190: 1997.

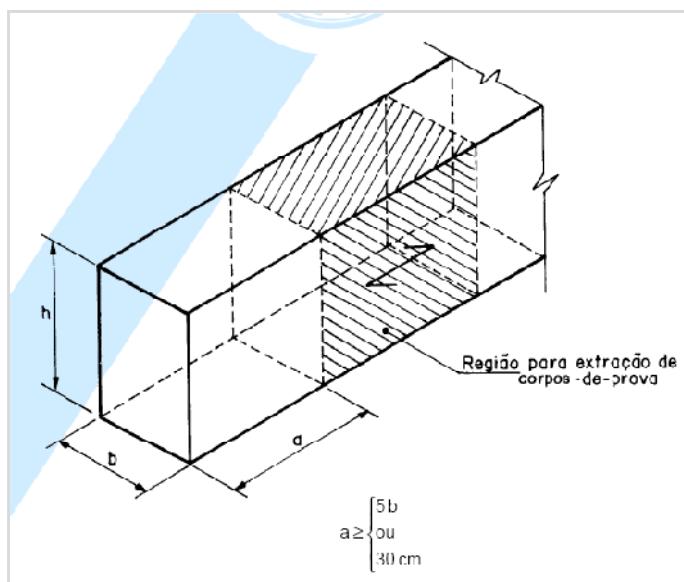


Figura 4.3 - Detalhe do local da extração dos corpos-de-prova. Fonte: NBR 7190: 1997.

As dimensões dos corpos-de-prova seguem nos itens abaixo.

4.2.1. Ensaio do teor de umidade da madeira e massa específica

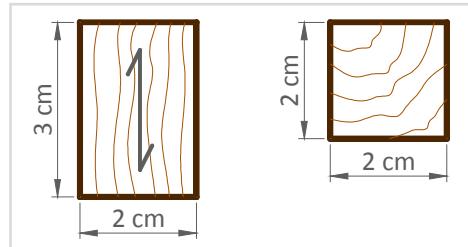


Figura 4.4 - Dimensões do corpo-de-prova.

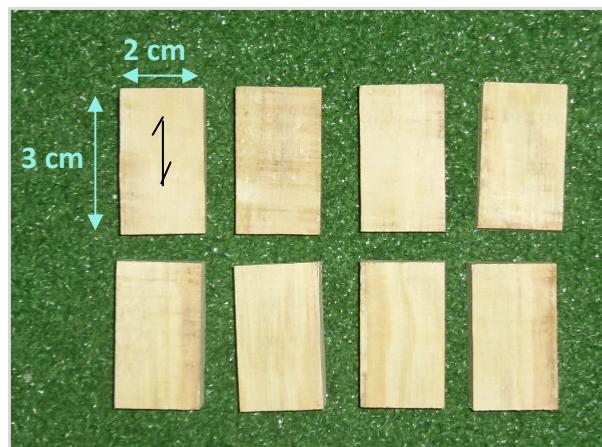


Figura 4.5 - Corpos-de-prova utilizados nos ensaios. Fonte: ACERVO.

4.2.2. Ensaio de compressão paralela às fibras

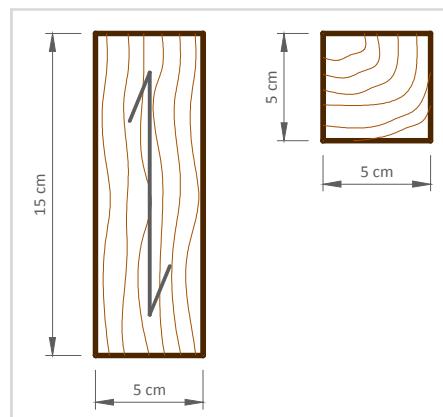


Figura 4.6 - Dimensões do corpo-de-prova de compressão paralela segundo a NBR 7190: 1997.

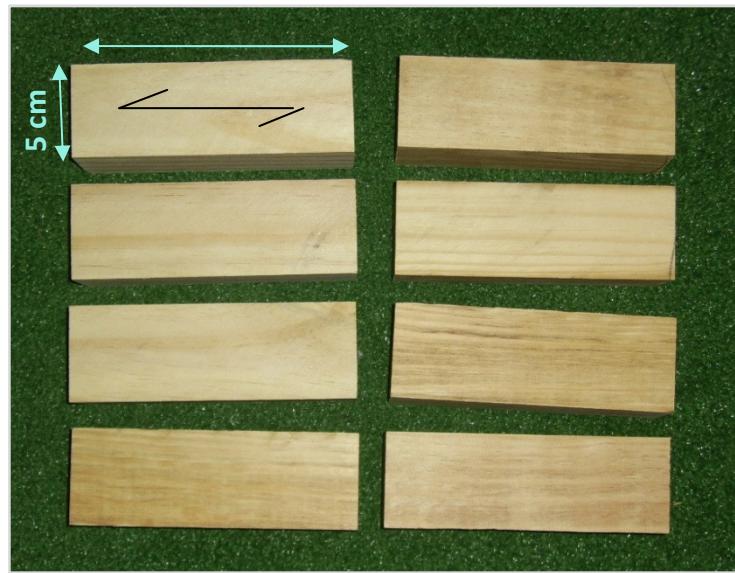


Figura 4.7 - Corpos-de-prova para o ensaio de compressão paralela às fibras, Fonte: ACERVO.

4.2.3. Ensaio de embutimento paralelo às fibras – NBR 7190: 1997

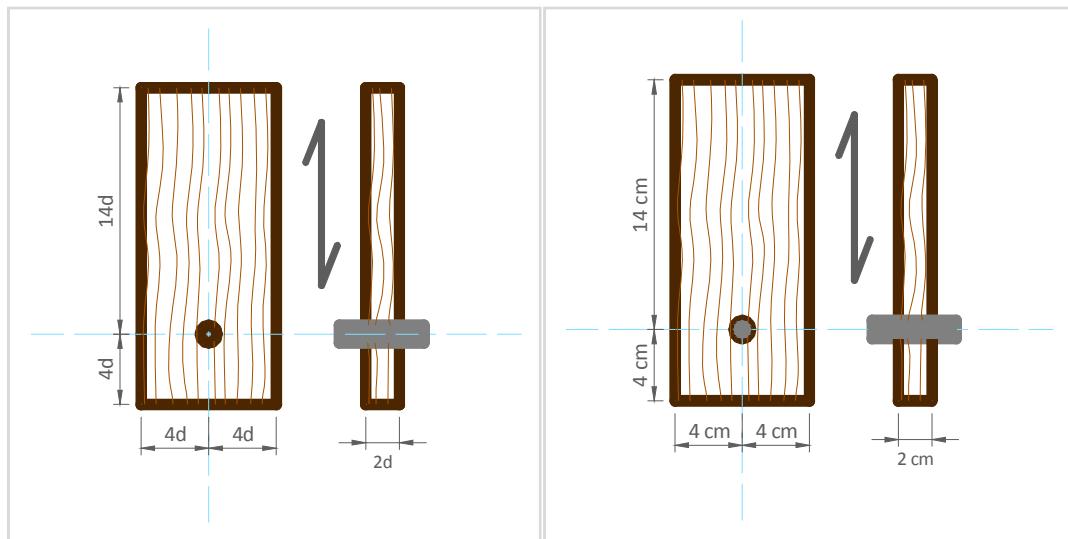


Figura 4.8 - Dimensões do corpo-de-prova de embedimento paralelo segundo a NBR 7190: 1997.

Na Figura 4.8 à esquerda encontra-se a recomendação da NBR 7190: 1997 para os corpos-de-prova de embedimento em função do diâmetro parafuso a ser usado. Na Figura 4.8 à direita, as dimensões do corpo-de-prova para um parafuso de 10 mm. Na Figura 4.9 se encontra o corpo-de-prova utilizado no ensaio de embedimento.

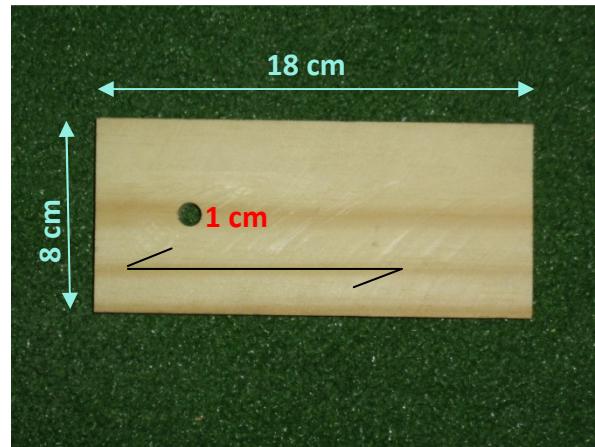


Figura 4.9 - Corpos-de-prova para o ensaio de embutimento paralelo às fibras. Fonte: ACERVO.



Figura 4.10 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de embutimento. Fonte: ACERVO.

4.2.4. Ensaio de embutimento paralelo às fibras – EC5: 2004

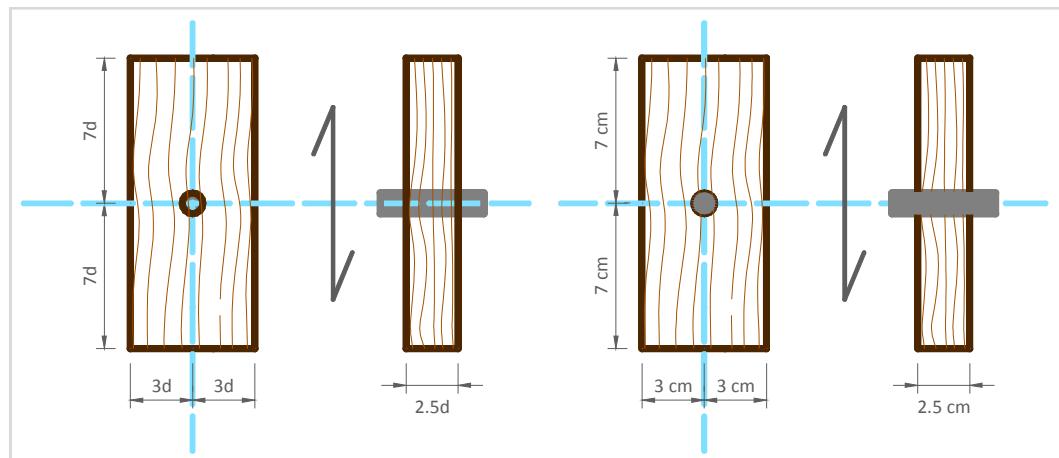


Figura 4.11 - Dimensões do corpo-de-prova de embutimento paralelo segundo o EC5: 2004.

Na Figura 4.11 à esquerda encontra-se a recomendação do EC5: 2004 para os corpos-de-prova de embutimento em função do diâmetro parafuso a ser usado. Na Figura 4.11 à direita, as dimensões do corpo-de-prova para um parafuso de 10 mm. Na Figura 4.12 se encontra o corpo-de-prova utilizado no ensaio de embutimento.

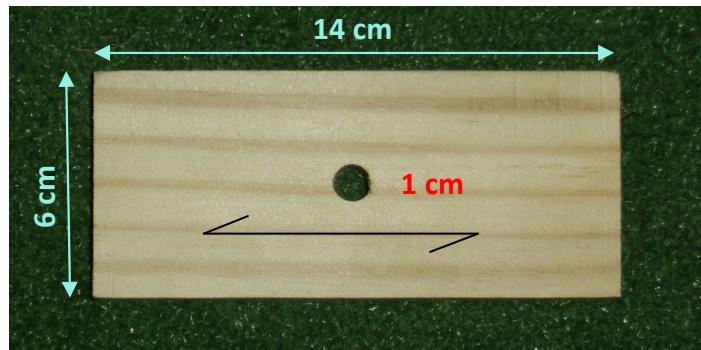


Figura 4.12 - Corpos-de-prova para o ensaio de embedimento paralelo às fibras. Fonte: ACERVO.



Figura 4.13 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de embedimento. Fonte: ACERVO.

4.2.5. Ensaio de embedimento perpendicular às fibras – EC5: 2004

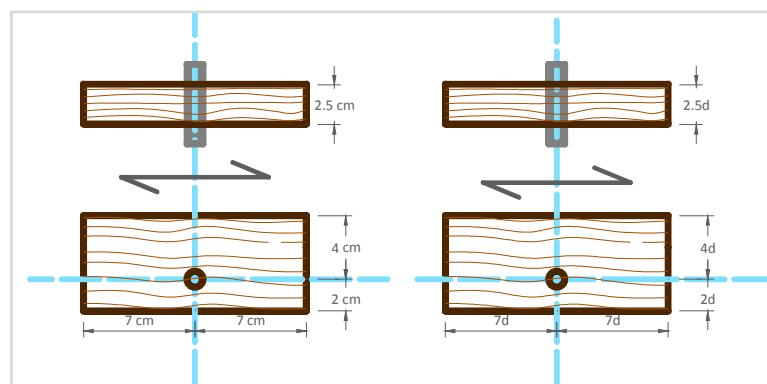


Figura 4.14 - Dimensões do corpo-de-prova de embedimento perpendicular segundo o EC5: 2004.

Na Figura 4.14 à direita encontra-se a recomendação do EC5: 2004 para os corpos-de-prova de embutimento em função do diâmetro parafuso a ser usado. Na Figura 4.14 à esquerda, as dimensões do corpo-de-prova para um parafuso de 10 mm. Na Figura 4.15 se encontra o corpo-de-prova utilizado no ensaio de embutimento perpendicular.

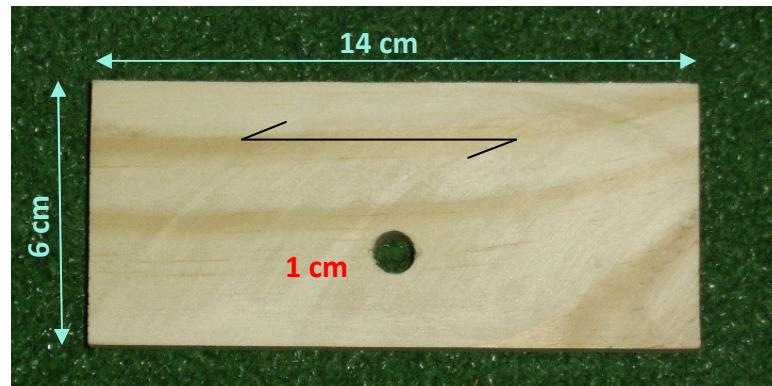


Figura 4.15 - Corpos-de-prova para o ensaio de embutimento perpendicular. Fonte: ACERVO.

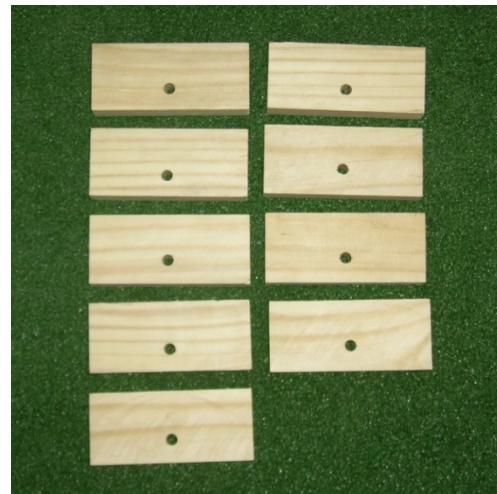


Figura 4.16 - Corpos-de-prova utilizados no ensaio de embutimento. Fonte: ACERVO.

4.3. Ensaio Do Teor De Umidade Da Madeira

Este ensaio foi realizado segundo prescrições da NBR 7190: 1997. Para uma melhor compreensão do ensaio, este será descrito em itens:

- ✓ Metodologia do ensaio;

- ✓ Realização do ensaio;
- ✓ Resultados.

4.3.1. Metodologia do ensaio

A realização deste ensaio foi executada somente segundo prescrições da NBR 7190: 1997, visto que, segundo considerações do autor, os resultados seriam aproximados devido à semelhança dos ensaios pelas demais referências normativas utilizadas nesta pesquisa. Logo, o resultado obtido por este ensaio foi extrapolado para as demais normas, para efeitos de dimensionamento no Estado Limite Último (ELU).

Como se tratava de uma espécie conhecida optou-se pela caracterização simplificada.

O teor de umidade é obtido pelo quociente entre a variação de massa úmido e seco da amostra pelo peso seco do corpo-de-prova. A secagem do corpo-de-prova é feita em estufa a uma temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Faz-se uma pesagem inicial dos corpos-de-prova e, em determinados intervalos de tempo faz-se uma nova pesagem.

Este procedimento deve ser realizado até que a diferença entre duas pesagens subseqüentes seja menor que 0,5%. A pesagem, que deve ter precisão de 0,01 gramas, deve ser feita em um período de tempo de 6 horas. O teor de umidade é dado pela equação:

$$H = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

- ✓ H – teor de umidade;
- ✓ P_h – massa do corpo-de-prova úmido;
- ✓ P_s – massa do corpo-de-prova seco.

4.3.2. Realização do ensaio

O ensaio de teor de umidade foi realizado com oito corpos-de-prova com as dimensões sugeridas pela NBR 7190: 1997. Em cada corpo-de-prova realizou-se duas

medidas em cada um das dimensões, de maneira a se obter um valor representativo do tamanho da amostra.

Foi feita uma pesagem inicial dos corpos-de-prova ($P_0=P_h$) e em seguida as oito amostras foram colocadas na estufa, já estabilizada a uma temperatura de aproximadamente 105 °C. Este processo foi feito às 09h00m. A segunda pesagem (P_1) foi feita às 15h30m tirando-se os corpos-de-prova da estufa, pesando-os e rapidamente os recolocando na estufa por mais um período de 6 horas.

A última pesagem (P_2) dos corpos-de-prova foi realizada às 21h00m, pois os valores obtidos apresentaram uma diferença menor que 0,5% entre esta e pesagem P_2 . Logo, como recomenda a norma, $P_2=P_s$. Todas as pesagens foram feita em uma balança eletrônica com precisão de 0,01g.

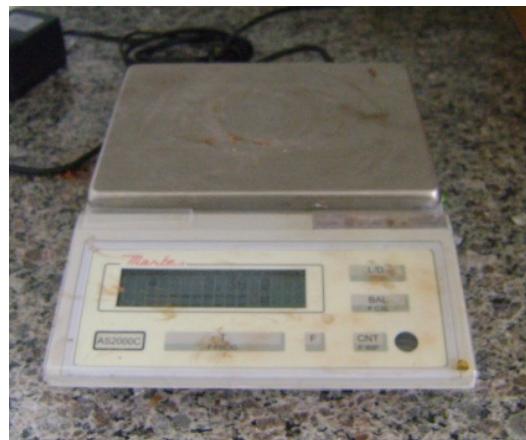


Figura 4.17 - Balança eletrônica utilizada na pesagem dos corpos-de-prova. Fonte: ACERVO.



Figura 4.18 - Estufa utilizada para secagem dos corpos-de-prova. Fonte: ACERVO.

A determinação da umidade se deu então pela aplicação da equação sugerida pela norma, sendo que a umidade adotada para o lote de madeira em questão foi o valor médio das umidades de cada corpo-de-prova.

4.3.3. Resultados

Na Tabela 4.1 e seguem os resultados encontrados.

Tabela 4.1 - Resultado das pesagens dos corpos-de-prova para ensaio do teor de umidade.

| UMIDADE (NBR 7190:1997) | | | | | |
|---------------------------|----------------|--------|----------------|---|-------------|
| Corpos-de-prova | P0 (g) [Ph] | P1 (g) | P2 (g) [Ps] | Diferença Entre 2 Últimas Pesagens (%) | Umidade (%) |
| B-U-01 | 12,21 | 10,83 | 10,81 | 0,18% | 12,95% |
| B-U-02 | 12,05 | 10,71 | 10,67 | 0,37% | 12,93% |
| B-U-03 | 11,85 | 10,44 | 10,43 | 0,10% | 13,61% |
| B-U-04 | 11,89 | 10,47 | 10,44 | 0,29% | 13,89% |
| B-U-05 | 12,03 | 10,65 | 10,65 | 0,00% | 12,96% |
| B-U-06 | 12,48 | 11,04 | 11,03 | 0,09% | 13,15% |
| B-U-07 | 12,25 | 10,78 | 10,78 | 0,00% | 13,64% |
| B-U-08 | 11,95 | 10,52 | 10,52 | 0,00% | 13,59% |
| Teor de Umidade Médio (%) | | | | | 13,34% |

4.4. Ensaio De Massa-Específico Aparente Da Madeira

Este ensaio foi realizado segundo prescrições da NBR 7190: 1997. Para uma melhor compreensão do ensaio, este será descrito em itens:

- ✓ Metodologia do ensaio;
- ✓ Realização do ensaio;
- ✓ Resultados.

4.4.1. Metodologia do ensaio

A realização deste ensaio foi executada somente segundo prescrições da NBR 7190: 1997, seguindo as mesmas considerações realizadas para o ensaio do teor de umidade.

O ensaio foi realizado em oito corpos-de-prova (utilizaram-se os mesmos corpos-de-prova do ensaio do teor de umidade), segundo a caracterização simplificada, obtendo-se o peso-específico através da média dos pesos específicos de cada corpo-de-prova.

O peso-específico aparente é obtido com a pesagem do corpo-de-prova úmido (umidade de 12%) com precisão de 0,01 gramas e medição das dimensões (também com umidade de 12%) com precisão de 0,1 mm. A seção do corpo-de-prova deve conter, pelo menos, cinco anéis de crescimento.

4.4.2. Realização do ensaio

Todas as medidas dos corpos-de-prova para o ensaio de peso-específico aparente foram realizadas com um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm.



Figura 4.19 - Paquímetro utilizado na medição dos corpos-de-prova. Fonte: ACERVO.

A equação que a norma fornece para cálculo do peso-específico aparente segue:

$$\rho_{ap} = \frac{P_{12\%}}{V_{12\%}}$$

- ✓ $P_{12\%}$ - Peso do corpo-de-prova com umidade de 12% (kg);
- ✓ $V_{12\%}$ - Volume aparente do corpo-de-prova com umidade de 12% (m^3).

Utilizou-se dos dados do ensaio do teor de umidade (dimensões e peso inicial) para a determinação do peso-específico aparente.

O resultado do ensaio do teor de umidade da madeira resultou em 13,34%, logo o peso-específico aparente deveria ser corrigido. Contudo, como esta variação se apresentou pequena, além de estar pendendo para o lado da segurança (visto que o peso específico será maior), este valor calculado será considerado como o peso-específico aparente com teor de umidade de 12%.

4.4.3. Resultados

Na Tabela 4.2 se encontram os resultados deste ensaio.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de peso-específico aparente.

| Corpos-de-prova | PESO ESPECÍFICO (NBR 7190: 1997) | | | | | | | | | | Ph (g) | Volume (cm ³) | ρ _{12%} (kg/m ³) | | | |
|--|----------------------------------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|--------------|--------|---------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| | DIMENSÕES (mm) | | | | | | h | | hm | | | | | | | |
| | L1 | | L1m | | L2 | | L2m | | | | | | | | | |
| B-U-01 | 31,15 | 31,03 | 31,09 | 21,51 | 21,43 | 21,47 | 49,82 | 49,74 | 49,78 | 12,21 | 33,23 | 367,5 | | | | |
| B-U-02 | 30,52 | 30,73 | 30,63 | 21,68 | 21,42 | 21,55 | 50,09 | 50,11 | 50,10 | 12,05 | 33,06 | 364,4 | | | | |
| B-U-03 | 30,79 | 30,85 | 30,82 | 20,71 | 20,97 | 20,84 | 50,83 | 50,81 | 50,82 | 11,85 | 32,64 | 363,0 | | | | |
| B-U-04 | 30,61 | 30,27 | 30,44 | 21,21 | 21,24 | 21,23 | 50,32 | 50,45 | 50,39 | 11,89 | 32,55 | 365,2 | | | | |
| B-U-05 | 30,00 | 30,24 | 30,12 | 21,50 | 21,61 | 21,56 | 49,80 | 49,68 | 49,74 | 12,03 | 32,29 | 372,5 | | | | |
| B-U-06 | 30,95 | 31,00 | 30,98 | 21,35 | 21,33 | 21,34 | 50,92 | 51,01 | 50,97 | 12,48 | 33,69 | 370,5 | | | | |
| B-U-07 | 29,77 | 29,82 | 29,80 | 20,42 | 20,54 | 20,48 | 50,35 | 50,28 | 50,32 | 12,25 | 30,70 | 399,0 | | | | |
| B-U-08 | 30,12 | 30,09 | 30,11 | 20,30 | 19,34 | 19,82 | 48,94 | 48,77 | 48,86 | 11,95 | 29,15 | 409,9 | | | | |
| Peso-específico Aparente Médio (kg/m³) | | | | | | | | | | 376,5 | | | | | | |

4.5. Ensaio De Compressão Paralela Às Fibras Da Madeira

Este ensaio foi realizado segundo prescrições da NBR 7190: 1997. Para uma melhor compreensão do ensaio, este será descrito em itens:

- ✓ Metodologia do ensaio;
- ✓ Realização do ensaio;
- ✓ Resultados.

4.5.1. Metodologia do ensaio

Os ensaios de compressão paralela às fibras foram executados segundo prescrições da NBR 7190: 1997 e também foram extrapolados para as demais normas, tendo em vista a simplificação das análises.

A resistência à compressão paralela às fibras do corpo-de-prova é definida pelo quociente entre a carga que o que leva à ruptura e a área de sua seção transversal. Esta resistência é obtida com o ensaio de, no mínimo, 6 corpos-de-prova (caracterização simplificada). A resistência é definida então pelo estimador probabilístico sugerido pela norma NBR 7190: 1997.

O ensaio de compressão paralela às fibras é feito com o auxílio de uma máquina de carga, que exerce uma força de compressão no corpo-de-prova à uma velocidade pré-determinada. Considera-se que o corpo-de-prova atingiu a ruptura quando a força atingir o patamar de escoamento (F_{\max}).

4.5.2. Realização do ensaio

Esta caracterização foi realizada com oito corpos-de-prova, cujas dimensões estão na Figura 4.6. As densidades destes corpos-de-prova variaram de 373,57 kg/m³ a 443,64 kg/m³.

Os ensaios foram realizados com auxílio de uma máquina de carga, indicada na Figura 4.20, devidamente equipada com dispositivo do tipo rótula, que auxilia para que não haja excentricidade na aplicação da força no corpo-de-prova.



Figura 4.20 - Máquina de carga utilizada no ensaio. Fonte: MAESTRI.

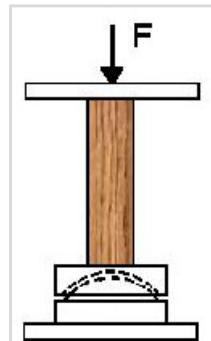


Figura 4.21 - Modelo de execução do ensaio. Fonte: MANRIQUEZ. 2008.

A carga foi aplicada nos corpos-de-prova com uma velocidade de 2,0 mm/minuto, e os ensaios duraram entre 2 e 5 minutos. A NBR 7190 prescreve que os ensaios sejam realizados a uma velocidade de 10 MPa/minuto. Contudo, os ensaios foram realizados com um parâmetro de deslocamento, devido ao equipamento disponível para ensaio funcionar com este parâmetro. Escolheu-se uma velocidade de 2,0 mm/minuto de maneira a aproximar do parâmetro da NBR 7190.

A metodologia da NBR 7190: 1997 prevê o uso de transdutores para medida da deformação dos corpos-de-prova, contudo, como o equipamento de ensaio já fornecia os valores de descolamento no corpo-de-prova, considerou-se plausível a utilização destes valores, de maneira a simplificar os ensaios.



Figura 4.22 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO.

Para a determinação da resistência de ruptura a 12% de umidade ($f_{c0,máx}$), calculou-se o quociente da força máxima obtida no ensaio ($F_{c0,máx}$) pela área do corpo de prova ($A_{seção}$).

$$f_{e0,máx} = \frac{F_{c0,máx}}{A_{seção}}$$

No **ANEXO A** se encontram os gráficos de ruptura dos corpos-de-prova.

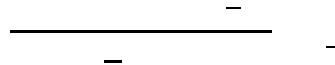


Figura 4.23 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO.

4.5.3. Resultados

Para a determinação dos valores característicos de resistência, utilizou-se do estimador probabilístico sugerido pela norma.

No estimador probabilístico apresentado pela NBR 7190: 1997, os resultados devem ser colocados em ordem crescente (_____) descartando-se o valor mais alto caso o número de resultados seja ímpar.



O valor _____ obtido na deve se apresentar menor do que 70% do valor médio (_____), nem menor que o valor de _____ .

Na tabelas que seguem estão apresentados os resultados do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira, segundo prescrições da NBR 7190: 1997.

Nas tabelas que seguem, utilizou-se a letra **F** para representar a força de ruptura dos corpos-de-prova, e o símbolo σ_u para representar a tensão de ruptura, ambos os resultados para um teor de umidade de 12%.

Tabela 4.3 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova.

| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | COMPRESSÃO (NBR 7190: 1997) | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|-------|----------------------|--------------|---------------------|-------|----------------------|--------------|--------|--------|
| | | L ₁ (mm) | | L _{1m} (mm) | | L ₂ (mm) | | L _{2m} (mm) | | h (mm) | |
| B-C-01 | 402,92 | 50,60 | 50,61 | 51,04 | 50,75 | 50,66 | 51,25 | 50,83 | 50,91 | 150,36 | 150,50 |
| B-C-02 | 424,03 | 50,41 | 50,25 | 50,49 | 50,38 | 50,12 | 50,98 | 50,58 | 50,56 | 150,37 | 150,55 |
| B-C-03 | 373,57 | 50,41 | 50,48 | 50,95 | 50,61 | 50,66 | 50,58 | 50,85 | 50,70 | 150,24 | 150,23 |
| B-C-04 | 415,66 | 50,52 | 50,73 | 50,66 | 50,64 | 50,77 | 50,52 | 50,71 | 50,67 | 150,30 | 150,20 |
| B-C-05 | 394,51 | 50,67 | 50,69 | 50,56 | 50,64 | 50,84 | 50,67 | 50,62 | 50,71 | 150,13 | 150,24 |
| B-C-06 | 419,02 | 51,14 | 51,09 | 50,97 | 51,07 | 51,12 | 51,16 | 51,26 | 51,18 | 151,07 | 151,52 |
| B-C-07 | 407,08 | 51,06 | 51,10 | 51,04 | 51,07 | 50,93 | 50,93 | 51,12 | 50,99 | 150,91 | 150,94 |
| B-C-08 | 443,64 | 51,10 | 51,19 | 50,98 | 51,09 | 51,15 | 50,74 | 51,16 | 51,02 | 151,23 | 151,23 |

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova.

| COMPRESSÃO (NBR 7190: 1997) | | | | | |
|-----------------------------|------------------------------|------------|-------------------------|---------|------------------|
| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | PESO (kgf) | ÁREA (mm ²) | F (kgf) | σ_u (MPa) |
| B-C-01 | 402,92 | 156,61 | 2583,85 | 6880,0 | 26,63 |
| B-C-02 | 424,03 | 162,52 | 2547,38 | 4110,0 | 16,13 |
| B-C-03 | 373,57 | 144,01 | 2565,93 | 5100,0 | 19,88 |
| B-C-04 | 415,66 | 160,23 | 2565,59 | 4150,0 | 16,18 |
| B-C-05 | 394,51 | 152,15 | 2567,95 | 5790,0 | 22,55 |
| B-C-06 | 419,02 | 165,69 | 2613,59 | 7600,0 | 29,08 |
| B-C-07 | 407,08 | 159,99 | 2604,06 | 7070,0 | 27,15 |
| B-C-08 | 443,64 | 174,87 | 2606,44 | 5990,0 | 22,98 |

Tabela 4.5 - Resultado da caracterização à compressão paralela às fibras.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 22,57 |
| Tensão Característica (MPa) | 16,13 |
| Desvio Padrão (MPa) | 4,92 |
| Variância (%) | 21,80 |

4.6. Ensaio De Embutimento Paralelo Às Fibras Da Madeira

Os ensaios de embutimento na madeira, por serem os mais importantes para este trabalho, foram executados segundo prescrições das três referências normativas analisadas nesta pesquisa.

Cada item segue com uma apresentação dos critérios de ensaio de cada norma.

4.6.1. Metodologia do ensaio – NBR 7190: 1997

Os ensaios de embutimento paralelo às fibras da madeira apresentados neste item foram executados segundo prescrições da NBR 7190: 1997 – Anexo B.

A resistência do corpo-de-prova ao embutimento paralelo às fibras é definida pelo quociente entre a carga que o que leva à ruptura e a área de sua seção de embutimento (produto da espessura da peça pelo diâmetro do parafuso). Esta resistência é obtida com o ensaio de, no mínimo, 6 corpos-de-prova (caracterização simplificada). A resistência é definida então pelo estimador probabilístico sugerido pela norma e já apresentado neste trabalho.

Com o auxílio de uma máquina de carga e um pino metálico, exerce-se uma força de compressão no corpo-de-prova que, devido ao pino metálico estar impedido de se movimentar, acaba gerando o embutimento na madeira. Deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova para ajuste da peça ensaiada.

4.6.2. Realização do ensaio – NBR 7190: 1997

Esta caracterização foi realizada com oito corpos-de-prova, cujas dimensões estão na Figura 4.8. As densidades destes corpos-de-prova variaram de 386,62 kg/m³ a 504,82 kg/m³. A umidade dos corpos-de-prova era de 13,34%.

Para o embutimento na madeira foram utilizados parafusos simples (considerar $f_{yd} = 240$ MPa, segundo a NBR 7190), cuja área de embutimento se encontrava fora da área da rosca continua.



Figura 4.24 - Parafusos utilizados no ensaio. Fonte: ACERVO.

Os ensaios de embutimento foram realizados com auxílio de uma máquina de carga, indicada na Figura 4.20.

A carga foi aplicada nos corpos-de-prova com uma velocidade de 2,0 mm/minuto, e os ensaios duraram entre 2 e 5 minutos.

A metodologia da NBR 7190: 1997 prevê o uso de transdutores para medida da deformação dos corpos-de-prova, contudo, como o equipamento de ensaio já fornecia os valores de deformação no corpo-de-prova, considerou-se plausível a utilização destes valores, de maneira a simplificar os ensaios.

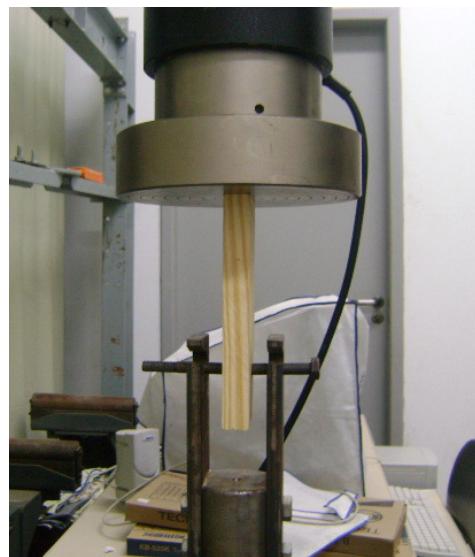


Figura 4.25 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO.

Para a determinação da resistência de ruptura a 12% de umidade ($f_{e0,máx}$), calculou-se o quociente da força máxima obtida no ensaio ($F_{e0,máx}$) pela área do corpo de prova ($A_{seção}$).

$$f_{e0,máx} = \frac{F_{e0,máx}}{A_{seção}}$$

No **ANEXO B** se encontram os gráficos de ruptura dos corpos-de-prova.



Figura 4.26 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO.

4.6.3. Resultados – NBR 7190: 1997

Para a determinação dos valores característicos de resistência, utilizou-se do estimador probabilístico sugerido pela norma.

No estimador probabilístico apresentado pela NBR 7190: 1997, os resultados devem ser colocados em ordem crescente () descartando-se o valor mais alto caso o número de resultados seja ímpar.

—
—
—

O valor obtido na deve se apresentar menor do que 70% do valor médio (), nem menor que o valor de .

Nas tabelas que seguem estão apresentados os resultados do ensaio de embutimento paralelo às fibras da madeira, segundo prescrições da NBR 7190: 1997.

Para as tabelas abaixo se utilizou a letra **F** para representar a força de ruptura dos corpos-de-prova, e o símbolo σ_u para representar a tensão de ruptura, ambos os resultados para um teor de umidade de 12%.

Tabela 4.6 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova.

| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | EMBUTIMENTO PARALELO (NBR 7190: 1997) | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------------|---------------------------------------|-------|----------------------|---------------------|-------|----------------------|--------|--------------|---------------------|---------------------|
| | | L ₁ (mm) | | L _{1m} (mm) | L ₂ (mm) | | L _{2m} (mm) | h (mm) | | h _m (mm) | |
| B-E1-01 | 386,62 | 20,66 | 21,14 | 21,22 | 21,01 | 81,12 | 80,89 | 81,03 | 81,01 | 181,9 | 181,9 181,90 |
| B-E1-02 | 390,07 | 21,63 | 21,61 | 21,60 | 21,61 | 81,27 | 81,21 | 81,13 | 81,20 | 181,9 | 182,0 181,95 |
| B-E1-03 | 412,77 | 21,11 | 20,90 | 21,20 | 21,07 | 81,12 | 81,02 | 81,08 | 81,07 | 181,5 | 181,2 181,35 |
| B-E1-04 | 403,00 | 21,28 | 21,26 | 21,22 | 21,25 | 81,28 | 81,20 | 81,24 | 81,24 | 181,1 | 182,0 181,55 |
| B-E1-05 | 400,85 | 21,43 | 21,36 | 21,40 | 21,40 | 81,11 | 81,06 | 80,97 | 81,05 | 181,8 | 181,5 181,65 |
| B-E1-06 | 504,82 | 20,79 | 20,71 | 20,71 | 20,74 | 80,43 | 80,29 | 80,30 | 80,34 | 181,2 | 181,0 181,10 |
| B-E1-07 | 436,26 | 20,82 | 20,82 | 21,23 | 20,96 | 80,62 | 80,49 | 80,63 | 80,58 | 179,0 | 180,0 179,50 |
| B-E1-08 | 414,25 | 20,78 | 20,79 | 20,76 | 20,78 | 80,30 | 80,39 | 80,32 | 80,34 | 179,1 | 179,5 179,30 |

Tabela 4.7 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova.

| EMBUTIMENTO PARALELO (NBR 7190: 1997) | | | |
|---------------------------------------|------------------------------|---------|------------------|
| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | F (kgf) | σ_u (MPa) |
| B-E1-01 | 386,62 | 339,0 | 16,14 |
| B-E1-02 | 390,07 | 346,0 | 16,01 |
| B-E1-03 | 412,77 | 371,0 | 17,61 |
| B-E1-04 | 403,00 | 388,0 | 18,26 |
| B-E1-05 | 400,85 | 410,0 | 19,16 |
| B-E1-06 | 504,82 | 268,0 | 12,92 |
| B-E1-07 | 436,26 | 330,0 | 15,75 |
| B-E1-08 | 414,25 | 413,0 | 19,88 |

Tabela 4.8 - Resultado da caracterização ao embutimento paralelo às fibras.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 16,97 |
| Tensão Característica (MPa) | 15,01 |
| Desvio Padrão (MPa) | 2,23 |
| Coeficiente de Variação (%) | 13,14 |

4.6.4. Metodologia do ensaio – EC5: 2004

Os ensaios de embutimento paralelo às fibras da madeira apresentados neste item foram executados segundo prescrições do EC5: 2004.

A resistência do corpo-de-prova ao embutimento paralelo às fibras é definida pelo quociente entre a carga que leva à ruptura e a área de sua seção de embutimento (produto da espessura da peça pelo diâmetro do parafuso). Esta resistência é obtida com o ensaio de, no mínimo, 6 corpos-de-prova (caracterização simplificada). A resistência característica é definida então pelos parâmetros da distribuição normal que serão apresentados a seguir.

Com o auxílio de uma máquina de carga e um pino metálico, exerce-se uma força de compressão no corpo-de-prova que, devido ao pino metálico estar impedido de se movimentar, acaba gerando o embutimento na madeira. Deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova para ajuste da peça ensaiada.

A velocidade de ensaio deve ser tal que os corpos-de-prova atinjam seu rompimento com o tempo de 300 ± 120 segundos.

4.6.5. Realização do ensaio – EC5: 2004

Esta caracterização foi realizada com nove corpos-de-prova, cujas dimensões estão na Figura 4.11. As densidades destes corpos-de-prova variaram de $400,25 \text{ kg/m}^3$ a $611,22 \text{ kg/m}^3$. A umidade dos corpos-de-prova era de 13,34%.

Para o embutimento na madeira foram utilizados parafusos simples (considerar $f_{yd} = 240 \text{ MPa}$), cuja are de embutimento se encontrava fora da área da rosca continua.

Os ensaios foram realizados com auxílio de uma máquina de carga, indicada na Figura 4.20.

A carga foi aplicada nos corpos-de-prova com uma velocidade de 2,0 mm/minuto, e os ensaios duraram entre 2 e 5 minutos.

A metodologia do EC5: 2004 prevê o uso de transdutores para medida da deformação dos corpos-de-prova, contudo, como o equipamento de ensaio já fornecia os valores de deformação no corpo-de-prova, considerou-se plausível a utilização destes valores, de maneira a simplificar os ensaios.

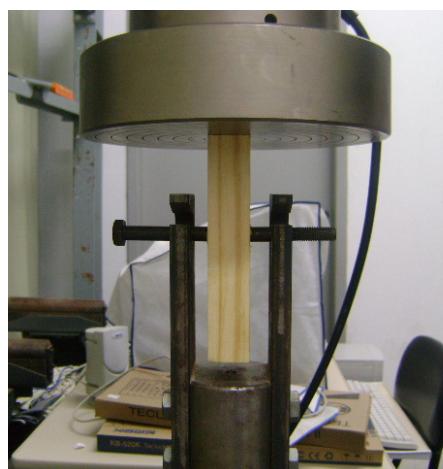


Figura 4.27 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO.

Para a determinação da resistência de ruptura a 12% de umidade ($f_{h0,\text{máx}}$), calculou-se o quociente da força máxima obtida no ensaio (força de ruptura - $F_{h0,\text{máx}}$) pela área do corpo de prova ($A_{\text{seção}}$).

$$f_{h0,\text{máx}} = \frac{F_{h0,\text{máx}}}{A_{\text{seção}}}$$

No **ANEXO C** se encontram os gráficos de ruptura dos corpos-de-prova.



Figura 4.28 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO.

4.6.6. Resultados – EC5: 2004

Para a determinação dos valores característicos de resistência, utilizou-se dos critérios do EC5: 2004:

- ✓ Considerar a amostra com uma distribuição normal;
- ✓ Calcular a média e o desvio padrão.

Os valores característicos serão dados por:

$$x_k = x_m - K \times s$$

Sendo:

- ✓ X_k – Valor característico;
- ✓ X_m – Valor médio;
- ✓ S – Desvio padrão;

- ✓ K – Coeficiente de confiança (usa-se $k=1,65$ para uma segurança de 95%).

A aplicação desta fórmula garante que, dos valores em uma amostra, apenas 5% deles terão probabilidade de ultrapassar o valor característico.

Na tabelas que seguem estão apresentados os resultados do ensaio de embutimento paralelo às fibras da madeira, segundo prescrições do EC5: 2004.

Para as tabelas abaixo se utilizou a letra **F** para representar a força de ruptura dos corpos-de-prova, e o símbolo σ_u para representar a tensão de ruptura, ambos os resultados para um teor de umidade de 12%.

Tabela 4.9 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova.

| EMBUTIMENTO PARALELO (EC5: 2004) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-------|-------|----------------------|---------------------|-------|-------|----------------------|--------|---------------|
| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | DIMENSÕES | | | | | | | | | |
| | | L ₁ (mm) | | | L _{1m} (mm) | L ₂ (mm) | | | L _{2m} (mm) | h (mm) | |
| C-E1-01 | 458,48 | 26,04 | 26,16 | 26,27 | 26,16 | 61,54 | 61,56 | 61,52 | 61,54 | 140,38 | 140,39 |
| C-E1-02 | 459,06 | 26,82 | 26,82 | 26,77 | 26,80 | 61,40 | 61,50 | 61,41 | 61,44 | 140,37 | 140,34 |
| C-E1-03 | 448,19 | 25,94 | 26,25 | 26,27 | 26,15 | 61,50 | 61,36 | 61,55 | 61,47 | 140,34 | 140,37 |
| C-E1-04 | 490,13 | 26,56 | 26,59 | 26,48 | 26,54 | 61,18 | 61,32 | 61,36 | 61,29 | 140,43 | 140,24 |
| C-E1-05 | 443,90 | 26,12 | 26,18 | 26,51 | 26,27 | 61,38 | 61,47 | 61,44 | 61,43 | 140,37 | 140,37 |
| C-E1-06 | 468,68 | 25,97 | 26,03 | 26,05 | 26,02 | 61,41 | 61,64 | 61,55 | 61,53 | 140,38 | 140,35 |
| C-E1-07 | 611,22 | 26,29 | 16,30 | 16,32 | 19,64 | 61,26 | 61,31 | 61,34 | 61,30 | 140,30 | 140,40 |
| C-E1-08 | 452,54 | 26,09 | 26,07 | 26,14 | 26,10 | 61,27 | 61,24 | 61,37 | 61,29 | 140,48 | 140,57 |
| C-E1-09 | 400,25 | 25,99 | 25,89 | 25,83 | 25,90 | 60,61 | 60,61 | 60,62 | 60,61 | 140,25 | 140,19 |
| | | | | | | | | | | | 140,22 |

Tabela 4.10 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova.

| EMBUTIMENTO PARALELO (EC5: 2004) | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------|------------|-------------------------|---------|------------------|
| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | PESO (kgf) | ÁREA (mm ²) | F (kgf) | σ_u (MPa) |
| C-E1-01 | 458,48 | 98,55 | 261,57 | 754,00 | 28,83 |
| C-E1-02 | 459,06 | 101,04 | 268,03 | 171,00 | 6,38 |
| C-E1-03 | 448,19 | 96,19 | 261,53 | 420,00 | 16,06 |
| C-E1-04 | 490,13 | 106,49 | 265,43 | 538,00 | 20,27 |
| C-E1-05 | 443,90 | 95,66 | 262,70 | 487,00 | 18,54 |
| C-E1-06 | 468,68 | 100,15 | 260,17 | 821,00 | 31,56 |
| C-E1-07 | 611,22 | 96,53 | 196,37 | 446,00 | 22,71 |
| C-E1-08 | 452,54 | 96,74 | 261,00 | 675,00 | 25,86 |
| C-E1-09 | 400,25 | 83,71 | 259,03 | 428,00 | 16,52 |

Tabela 4.11 - Resultado da caracterização ao embutimento paralelo às fibras.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 22,54 |
| Tensão Característica (MPa) | 13,06 |
| Desvio Padrão (MPa) | 5,75 |
| Variância (%) | 25,50 |

4.7. Ensaio De Embutimento Perpendicular Às Fibras Da Madeira

Os ensaios de embutimento perpendicular às fibras da madeira apresentados neste item foram executados segundo prescrições do EC5: 2004.

Os ensaios de embutimento perpendicular às fibras da madeira não foram realizados pela NBR 7190, devido falta de informação que esta norma fornece para esta configuração de ensaio de embutimento.

4.7.1. Metodologia do ensaio – EC5: 2004

A resistência do corpo-de-prova ao embutimento perpendicular às fibras é definida pelo quociente entre a carga que o que leva à ruptura e a área de sua seção de embutimento (produto da espessura da peça pelo diâmetro do parafuso). Esta resistência é obtida com o ensaio de, no mínimo, 6 corpos-de-prova (caracterização simplificada). A resistência característica é definida então pelos parâmetros da distribuição normal, já apresentados neste trabalho.

Com o auxílio de uma máquina de carga e um pino metálico, exerce-se uma força de compressão no corpo-de-prova que, devido ao pino metálico estar impedido de se movimentar, acaba gerando o embutimento na madeira. Deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova para ajuste da peça ensaiada.

A velocidade de ensaio deve ser tal que os corpos-de-prova atinjam seu rompimento com o tempo de 300 ± 120 segundos.

4.7.2. Realização do ensaio – EC5: 2004

Esta caracterização foi realizada com nove corpos-de-prova, cujas dimensões estão na Figura 4.14. As densidades destes corpos-de-prova variaram de $391,36 \text{ kg/m}^3$ a $463,66 \text{ kg/m}^3$. A umidade dos corpos-de-prova era de 13,34%.

Para o embutimento na madeira foram utilizados parafusos simples (considerar $f_{yd} = 240 \text{ MPa}$), cuja área de embutimento se encontrava fora da área da rosca continua.

Os ensaios foram realizados com auxílio de uma máquina de carga, indicada na Figura 4.20.

A carga foi aplicada nos corpos-de-prova com uma velocidade de 2,0 mm/minuto, e os ensaios duraram entre 2 e 5 minutos.

A metodologia do EC5: 2004 prevê o uso de transdutores para medida da deformação dos corpos-de-prova, contudo, como o equipamento de ensaio já fornecia os valores de deformação no corpo-de-prova, considerou-se plausível a utilização destes valores, de maneira a simplificar os ensaios.

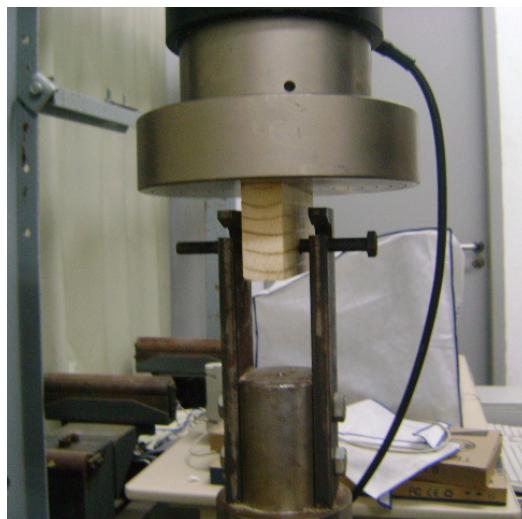


Figura 4.29 - Realização do ensaio. Fonte: ACERVO.

Para a determinação da resistência de ruptura a 12% de umidade ($f_{h90,\text{máx}}$), calculou-se o quociente da força máxima obtida no ensaio (força de ruptura - $F_{h90,\text{máx}}$) pela área do corpo de prova ($A_{\text{seção}}$).

$$f_{h90,\text{máx}} = \frac{F_{h90,\text{máx}}}{A_{\text{seção}}}$$

No **ANEXO D** se encontram os gráficos de ruptura dos corpos-de-prova.



Figura 4.30 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO.

4.7.3. Resultados - EC5: 2004

Para a determinação dos valores característicos de resistência, utilizou-se dos critérios do EC5: 2004:

- ✓ Considerar a amostra como uma distribuição normal;
- ✓ Calcular a média e o desvio padrão.

Os valores característicos serão dados por:

$$x_k = x_m - K \times s$$

Sendo:

- ✓ X_k – Valor característico;
- ✓ X_m – Valor médio;
- ✓ S – Desvio padrão;
- ✓ K – Coeficiente de confiança (usa-se $k=1,65$ para uma segurança de 95%).

A aplicação desta fórmula garante que, dos valores em uma amostra, apenas 5% deles terão probabilidade de ultrapassar o valor característico.

Na tabelas que seguem estão apresentados os resultados do ensaio de embutimento perpendicular às fibras da madeira, segundo prescrições do EC5: 2004.

Para as tabelas abaixo se utilizou a letra **F** para representar a força de ruptura dos corpos-de-prova, e o símbolo σ_u para representar a tensão de ruptura, ambos os resultados para um teor de umidade de 12%.

Tabela 4.12 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova.

| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | EMBUTIMENTO PERPENDICULAR (EC5: 2004) | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------------|---------------------------------------|-------|----------------------|---------------------|-------|----------------------|--------|--------------|---------------------|--------|---------------|
| | | DIMENSÕES | | | | | | | | | | |
| | | L ₁ (mm) | | L _{1m} (mm) | L ₂ (mm) | | L _{2m} (mm) | h (mm) | | h _m (mm) | | |
| C-E2-01 | 449,20 | 26,25 | 26,17 | 26,16 | 26,19 | 61,55 | 61,66 | 61,53 | 61,58 | 140,39 | 140,37 | 140,38 |
| C-E2-02 | 463,18 | 26,62 | 26,72 | 26,70 | 26,68 | 61,27 | 61,30 | 61,36 | 61,31 | 140,19 | 140,26 | 140,23 |
| C-E2-03 | 426,42 | 26,58 | 26,09 | 26,11 | 26,26 | 61,56 | 61,38 | 61,20 | 61,38 | 140,54 | 140,30 | 140,42 |
| C-E2-04 | 463,66 | 25,72 | 25,76 | 25,86 | 25,78 | 61,50 | 61,52 | 61,64 | 61,55 | 140,65 | 140,73 | 140,69 |
| C-E2-05 | 414,23 | 25,86 | 25,84 | 23,83 | 25,18 | 60,57 | 60,58 | 60,67 | 60,61 | 139,78 | 139,77 | 139,78 |
| C-E2-06 | 419,33 | 25,80 | 25,83 | 25,82 | 25,82 | 60,59 | 60,58 | 60,46 | 60,54 | 140,14 | 140,41 | 140,28 |
| C-E2-07 | 445,13 | 25,90 | 25,86 | 25,84 | 25,87 | 60,49 | 60,57 | 60,58 | 60,55 | 140,35 | 140,60 | 140,48 |
| C-E2-08 | 391,36 | 25,83 | 25,91 | 25,86 | 25,87 | 60,65 | 60,67 | 60,73 | 60,68 | 139,40 | 139,54 | 139,47 |
| C-E2-09 | 407,90 | 25,86 | 25,87 | 25,84 | 25,86 | 60,61 | 60,61 | 60,56 | 60,59 | 140,67 | 140,93 | 140,80 |

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova.

| EMBUTIMENTO PERPENDICULAR (EC5: 2004) | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------|------------|-------------------------|---------|------------------|
| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | PESO (kgf) | ÁREA (mm ²) | F (kgf) | σ_u (MPa) |
| C-E2-01 | 449,20 | 96,76 | 261,93 | 477,00 | 18,21 |
| C-E2-02 | 463,18 | 101,14 | 266,80 | 487,00 | 18,25 |
| C-E2-03 | 426,42 | 91,81 | 262,60 | 373,00 | 14,20 |
| C-E2-04 | 463,66 | 98,39 | 257,80 | 398,00 | 15,44 |
| C-E2-05 | 414,23 | 83,80 | 251,77 | 355,00 | 14,10 |
| C-E2-06 | 419,33 | 87,32 | 258,17 | 380,00 | 14,72 |
| C-E2-07 | 445,13 | 93,02 | 258,67 | 430,00 | 16,62 |
| C-E2-08 | 391,36 | 81,39 | 258,67 | 222,00 | 8,58 |
| C-E2-09 | 407,90 | 85,47 | 258,57 | 451,00 | 17,44 |

Tabela 4.14 - Resultado da caracterização ao embutimento paralelo às fibras.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 16,12 |
| Tensão Característica (MPa) | 13,26 |
| Desvio Padrão (MPa) | 1,74 |
| Variância (%) | 10,77 |

4.8. Ensaio Das Ligações Parafusadas

Os ensaios das ligações apresentados neste item foram executados segundo prescrições da NBR 7190: 1997. As dimensões adotadas para os corpos-de-prova de ligações foram baseadas em prescrições da norma em questão, sendo seguidas recomendações de espaçamentos, além das dimensões dos corpos-de-prova de embutimento paralelo às fibras da madeira. Na Figura 4.31 se encontram as dimensões adotadas para este corpo-de-prova.

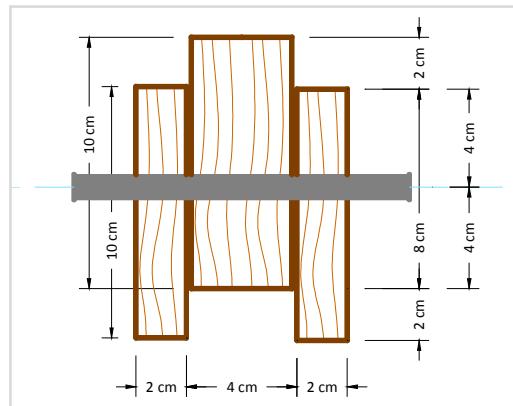


Figura 4.31 - Dimensões do corpo-de-prova de ligações.

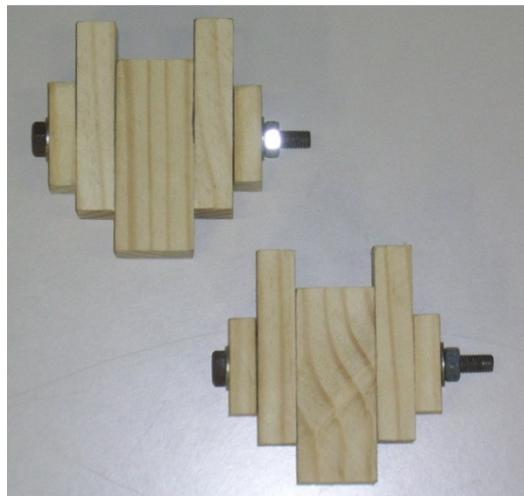


Figura 4.32 - Corpos-de-prova para o ensaio das ligações. Fonte: ACERVO.

Os ensaios das ligações não tiveram o objetivo de gerar uma caracterização destas ligações, foram apenas executados com um cunho indicativo. Os resultados aqui obtidos foram utilizados na comparação com o dimensionamento de uma ligação feita com a mesma madeira (Pinus taeda). Esta comparação será mostrada nos capítulos que seguem.

Os ensaios foram realizados com quatro corpos-de-prova, cujas dimensões estão na Figura 4.31. A umidade dos corpos-de-prova era de 13,34%.

Para o embutimento na madeira foram utilizados parafusos simples (considerar $f_{yd} = 240$ MPa), cuja área de embutimento se encontrava fora da área da rosca continua. O diâmetro dos parafusos utilizado foi de 10 mm.



Figura 4.33 - Parafusos usados nas ligações. Fonte: ACERVO.

Estes ensaios foram executados com auxílio de uma máquina de carga, indicada na Figura 4.20.

A carga foi aplicada nos corpos-de-prova com uma velocidade de 2,0 mm/minuto, e os ensaios duraram entre 2 e 5 minutos.

As ligações eram somente com um parafuso de resistência simples ($f_{yd} = 240$ MPa), sendo esta uma ligação com corte duplo.

Para a determinação da resistência da ligação, calculou-se a força máxima obtida no ensaio (força de ruptura -).

A força obtida com a ligação **B** foi desconsiderada nos cálculos, pois apresentou variação na ruptura que não condizia com as demais ligações. Na Tabela 4.17 se encontram os resultados destas variações. Esta diferença acredita-se, é atribuída à grande variação da densidade de cada peça da ligação, sendo que o rompimento se deu na peça menos densa, e consequentemente menos resistente.

No **ANEXO E** se encontram os gráficos de ruptura dos corpos-de-prova.

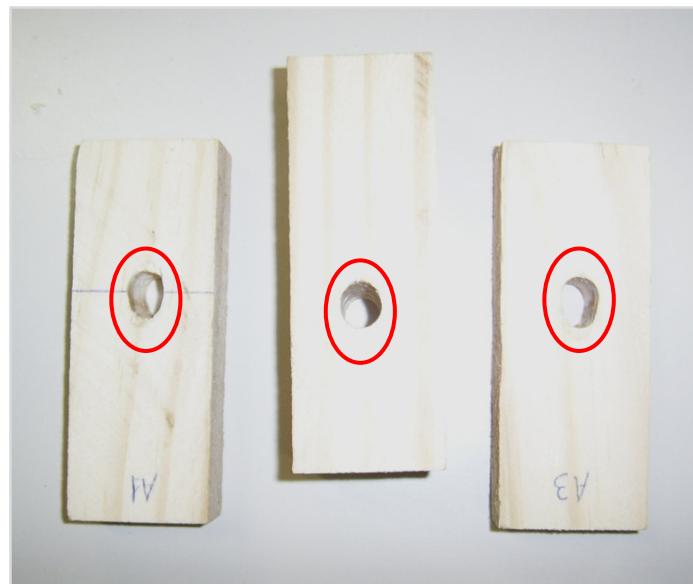


Figura 4.34 - Corpo-de-prova rompido. Fonte: ACERVO.

Na tabelas que seguem estão apresentados os resultados do ensaio das ligações.

Tabela 4.15 - Dados dimensionais dos corpos-de-prova.

| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | LIGAÇÕES | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------------|-----------|-------|---------------------|-------|----------------------|-------|---------------------|--------|----------------------|--------|--------|--------|
| | | DIMENSÕES | | L ₁ (mm) | | L _{1m} (mm) | | L ₂ (mm) | | L _{2m} (mm) | | h (mm) | |
| A1 | 458,90 | 38,70 | 39,11 | 38,91 | 20,30 | 20,22 | 20,26 | 101,30 | 101,29 | 101,30 | 101,30 | 101,30 | 101,30 |
| A2 | 462,75 | 37,00 | 37,70 | 37,35 | 40,67 | 41,05 | 40,86 | 101,35 | 101,42 | 101,39 | 101,39 | 101,39 | 101,39 |
| A3 | 450,71 | 39,83 | 40,17 | 40,00 | 20,08 | 19,08 | 19,58 | 100,35 | 100,39 | 100,37 | 100,37 | 100,37 | 100,37 |
| B1 | 376,09 | 40,58 | 40,72 | 40,65 | 19,63 | 19,43 | 19,53 | 101,15 | 100,81 | 100,98 | 100,98 | 100,98 | 100,98 |
| B2 | 501,60 | 37,54 | 37,49 | 37,52 | 40,57 | 40,92 | 40,75 | 101,10 | 100,93 | 101,02 | 101,02 | 101,02 | 101,02 |
| B3 | 453,53 | 39,20 | 39,37 | 39,29 | 20,47 | 20,49 | 20,48 | 101,78 | 100,91 | 101,35 | 101,35 | 101,35 | 101,35 |
| C1 | 449,04 | 38,32 | 38,29 | 38,31 | 19,84 | 19,97 | 19,91 | 101,13 | 101,34 | 101,24 | 101,24 | 101,24 | 101,24 |
| C2 | 479,11 | 37,30 | 38,11 | 37,71 | 41,29 | 41,01 | 41,15 | 101,40 | 101,22 | 101,31 | 101,31 | 101,31 | 101,31 |
| C3 | 434,02 | 38,15 | 38,59 | 38,37 | 19,84 | 19,87 | 19,86 | 100,74 | 100,74 | 100,74 | 100,74 | 100,74 | 100,74 |
| D1 | 430,61 | 38,55 | 39,15 | 38,85 | 19,86 | 19,55 | 19,71 | 101,24 | 101,52 | 101,38 | 101,38 | 101,38 | 101,38 |
| D2 | 438,19 | 38,41 | 38,45 | 38,43 | 40,91 | 40,44 | 40,68 | 101,28 | 101,36 | 101,32 | 101,32 | 101,32 | 101,32 |
| D3 | 456,07 | 38,33 | 38,23 | 38,28 | 19,87 | 19,88 | 19,88 | 101,09 | 101,28 | 101,19 | 101,19 | 101,19 | 101,19 |

Tabela 4.16 - Resultados do ensaio para cada corpo-de-prova.

| LIGAÇÕES | | | | | |
|-------------------------|------------------------------|------------|-------------------------|---------|--|
| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | PESO (kgf) | ÁREA (mm ²) | F (kgf) | |
| A1 | 458,90 | 36,64 | 788,22 | 1305,0 | |
| A2 | 462,75 | 71,60 | 1526,12 | | |
| A3 | 450,71 | 35,43 | 783,20 | | |
| B1 | 376,09 | 30,15 | 793,89 | 790,0 | |
| B2 | 501,60 | 77,45 | 1528,55 | | |
| B3 | 453,53 | 36,98 | 804,56 | | |
| C1 | 449,04 | 34,66 | 762,46 | 1360,0 | |
| C2 | 479,11 | 75,31 | 1551,56 | | |
| C3 | 434,02 | 33,31 | 761,84 | | |
| D1 | 430,61 | 33,42 | 765,54 | 1330,0 | |
| D2 | 438,19 | 69,40 | 1563,14 | | |
| D3 | 456,07 | 35,11 | 760,82 | | |
| Resistência Média (MPa) | | 1331,67 | | | |
| Desvio Padrão (MPa) | | 27,54 | | | |
| Variância (%) | | 2,07 | | | |

Tabela 4.17 - Variação das densidades das ligações.

| LIGAÇÕES | | | | |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| Corpos-de-prova | ρ (kgf/m ³) | ρ_m (kgf/m ³) | Desvio Padrão (kgf/m ³) | Variância (%) |
| A1 | 458,90 | | | |
| A2 | 462,75 | 457,46 | 6,15 | 1,35 |
| A3 | 450,71 | | | |
| B1 | 376,09 | | | |
| B2 | 501,60 | 443,74 | 63,33 | 14,27 |
| B3 | 453,53 | | | |
| C1 | 449,04 | | | |
| C2 | 479,11 | 454,05 | 22,96 | 5,06 |
| C3 | 434,02 | | | |
| D1 | 430,61 | | | |
| D2 | 438,19 | 441,63 | 13,07 | 2,96 |
| D3 | 456,07 | | | |

5. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

Após executados os cálculos de quantificação das cargas de uma estrutura em madeira, cálculos estes encontrados nos Anexos, partiu-se para o dimensionamento de algumas ligações da treliça proposta. As ligações escolhidas foram aquelas que conectavam as barras mais solicitadas da estrutura.

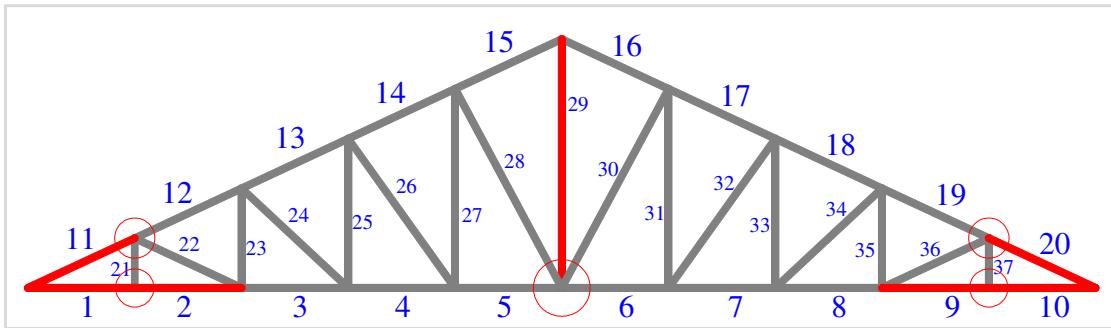


Figura 5.1 - Detalhe das barras escolhidas para dimensionamento de suas ligações.

Como indicado a Figura 5.1, as barras escolhidas foram:

- ✓ **Barras 1, 2, 9 e 10** – Ligações paralelas às fibras (0°);
- ✓ **Barra 29** – Ligação perpendicular às fibras (90°);
- ✓ **Barras 11 e 20** – Ligação mais solicitada da estrutura (65° em relação às fibras).

Do dimensionamento da treliça obtiveram-se as cargas para os dimensionamentos das ligações supracitadas. Estas cargas se encontram resumidas na Tabela 5.1. Estas cargas já estão majoradas, de acordo com os coeficientes de ponderação de cada uma das normas. Além disto, a combinação apresentada foi a combinação favorável, cujos valores se mostraram maiores que as combinações desfavoráveis.

Tabela 5.1 - Resumo das cargas (kN) aplicadas no dimensionamento das ligações.

| Barra | Ângulo | Angelim pedra verdadeiro - F (kN) | | |
|-------------------|--------|-----------------------------------|-------------|----------------|
| | | EC5: 2004 | NB-11: 1982 | NBR 7190: 1997 |
| | | Favorável | Favorável | Favorável |
| 1 // 2 // 9 // 10 | 0° | 76,53 | 50,48 | 70,55 |
| 29 | 90° | 34,76 | 22,45 | 31,37 |
| 11 // 20 | 65° | -85,93 | -56,45 | -78,89 |

| Barra | Ângulo | Garapa - F (kN) | | |
|-------------------|--------|-----------------|-------------|----------------|
| | | EC5: 2004 | NB-11: 1982 | NBR 7190: 1997 |
| | | Favorável | Favorável | Favorável |
| 1 // 2 // 9 // 10 | 0° | 71,94 | 47,13 | 65,82 |
| 29 | 90° | 32,86 | 21,07 | 29,41 |
| 11 // 20 | 65° | -80,87 | -52,75 | -73,67 |

| Barra | Ângulo | Cedro amargo - F (kN) | | |
|-------------------|--------|-----------------------|-------------|----------------|
| | | EC5: 2004 | NB-11: 1982 | NBR 7190: 1997 |
| | | Favorável | Favorável | Favorável |
| 1 // 2 // 9 // 10 | 0° | 66,39 | 39,98 | 60,00 |
| 29 | 90° | 30,58 | 19,35 | 27,00 |
| 11 // 20 | 65° | -74,75 | -48,18 | -67,23 |

| Barra | Ângulo | Eucalipto citriodora - F (kN) | | |
|-------------------|--------|-------------------------------|-------------|----------------|
| | | EC5: 2004 | NB-11: 1982 | NBR 7190: 1997 |
| | | Favorável | Favorável | Favorável |
| 1 // 2 // 9 // 10 | 0° | 75,80 | 49,88 | 69,80 |
| 29 | 90° | 34,47 | 22,20 | 31,06 |
| 11 // 20 | 65° | -85,12 | -63,79 | -78,05 |

| Barra | Ângulo | Peroba rosa - F (kN) | | |
|-------------------|--------|----------------------|-------------|----------------|
| | | EC5: 2004 | NB-11: 1982 | NBR 7190: 1997 |
| | | Favorável | Favorável | Favorável |
| 1 // 2 // 9 // 10 | 0° | 71,16 | 45,51 | 65,01 |
| 29 | 90° | 32,55 | 20,80 | 29,09 |
| 11 // 20 | 65° | -80,00 | -52,07 | -72,77 |

| Barra | Ângulo | Pinus eliote - F (kN) | | |
|-------------------|--------|-----------------------|-------------|----------------|
| | | EC5: 2004 | NB-11: 1982 | NBR 7190: 1997 |
| | | Favorável | Favorável | Favorável |
| 1 // 2 // 9 // 10 | 0° | 65,54 | 42,62 | 59,18 |
| 29 | 90° | 30,22 | 19,19 | 26,67 |
| 11 // 20 | 65° | -73,81 | -47,77 | -66,33 |

Para proceder-se à análise e verificação da hipótese adotada, utilizaram-se características mecânicas de outras espécies de madeiras consultadas na literatura, além da espécie *Pinus taeda*, cuja caracterização simplificada foi executada pelo autor e seus resultados se encontram nesta pesquisa.

Escolheram-se 6 espécies de madeiras, classificando-as de acordo com suas densidades aparentes. Visando uma melhor distribuição dos resultados, as 6 espécies foram divididas desta forma:

- ✓ Alta densidade (AD);
- ✓ Média densidade (MD);

- ✓ Baixa densidade (BD).

Os dados das propriedades mecânicas destas espécies foram obtidos do site do Instituto de Pesquisas tecnológicas – IPT <www.ipt.br>.

A análise com as diferentes espécies tem o objetivo de aplicar os critérios de cálculo em diferentes classes de resistência de madeiras. Isto tornou as análises mais amplas e forneceu mais dados para um possível indicativo do que ocorre em uma situação real de uso da estrutura.

Abaixo seguem as espécies escolhidas, bem como a classificação feita com base na densidade aparente de cada espécie. A definição dos limites de classificação das densidades foi sugerida pelo autor da pesquisa.

Alta densidade ($\rho \geq 980 \text{ kg/m}^3$) – Angelim pedra verdadeiro (1090 kg/m³) e Eucalipto citriodora (1040 kg/m³).

Média densidade ($750 \text{ kg/m}^3 < \rho < 980 \text{ kg/m}^3$) – Garapa (830 kg/m³) e Peroba rosa (790 kg/m³).

Baixa densidade ($\rho \leq 750 \text{ kg/m}^3$) – Cedro amargo (530 kg/m³) e Pinus eliote (480 kg/m³).

Para se obter as resistências nas formas exigidas pelas diferentes normas usaram-se relações de estimativas apresentadas pela NBR 7190: 1997. Na Tabela 5.2 e Tabela 5.3 seguem resumos dos dados obtidos.

Tabela 5.2 - Resumo da caracterização simplificada de algumas espécies.

| ESPÉCIE | | | ρ_{ap} (kg/m ³) | Resist. Ruptura - Madeira Verde (MPa) | Resist. Ruptura - Umidade 15% (MPa) |
|------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Classe Densidade | Nome Científico | Nome Popular | | | |
| Alta Densidade | <i>Dinizia excelsa</i> | Angelim pedra verdadeiro | 1090 | 65,2 | 80,9 |
| | <i>Eucalyptus citriodora</i> | Eucalipto citriodora | 1040 | 51,1 | 62,8 |
| Média Densidade | <i>Apuleia leiocarpa</i> | Garapa | 830 | 37,3 | 54,3 |
| | <i>Aspidosperma polyneuron</i> | Peroba rosa | 790 | 41,6 | 54,4 |
| Baixa Densidade | <i>Cedrela odorata</i> | Cedro amargo | 530 | 28,0 | 39,1 |
| | <i>Pinus elliotii</i> | Pinus eliote | 480 | 18,5 | 31,5 |

Fonte: IPT.

As densidades encontradas na tabela são dadas para um teor de umidade de 15%, bem como as resistências à ruptura.

Na Tabela 5.3 podem ser encontrados os valores corrigidos que serão usados nos dimensionamentos das ligações parafusadas em madeira. Os símbolos σ_p e σ_n referem-se, respectivamente, às tensões admissíveis paralela às fibras e perpendicular às fibras.

Tabela 5.3 - Valores corrigidos das resistências das espécies.

| Nome Popular | σ_p (MPa) | σ_n (MPa) | f_{cm} (MPa) | $f_{co,k}$ (MPa) |
|--------------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|
| Angelim pedra verdadeiro | 11,74 | 2,93 | 85,75 | 60,03 |
| Eucalipto citriodora | 9,20 | 2,30 | 66,57 | 46,60 |
| Garapa | 6,71 | 1,68 | 57,56 | 40,29 |
| Peroba rosa | 7,49 | 1,87 | 57,66 | 40,36 |
| Cedro amargo | 5,04 | 1,26 | 41,45 | 29,01 |
| Pinus eliote | 3,33 | 0,83 | 33,39 | 23,37 |

| | |
|------------|---|
| σ_p | Tensão admissível paralela às fibras |
| σ_n | Tensão admissível perpendicular às fibras |
| f_{cm} | Resistência média à 12% de umidade |
| $f_{co,k}$ | Resistência característica à 12% de umidade |

O dimensionamento das ligações por cada uma das normas foi feito através de uma planilha eletrônica, utilizando as fórmulas já apresentadas. Todas as planilhas de dimensionamento seguem no **ANEXO G**. Os gráficos obtidos nestes dimensionamentos serão apresentados nos itens que seguem.

A apresentação dos resultados dar-se-á por meio da análise dos gráficos que correlacionam o número de parafusos obtidos no dimensionamento com o diâmetro do parafuso utilizado. Analisou-se, primeiramente, a solicitação paralela e a solicitação perpendicular. Dentro destes itens, analisou-se também a influência do fator de minoração 0,4 utilizado na formulação da NBR 7190: 1997.

$$R_{vd,1} = 0,4 \times \frac{t^2}{\beta} \times f_{e\theta,d}$$

$$R^*_{vd,1} = \frac{t^2}{\beta} \times f_{e\theta,d}$$

O termo $\frac{t^2}{\beta}$ é apenas uma simplificação da expressão $t \times d$, que representa a área de compressão do parafuso sobre a madeira. Logo, multiplicando-se a área comprimida da madeira pela resistência que esta madeira apresenta ao embutimento do parafuso, teríamos a força que poderia ser aplicada sem que houvesse falha na ligação por parte da madeira. Vale ressaltar que as resistências foram devidamente minoradas pelos coeficientes de ponderação (γ_m) e modificação (K_{mod}), como sugere a

NBR 7190: 1997 e no EC5: 2004. Na NB-11: 1951, não há a utilização destes coeficientes, mas sim outros valores já apresentados nesta pesquisa (capítulo 3).

Ao se aplicar o critério de dimensionamento, numa situação de projeto com $K_{mod}=0,45$ e com $\gamma_m=1,4$, além do coeficiente **0,4**, utilizar-se-ia aproximadamente 13% da resistência característica da madeira, sem contar com os coeficientes de majoração já aplicados nas cargas. Esta situação está muito abaixo dos valores que realmente ocorrem em serviço.

$$f_{c,d} = k_{mod} \times \frac{f_{c,k}}{\gamma_m}$$

$$f_{e,d} = f_{c,d}$$

$$f_{e,d} = 0,45 \times \frac{f_{c,k}}{1,4}$$

$$R_{vd,1} = 0,4 \times \frac{t^2}{\beta} \times f_{e\theta,d}$$

$$R_{vd,1} = 0,4 \times t \times d \times 0,45 \times \frac{f_{c,k}}{1,4}$$

$$R_{vd,1} = \mathbf{0,129} \times (t \times d \times f_{c,k})$$

Como já supracitado, as seis espécies escolhidas para análise estão divididas em 3 grupos de densidade. Isto foi feito para se verificar o comportamento dos dimensionamentos das ligações em diferentes faixas de densidade.

Com relação ao dimensionamento pelo EC5: 2004, foram feitas algumas considerações a respeito da resistência ao embutimento:

- ✓ Adotou-se para resistência ao embutimento das madeiras selecionadas para o dimensionamento pelo EC5: 2004 a mesma resistência adotada pela NBR 7190: 1997. O mesmo se fez com relação à resistência ao embutimento perpendicular às fibras da madeira;

$$f_{0h,k} = f_{c0,k}$$

$$f_{90h,k} = 0,25 \times f_{c0,k} \times \alpha_e$$

- ✓ Para a obtenção da resistência a um dado ângulo θ diferente de 0° ou 90° , utilizou-se da fórmula de Hankinson (1), e não a expressão fornecida pelo EC5:

2004 (2), que inclui um parâmetro que depende da espécie ser conífera ou dicotiledônea, o que pode não funcionar bem para as espécies brasileiras.

$$f_{\theta h,d} = \frac{f_{0h,d} \times f_{90h,d}}{f_{0h,d} \times \sin^2 \theta + f_{90h,d} \times \cos^2 \theta} \quad (1)$$

$$f_{\theta h,d} = \frac{f_{0h,d}}{k_{90} \times \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \quad (2)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \times d \quad (\text{Coníferas})$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \times d \quad (\text{Dicotiledôneas})$$

$$f_{h0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k$$

Esta decisão foi tomada, pois a equação para estimar a resistência ao embutimento paralelo às fibras da madeira bem como a resistência ao embutimento perpendicular às fibras da madeira era de origem empírica, portanto adaptadas para as características das madeiras locais.

Os resultados obtidos com estas relações do EC5 eram contra a segurança ao comparar-se aos valores sugeridos pela NBR 7190: 1997. Fez-se alguns testes, através de planilhas eletrônicas e os valores obtidos pelo EC5: 2004 na maioria dos casos se mostraram superiores que os da NBR 7190.

O aumento na variação entre os valores era inversamente proporcional ao diâmetro do parafuso e também inversamente proporcional ao ângulo entre as peças da ligação. As maiores diferenças se encontraram com um parafuso de diâmetro 10,0 mm e ângulo de inclinação entre peças da ligação de 0°. Alguns dados seguem nas tabelas abaixo.

Tabela 5.4 – Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 10 mm e ângulo de 0°.

| Nome Popular | f _{c0,k} (MPa) | NBR 7190: 1997 | | | EC5: 2004 | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|
| | | f _{e0,k} (MPa) | f _{e90,k} (MPa) | f _{e,d} (MPa) | f _{h0,k} (MPa) | k ₉₀ | f _{h,k} (MPa) |
| Angelim pedra verdadeiro | 60,03 | 60,03 | 28,36 | 60,03 | 80,44 | 2,85 | 80,44 |
| Eucalipto citriodora | 46,60 | 46,60 | 22,02 | 46,60 | 76,75 | 2,85 | 76,75 |
| Garapa | 40,29 | 40,29 | 19,04 | 40,29 | 61,25 | 2,85 | 61,25 |
| Peroba rosa | 40,36 | 40,36 | 19,07 | 40,36 | 58,30 | 2,85 | 58,30 |
| Cedro amargo | 29,01 | 29,01 | 13,71 | 29,01 | 39,11 | 2,85 | 39,11 |
| Pinus eliote | 23,37 | 23,37 | 11,04 | 23,37 | 40,59 | 2,40 | 40,59 |
| | | d (mm) | 10,0 | | | | |
| | | αe | 1,89 | | | | |
| | | θ (°) | 0 | | | | |

Tabela 5.5 - Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 20 mm e ângulo de 0°.

| Nome Popular | f _{co,k} (MPa) | NBR 7190: 1997 | | | EC5: 2004 | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|
| | | f _{e0,k} (MPa) | f _{e90,k} (MPa) | f _{e,d} (MPa) | f _{h0,k} (MPa) | k ₉₀ | f _{h,k} (MPa) |
| Angelim pedra verdadeiro | 60,03 | 60,03 | 20,71 | 60,03 | 71,50 | 4,35 | 71,50 |
| Eucalipto citriodora | 46,60 | 46,60 | 16,08 | 46,60 | 68,22 | 4,35 | 68,22 |
| Garapa | 40,29 | 40,29 | 13,90 | 40,29 | 54,45 | 4,35 | 54,45 |
| Peroba rosa | 40,36 | 40,36 | 13,93 | 40,36 | 51,82 | 4,35 | 51,82 |
| Cedro amargo | 29,01 | 29,01 | 10,01 | 29,01 | 34,77 | 4,35 | 34,77 |
| Pinus eliote | 23,37 | 23,37 | 8,06 | 23,37 | 36,08 | 3,90 | 36,08 |

| | |
|-------------------|------|
| d (mm) | 20,0 |
| α_e | 1,38 |
| $\theta (^\circ)$ | 0 |

Tabela 5.6 - Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 10 mm e ângulo de 90°.

| Nome Popular | f _{co,k} (MPa) | NBR 7190: 1997 | | | EC5: 2004 | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|
| | | f _{e0,k} (MPa) | f _{e90,k} (MPa) | f _{e,d} (MPa) | f _{h0,k} (MPa) | k ₉₀ | f _{h,k} (MPa) |
| Angelim pedra verdadeiro | 60,03 | 60,03 | 28,36 | 28,36 | 80,44 | 2,85 | 28,23 |
| Eucalipto citriodora | 46,60 | 46,60 | 22,02 | 22,02 | 76,75 | 2,85 | 26,93 |
| Garapa | 40,29 | 40,29 | 19,04 | 19,04 | 61,25 | 2,85 | 21,49 |
| Peroba rosa | 40,36 | 40,36 | 19,07 | 19,07 | 58,30 | 2,85 | 20,46 |
| Cedro amargo | 29,01 | 29,01 | 13,71 | 13,71 | 39,11 | 2,85 | 13,72 |
| Pinus eliote | 23,37 | 23,37 | 11,04 | 11,04 | 40,59 | 2,40 | 16,91 |

| | |
|-------------------|------|
| d (mm) | 10,0 |
| α_e | 1,89 |
| $\theta (^\circ)$ | 90 |

Tabela 5.7 - Valores das resistências ao embutimento, com parafuso de 20 mm e ângulo de 90°.

| Nome Popular | f _{co,k} (MPa) | NBR 7190: 1997 | | | EC5: 2004 | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|
| | | f _{e0,k} (MPa) | f _{e90,k} (MPa) | f _{e,d} (MPa) | f _{h0,k} (MPa) | k ₉₀ | f _{h,k} (MPa) |
| Angelim pedra verdadeiro | 60,03 | 60,03 | 20,71 | 20,71 | 71,50 | 4,35 | 16,44 |
| Eucalipto citriodora | 46,60 | 46,60 | 16,08 | 16,08 | 68,22 | 4,35 | 15,68 |
| Garapa | 40,29 | 40,29 | 13,90 | 13,90 | 54,45 | 4,35 | 12,52 |
| Peroba rosa | 40,36 | 40,36 | 13,93 | 13,93 | 51,82 | 4,35 | 11,91 |
| Cedro amargo | 29,01 | 29,01 | 10,01 | 10,01 | 34,77 | 4,35 | 7,99 |
| Pinus eliote | 23,37 | 23,37 | 8,06 | 8,06 | 36,08 | 3,90 | 9,25 |

| | |
|-------------------|------|
| d (mm) | 20,0 |
| α_e | 1,38 |
| $\theta (^\circ)$ | 90 |

Tendo em vista as diferenças de valores de resistências apresentados pelas estimativas de EC5 para as madeiras estudadas nesta pesquisa, optou-se por utilizar os dados de resistência ao embutimento obtidos pela NBR 7190: 1997. Esta escolha foi feita de maneira a manter os valores de resistência das madeiras à favor da segurança.

Neste item serão apresentados os resultados dos dimensionamentos de ligações, utilizando as 6 espécies já apresentadas anteriormente.

Os dimensionamentos foram executados variando-se, alguns parâmetros da NBR 7190: 1997, tais como:

- ✓ Ângulo entre peças(Θ);
- ✓ Coeficiente minorador(**0,4**);
- ✓ Diâmetro do parafuso(d);

Um dos parâmetros a ser verificado é o coeficiente minorador já referido no trabalho. Trata-se do parâmetro 0,4 utilizado na formulação da NBR 7190: 1997 e que é responsável pela redução de 60% da resistência de cálculo ao embutimento da madeira. No capítulo da análise dos resultados este fator será devidamente estudado.

$$R_{vd,1} = \mathbf{0,4} \times \frac{t^2}{\beta} \times f_{e\theta,d}$$

As análises apresentadas nos itens a seguir foram efetuadas com base nos dimensionamentos com as seis espécies de madeiras supracitadas. Contudo, de maneira a otimizar a apresentação da análise aos leitores, reduziu-se o número de espécies no corpo do texto. Todos os dados e tabelas podem ser encontrados nos anexos desta pesquisa, ou no Cd, também em anexo, com todas as tabelas e gráfico em formato digital.

Todas as tabelas de dimensionamento do número de parafusos se encontram no **Anexo G**. Aqui serão apresentados apenas as tabelas e gráficos que relacionam a resistência de 1 plano de corte da ligação com a variação de diâmetro do parafuso, em separado por espécie.

Neste próximo item serão apresentadas algumas análises dos resultados do dimensionamento, de maneira a se investigar o funcionamento deste fator minorador.

As resistências obtidas com os dimensionamentos de todas as ligações a seguir se referem a um plano de corte de um parafuso de uma ligação dupla. Optou-se por analisar este tipo de ligação para facilitar as análises.

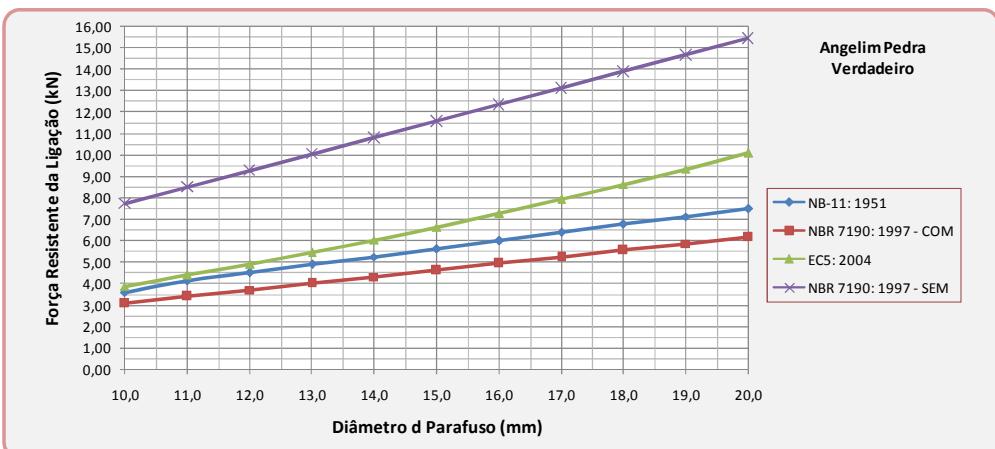
5.1. *Ligações Solicitadas Paralelamente Às Fibras Da Madeira*

As análises destes tópicos se referem à um ângulo entre as peças da ligação em madeira de 0° (ligações que solicitam a madeira paralelamente às fibras), e as resistências obtidas se referem à um plano de corte do parafuso.

Neste tópico estão resumidos os dados dos dimensionamentos das ligações, com e sem a utilização do coeficiente de minoração de 0,4 na formulação da NBR 7190: 1997.

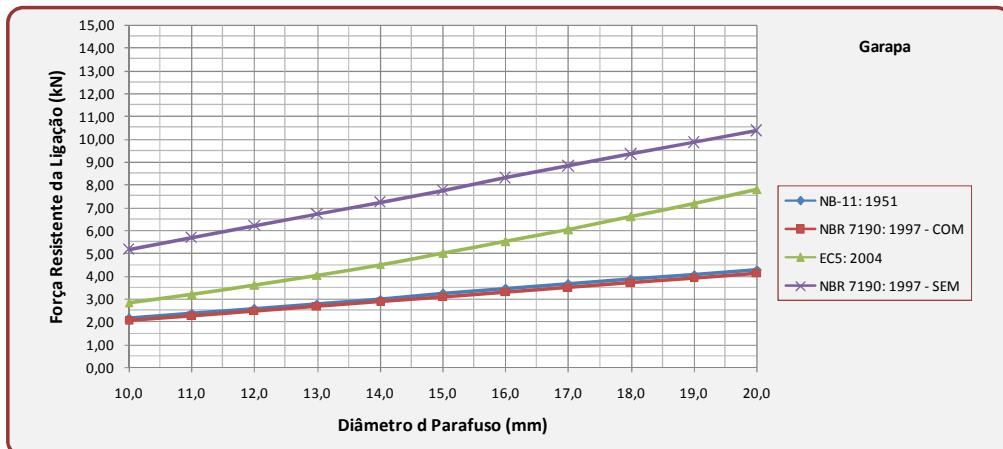
Angelim pedra verdadeiro - AD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 0°.



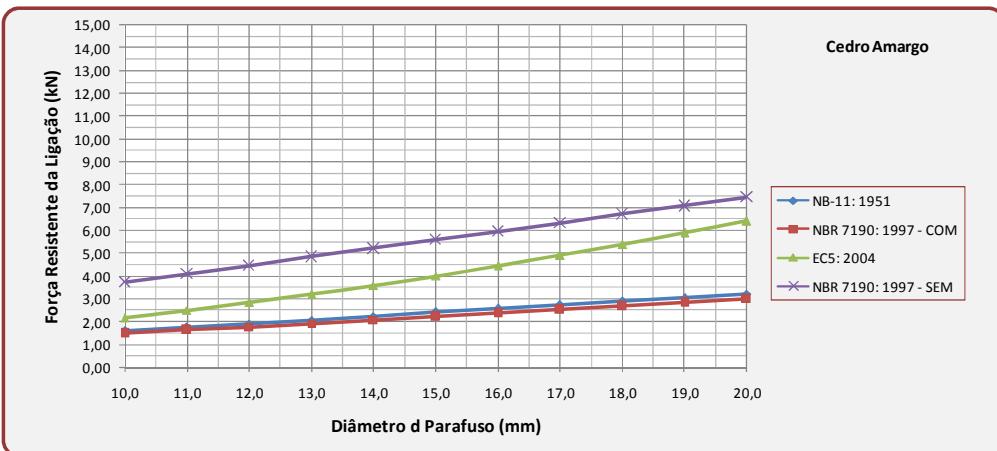
Garapa - MD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 0°.



Cedro amargo - BD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 0°.



Neste primeiro conjunto de dados o comportamento a embutimento paralelo se mostrou previsível com relação ao peso específico das madeiras. Quanto mais densa era a madeira, mais resistente esta se mostrava.

Em comparação com a NB-11, a NBR 7190 se mostrou com variação constante em relação ao valor da resistência da ligação. Isto é um reflexo da calibração feita na NBR, na época da mudança da metodologia destas normas (NB-11: Tensões admissíveis → NBR 7190: Estados Limites). Estes valores se aproximaram bastante para as madeiras de média e baixa densidade.

Em comparação com o EC5, a tendência foi do aumento da variação com o aumento do diâmetro do parafuso. Isto ocorreu para todas as faixas de densidade. Pôde-se perceber ainda que, quanto menor a densidade da madeira, maior era essa variação.

Acredita-se que esta variação da NBR 7190 com relação ao EC5 se deve ao fato da norma européia considerar o limite de escoamento à flexão do parafuso, e não somente a questão da relação espessura da madeira/diâmetro do parafuso.

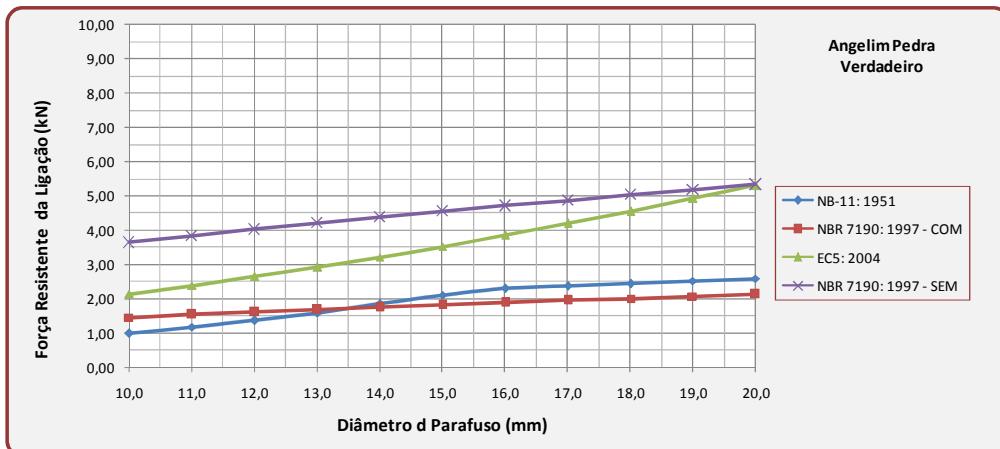
5.2. Ligações Solicitadas Perpendicularmente Às Fibras Da Madeira

As análises destes tópicos se referem à um ângulo entre as peças da ligação em madeira de 90° (ligações que solicitam a madeira perpendicularmente às fibras), e as resistências obtidas se referem à um plano de corte do parafuso.

Neste tópico estão resumidos os dados dos dimensionamentos das ligações, com e sem a utilização do coeficiente de minoração de 0,4 na formulação da NBR 7190: 1997.

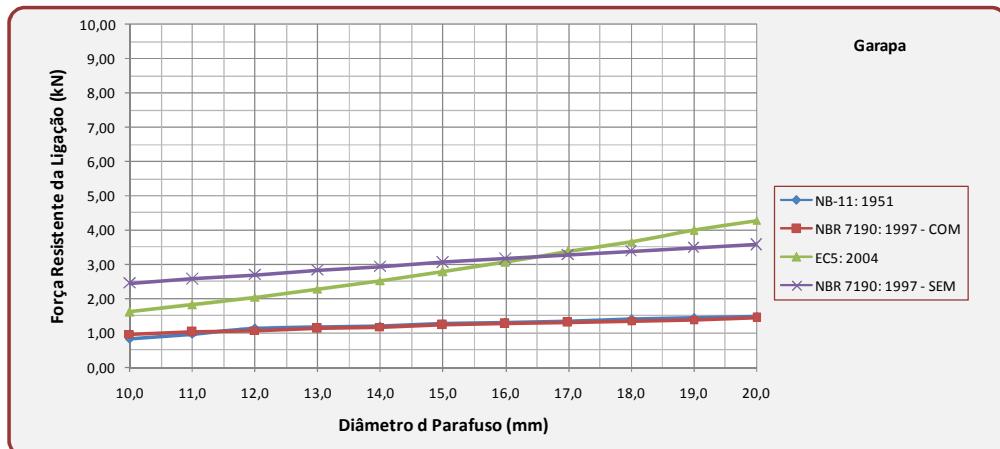
Angelim pedra verdadeiro - AD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 90°.



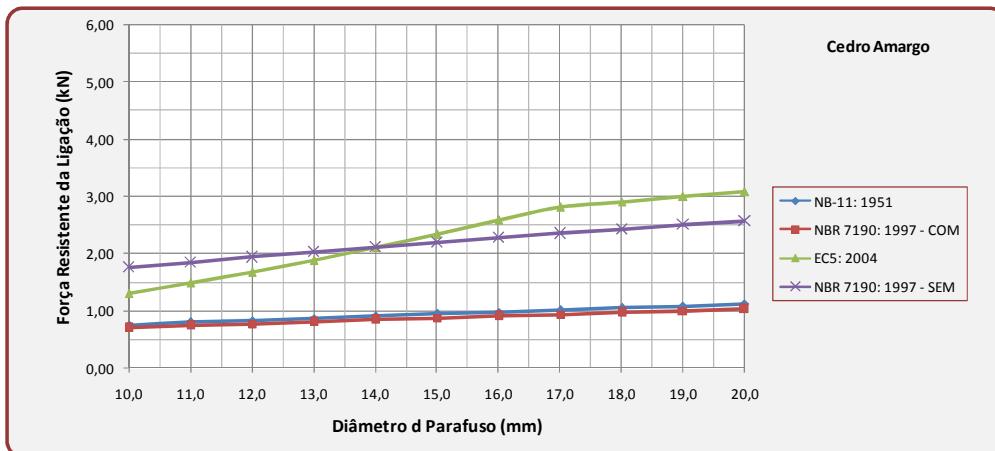
Garapa - MD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 90°.



Cedro amargo - BD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 90°.



Neste segundo conjunto de dados, o comportamento a embutimento perpendicular se mostrou menor que à resistência ao embutimento paralelo, como já havia sido explicado.

Em comparação com a NB-11, a NBR 7190 se mostrou com variação constante em relação ao valor da resistência da ligação, para diâmetros maiores. Nos diâmetros iniciais houve variações sem que seguisse um padrão. Isto aconteceu mais acentuadamente para as madeiras de alta densidade.

Após atingir um grau de variação constante, estes valores se aproximaram bastante para as madeiras de média e baixa densidade principalmente. Este comportamento muito semelhante se deve ao fato de que a resistência ao embutimento perpendicular foi linearmente extrapolada com base na resistência ao embutimento paralelo.

Em comparação com o EC5, a tendência foi do aumento da variação com o aumento do diâmetro do parafuso. Isto ocorreu para todas as faixas de densidade. Pôde-se perceber ainda que quanto menor a densidade da madeira, maior era essa variação.

Notou-se também, com relação ao EC5, que este tende a estabilizar a variação dos valores a partir de certo diâmetro, para as madeiras de baixa densidade. Este diâmetro limite foi de 16,0 mm para o *Pinus eliote* e 17,0 mm para o cedro amargo.

Acredita-se que esta variação da NBR 7190 com relação ao EC5 se deve ao fato da norma européia considerar o limite de escoamento à flexão do parafuso, e não somente a questão da relação espessura da madeira/diâmetro do parafuso.

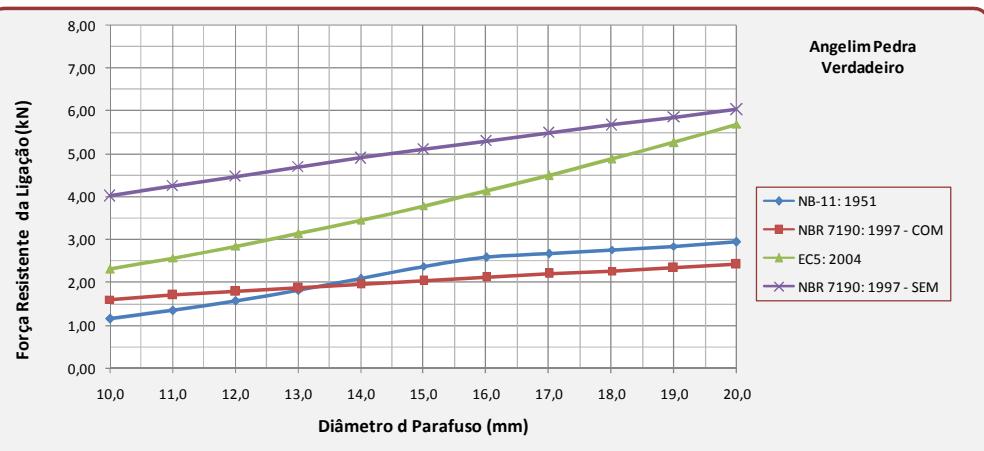
5.3. Ligações Solicitadas A 65° Com Relação Às Fibras Da Madeira

As análises destes tópicos se referem a um ângulo entre as peças da ligação em madeira de 65° (ligações que solicitam a madeira de maneira inclinada) e as resistências obtidas se referem à um plano de corte do parafuso.

Neste tópico estão resumidos os dados dos dimensionamentos das ligações, com e sem a utilização do coeficiente de minoração de 0,4 na formulação da NBR 7190: 1997.

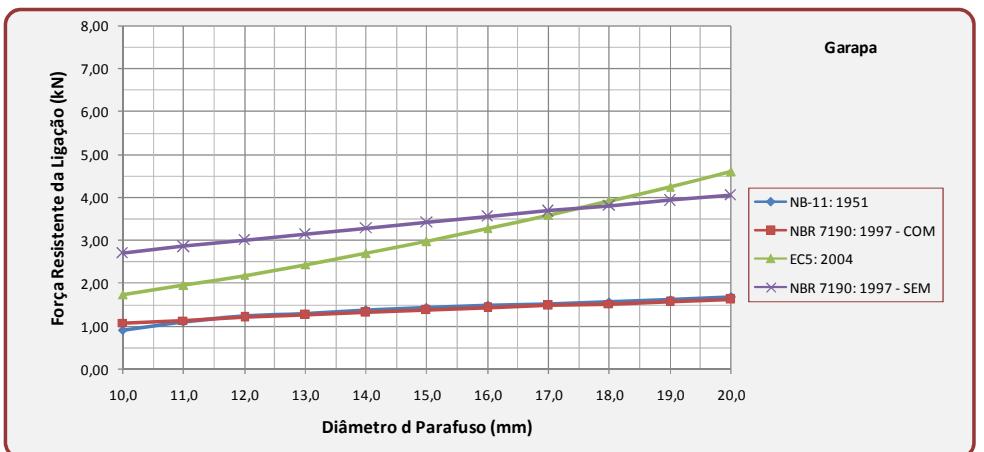
Angelim pedra verdadeiro - AD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 65°.



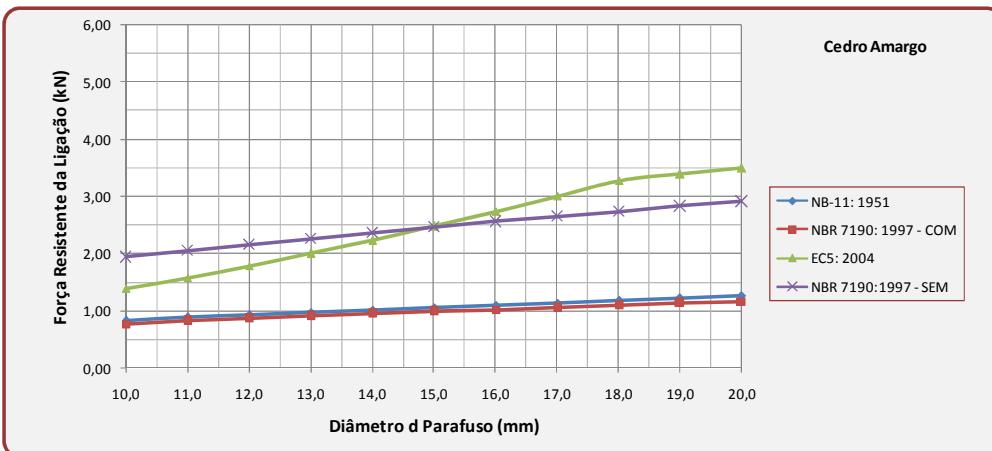
Garapa - MD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 65°.



Cedro amargo - BD

Resistência da ligação obtida com inclinação de 65°.



Os gráficos gerados pelos dados do dimensionamento de ligações inclinadas à 65° com relação às fibras da madeira mostraram resultados muito semelhantes à todos os resultados apresentados anteriormente.

As resistências da NB-11 e da NBR 7190 se aproximaram entre si, contudo ficaram abaixo da resistência obtida com o EC5. Vale lembrar que, quanto menor a resistência da ligação, mais parafusos esta ligação irá necessitar.

Verifica-se também que, até os diâmetros entre 15,0 mm e 17,0 mm os valores do EC5 estavam abaixo dos valores da NBR, com o uso do fator minorador. Após estes diâmetros ocorreu a inversão da situação, ficando o EC5 com valores maiores de resistência em comparação com a NBR 7190.

5.4. Análises De Ruptura Por Flexão Dos Parafusos

Como já foi apresentada anteriormente neste trabalho, uma ligação parafusada em madeira pode entrar em colapso por 2 motivos:

- ✓ Ocorrência de falha da madeira (embutimento na madeira);
- ✓ Ocorrência de falha no parafuso (flexão do parafuso).

A NB-11: 1951 não oferece ao projetista uma definição de qual das duas falhas tem maior probabilidade de ocorrer em certa situação de projeto.

O EC5: 2004 fornece, para uma ligação de duplo corte, quatro equações que representam os prováveis tipos de falha na ligação, sendo que a resistência adotada é tida como o menor valor encontrado com a aplicação das quatro equações citadas.

A NBR 7190: 1997 fornece, para tal verificação, a comparação dos parâmetros β e β_{lim} , sendo que:

- ✓ Se $\beta > \beta_{lim}$, o rompimento tende a ocorrer por flexão do parafuso;
- ✓ Se $\beta < \beta_{lim}$, o rompimento tende a ocorrer por embutimento na madeira;

Com relação a NBR 7190, para se ultrapassar o valor de β_{lim} devem ser atingidas situações bastante fora da realidade, sendo quase improvável ocorrer a primeira situação acima citada ($\beta > \beta_{lim}$). Alguns cálculos comprovam isto:

$$\beta_{lim} = 1,25 \times \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}}$$

$$f_{ed} = \frac{f_{yd}}{\left(\frac{\beta_{lim}}{1,25}\right)^2}$$

$$f_{yd} = \frac{240}{1,1} = 218,2 \text{ MPa} \quad \text{e} \quad \beta_{lim} = \beta = \frac{t}{d}$$

$$f_{ed} = \frac{340,9 \times d^2}{t^2}$$

$$d_{min} = 10 \text{ mm}$$

$$f_{ed} = \frac{34090}{t^2}$$

Tomando como base a madeira mais resistente analisada nesta pesquisa, o Angelim pedra verdadeiro, cuja resistência característica estimada ao embutimento paralelo às fibras é de 60,04 MPa, e usando os valores de K_{mod} usuais para esta região (0,45), tem-se:

$$\frac{0,45 \times 60,04}{1,4} = \frac{34090}{t^2}$$

$$t > 42,0 \text{ mm}$$

Tendo em vista que o valor de t , para uma ligação de duplo corte, é representado pela espessura das peças externas e fazendo-se um arredondamento de

valores apropriado à disponibilidade comercial, chega-se às seguintes espessuras das peças:

- ✓ Espessuras externas: 5 cm
- ✓ Espessuras internas: 10 cm
- ✓ Total da peça: 20 cm

Para uma madeira com classe de resistência C60, estes valores são pouco razoáveis. Além do mais, estes valores valem para o embutimento paralelo às fibras, e para qualquer outro ângulo de inclinação diferente de 0° os valores da resistência tende a diminuir, fazendo com que estes valores de espessura aumentem.

Contudo, tendo isto em vista a verificação dos valores de resistência por flexão do parafuso, foram utilizados os seguintes dados:

- ✓ Ligação de duplo corte, com as espessuras das peças externas de 45,0 mm e espessura da peça interna de 90,0 mm;
- ✓ Tensão de escoamento do aço de 100 MPa.

Com estas condições pode-se obter um valor de $\beta > \beta_{lim}$, como seguem nas tabelas abaixo.

Segue como exemplo de aplicação do dimensionamento a espécie Angelim pedra verdadeiro, sendo que as demais espécies em estudo seguem no **Anexo G** deste trabalho.

Angelim pedra verdadeiro - AD

Tabela 5.8 - Resistência da ligação obtida com inclinação de 65° e com fator minorador.

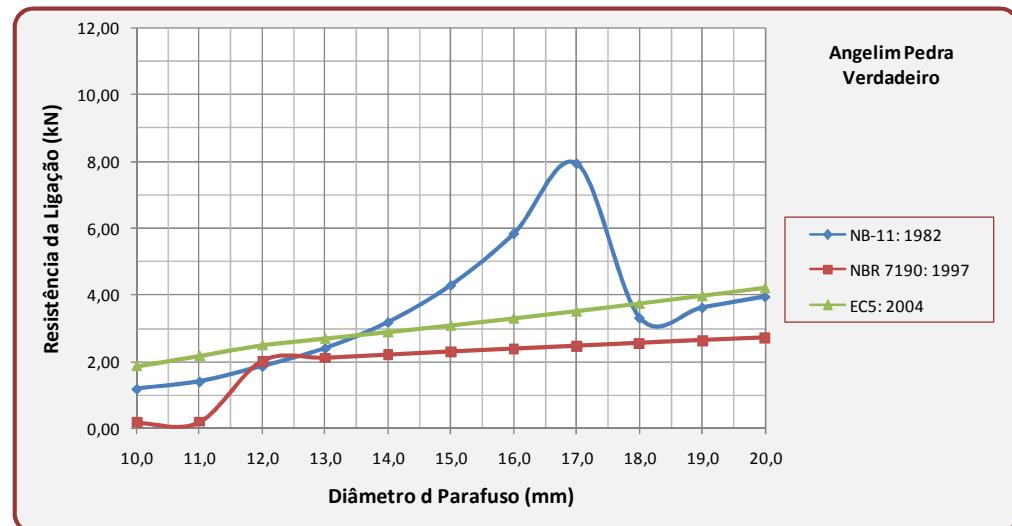
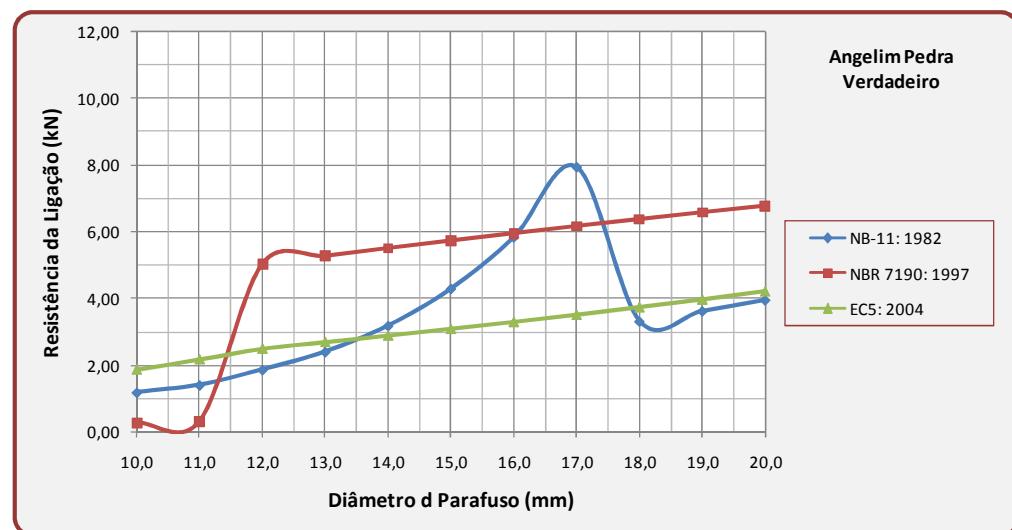


Tabela 5.9 - Resistência da ligação obtida com inclinação de 65° e sem fator minorador.



Percebe-se claramente que ao se aplicar estes fatores modificados, os resultados se apresentam alterados em comparação com os resultados anteriores.

A curva do EC5 se mostra com bastante linearidade, diferentemente das curvas de resultados da NB-11 e NBR 7190.

Os resultados da NB-11, para a situação apresentada neste item, remetem a um pico de resistência, cuja origem não foi detectada. Além disto, os valores apresentados por esta norma não compatibilizam com a situação das outras duas referências normativas.

Os resultados da NBR 7190 se mostraram concordantes com os resultados anteriormente mostrados, na seção da curva referente à $\beta < \beta_{lim}$. No trecho de $\beta > \beta_{lim}$, a resistência apresenta uma queda brusca e seus valores são extremamente baixos, não condizendo com uma situação real.

5.5. Resultados Do Número De Parafusos

Neste item será apresentado um exemplo do dimensionamento feito para se averiguar o número de parafusos de uma ligação em madeira. Utilizou-se para tal demonstração a espécie cedro amargo, de baixa densidade, com a ligação a uma inclinação de 65° com e sem a utilização do fator minorador 0,4. Os resultados seguem baixo.

Vale ressaltar que os valores de força utilizados para a determinação do número de parafusos da ligação foram retirados do dimensionamento da estrutura, no capítulo 5, representando valores bastante próximos dos reais sugeridos para cada norma.

Cedro amargo - BD

Tabela 5.10 – Número de parafusos obtidos com inclinação de 65° e com fator minorador.

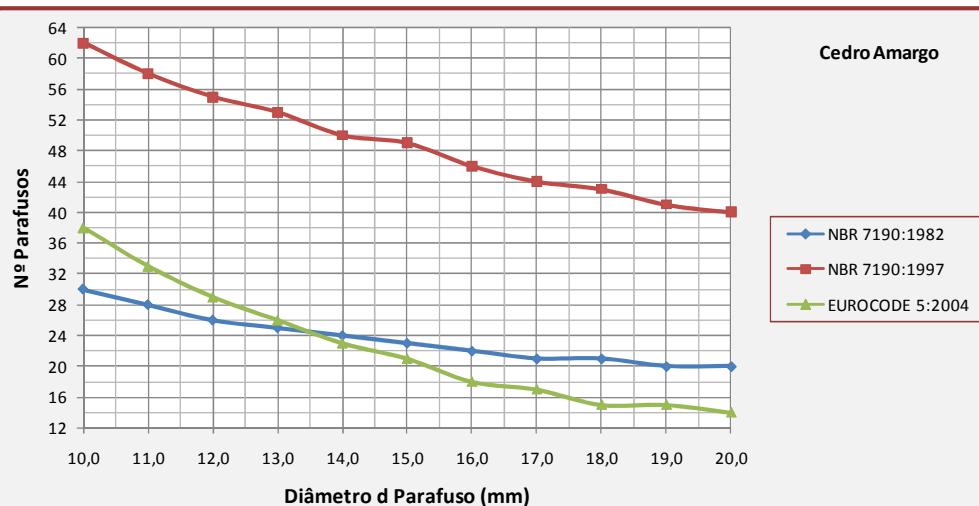
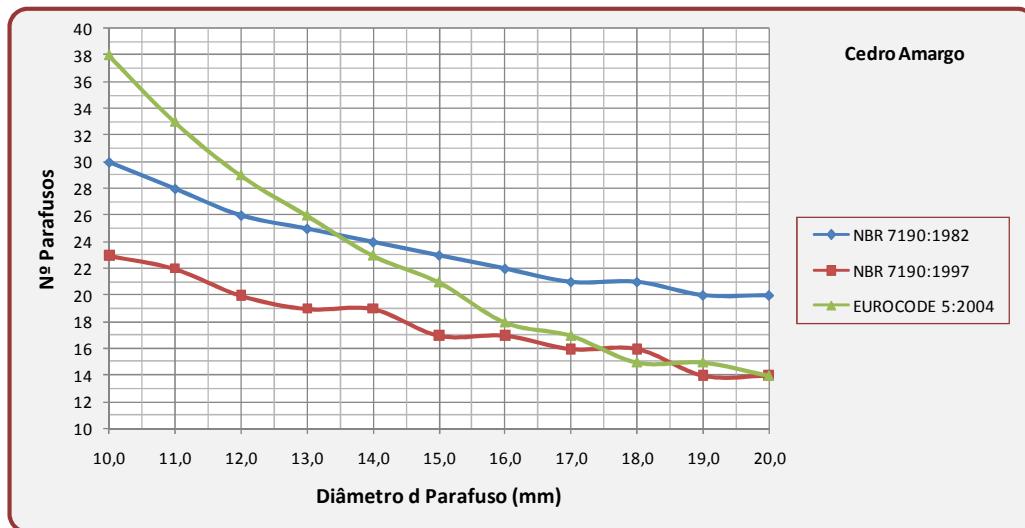


Tabela 5.11 – Número de parafusos obtidos com inclinação de 65° e sem fator minorador.



Com o uso de fator minorador 0,4, o número de parafusos obtidos com a aplicação dos critérios da NBR 7190: 1997 foram bastante altos.

Com relação ao EC5, a NBR 7190 apresentou número de parafusos que chegaram a ser 186% maiores, isto com a utilização do fator 0,4. Sem a utilização deste fator, a NBR 7190 apresentou valores 40% menores que o EC5, sendo que a variação entre estas normas tendeu a diminuir com o aumento do diâmetro do parafuso.

Com relação à NB-11, A NBR 7190 manteve uma constância na variação do número de parafusos, mas ao contrário do que se viu nas análises de resistência da ligação, onde estas duas normas se aproximavam em seus valores com utilização do fator 0,4, aqui o número de parafusos chegou a um aumento de 100%. Isto se deve ao fato da força usada no dimensionamento do número de parafusos ser maior na NBR 7190.

Este fato apresenta um grande contra-senso. Na NB-11: 1951, que aplicava os critérios de tensões admissíveis, As resistências tinham seus valores minorados enquanto as solicitações eram utilizadas em seu valor característico.

Já na NBR 7190: 1997, que passou a utilizar a metodologia probabilista dos estados limites, as resistências eram minoradas e as solicitações eram majoradas.

Contudo, o problema é que os fatores de minoração para as resistências da atual norma de projetos em madeira foram calibrados com a norma antiga tornando, no final dos cálculos, o fator global de segurança muito alto. Isto vai totalmente contra a economia e mais ainda, vai contra a definição de projeto de engenharia.

5.6. Ensaio Para Estimativa de Resistência das Ligações

Neste item será apresentado o dimensionamento executado com os dados da caracterização do *Pinus taeda*. Na Tabela 5.12 está apresentado dimensionamento sem a utilização de nenhum fator minorador da resistência e nenhum fator majorador das solicitações, sendo a resistência apresentada na tabela àquela que realmente deve ocorrer em uma situação real ideal.

Na Tabela 5.13 o dimensionamento foi feito com a utilização de todos os fatores, incluindo o fator minorador de 0,4, e na Tabela 5.14 foi retirado apenas o fator minorador 0,4.

Tabela 5.12 – Resistências características da ligação.

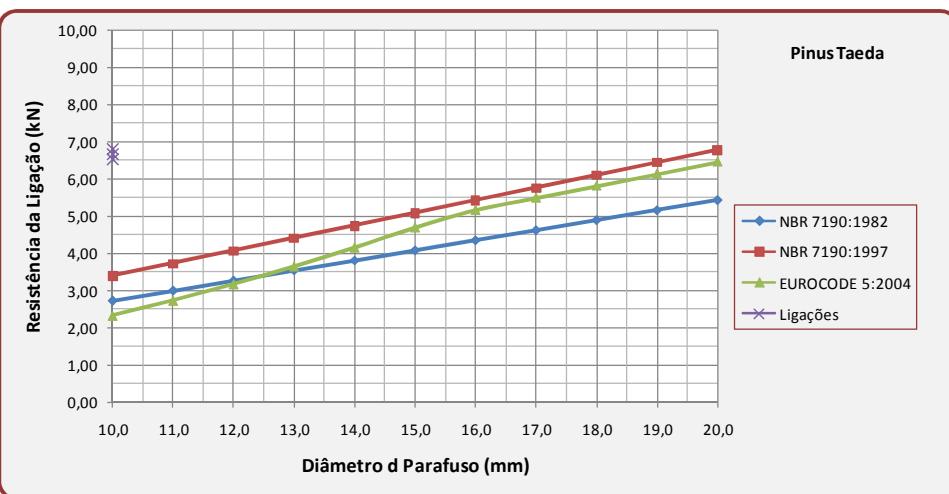


Tabela 5.13 – Resistências de cálculo da ligação com fator minorador.

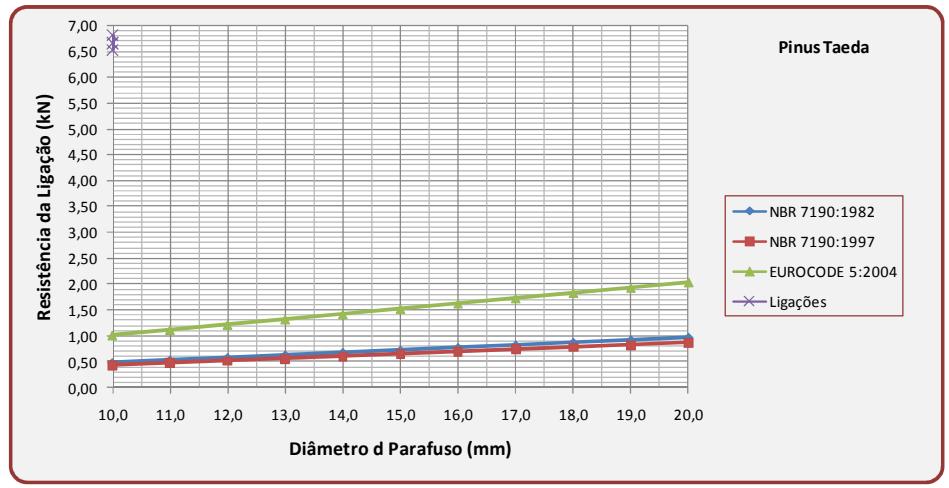
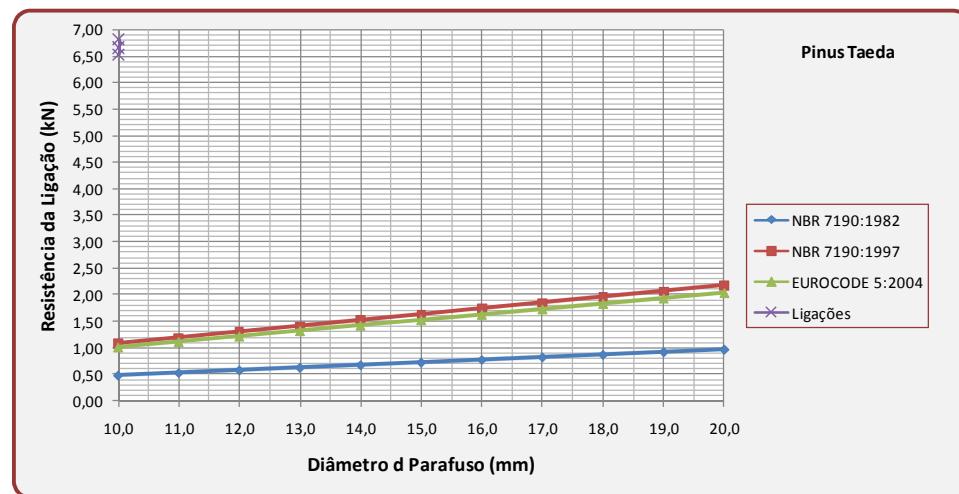


Tabela 5.14 – Resistências de cálculo da ligação sem fator minorador.



Percebe-se claramente que o dimensionamento feito para uma situação real ideal, as resistências se aproximam bastante, ocorrendo variações máximas de aproximadamente 30%.

Com a utilização dos fatores de cálculo, as resistências pela NB-11 e pela NBR 7190 permanecem próximas, mas distantes das resistências apresentadas pelo EC5, que se mostra cerca de 130% maior.

As resistências obtidas pela NBR 7190 com a utilização do fator minorador se aproximaram das resistências obtidas com o EC5, ficando estas levemente inferiores (cerca de 6%).

Na tabela abaixo se encontram os resultados da comparação entre os valores com fator minorador, sem fator minorador e os valores característicos.

Tabela 5.15 - Comparaçao dos valores do dimensionamento das ligações.

| Porcentagem de redução dos valores SEM coeficiente minorado em relação aos valores característicos. | | | |
|---|---------------|---------------|----------|
| d (mm) | NBR 7190:1982 | NBR 7190:1997 | EUROCODE |
| 10 | 82,00% | 67,86% | 56,02% |
| 11 | 82,00% | 67,86% | 58,83% |
| 12 | 82,00% | 67,86% | 61,33% |
| 13 | 82,00% | 67,86% | 63,57% |
| 14 | 82,00% | 67,86% | 65,56% |
| 15 | 82,00% | 67,86% | 67,36% |
| 16 | 82,00% | 67,86% | 68,36% |
| 17 | 82,00% | 67,86% | 68,36% |
| 18 | 82,00% | 67,86% | 68,36% |
| 19 | 82,00% | 67,86% | 68,36% |
| 20 | 82,00% | 67,86% | 68,36% |

Tabela 5.16 - Comparaçao dos valores do dimensionamento das ligações.

| Porcentagem de redução dos valores COM coeficiente minorado em relação aos valores característicos. | | | |
|---|---------------|---------------|----------|
| d (mm) | NBR 7190:1982 | NBR 7190:1997 | EUROCODE |
| 10 | 82,00% | 87,14% | 56,02% |
| 11 | 82,00% | 87,14% | 58,83% |
| 12 | 82,00% | 87,14% | 61,33% |
| 13 | 82,00% | 87,14% | 63,57% |
| 14 | 82,00% | 87,14% | 65,56% |
| 15 | 82,00% | 87,14% | 67,36% |
| 16 | 82,00% | 87,14% | 68,36% |
| 17 | 82,00% | 87,14% | 68,36% |
| 18 | 82,00% | 87,14% | 68,36% |
| 19 | 82,00% | 87,14% | 68,36% |
| 20 | 82,00% | 87,14% | 68,36% |

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A atual norma brasileira de projetos de estruturas em madeira (NBR 7190: 1997) entrou com uma nova concepção de projeto: a metodologia dos estados limites. Esta metodologia se resume, de maneira simplista, a estimar os esforços máximos que ocorrem na situação crítica da estrutura e dimensioná-la nesta situação, depois avaliá-la e seu funcionamento em serviço e verificar se sua concepção também obedece tais critérios.

Para verificação do que se denomina Estado Limite Último (ELU), calcula-se para os materiais, uma resistência característica, padronizada como aquela resistência que, em um número N de corpos-de-prova testados daquele material, apenas 5% de N tenha uma resistência menor que a característica.

Da mesma maneira procede-se com as solicitações. Verificam-se os carregamentos atuantes e define-se uma carga representativa característica de tal maneira que, apenas 5% de todas as cargas atuantes e que ainda atuaram na estrutura ultrapassem a carga característica.

Conhecendo estes valores, pondera-se todos eles de tal maneira a englobar as possíveis variáveis aleatórias que fogem ao controle do projetista, dando segurança à estrutura. Isto se faz minorando as resistências e majorando os carregamentos.

Fazendo as solicitações de cálculo do S_d e as resistências de cálculo dos materiais de R_d , temos que, para garantir a segurança da estrutura deve-se obedecer a seguinte desigualdade:

$$S_d \leq R_d$$

Assumindo que as amostras de ensaios, tanto para solicitações como para resistências, se comportem segundo uma curva de Gauss, a demonstra como deve ficar a inequação acima apresentada.

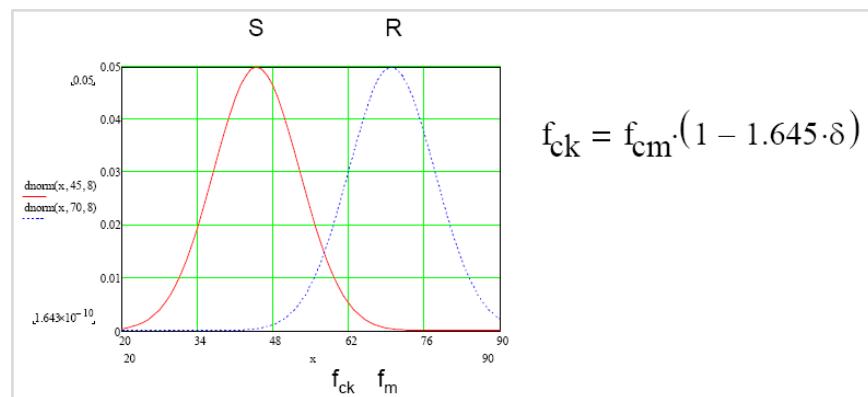


Figura 6.1 - Curva de Gauss probabilística. Fonte: ALMEIDA.

Os parâmetros minoradores e majoradores das resistências e solicitações fazem afastar estas duas curvas. Este afastamento garante a segurança da estrutura, mas há um limite no qual esta segurança pode ser considerada em excesso, se tornando antieconômica e até podendo prejudicar o funcionamento da estrutura como projetada.

A hipótese de pesquisa foi a de que os equacionamentos da NBR 7190: 1997 conduzem a um aumento no número de parafusos de ligações em madeira em comparação à sua norma predecessora. Isto se deve a um “coeficiente de segurança” 0,4 que se aplica na força resistente da ligação depois de efetuado todo o processo de ponderação na resistência ao embutimento.

Para se verificar de forma mais direta a influência dos parâmetros minoradores na resistência, em comparação ao valor real obtido nos ensaios das ligações, se calculou um parâmetro ω , que funcionaria como um coeficiente de segurança global para o equacionamento. Os cálculos seguem:

$$R = \omega \times t \times d \times f_{em}$$

Sendo:

- ✓ R – Valor da força resistente obtido nos ensaios das ligações (6,66 kN);
- ✓ ω - Coeficiente de segurança global;
- ✓ t – Espessura convencional da peça (2 cm);
- ✓ d – Diâmetro do parafuso (10 mm);
- ✓ f_{em} – Resistência média ao embutimento paralelo à fibras (16,97 MPa).

$$6,66 \times 10^3 = \omega \times 20 \times 10 \times 16,97$$

$$\omega = 1,96$$

Efetuando-se o mesmo raciocínio, considerando a força resistente minorada pelo fator γ_g (1,4), e a resistência ao embutimento paralelo às fibras minorado pelo coeficiente de modificação ($k_{mod}=0,45$) e pelo fator γ_w (1,4), temos:

$$\frac{6,66 \times 10^3}{1,4} = \omega \times 20 \times 10 \times \frac{0,45 \times 16,97}{1,4}$$

$$\omega = 4,37$$

Pelo equacionamento do EC5, teríamos para as mesmas situações:

$$\omega = 2,87 \quad (\text{sem coeficientes minoradores})$$

$$\omega = 5,02 \quad (\text{com coeficientes minoradores})$$

Isto mostra que, mesmo para caso de uso em serviço (sem os coeficientes de ponderação) a resistência obtida pelo equacionamento teórico fica abaixo da resistência real desenvolvida pelos elementos que compõe a ligação. Ainda assim, pelo fato de sabermos que os materiais podem apresentar variações em suas características, especialmente a madeira por ser heterogênea, aplicamos certos fatores ponderantes.

Para o caso da NBR 7190: 1997, estes fatores ponderantes se apresentam no momento da avaliação das cargas(γ_g , γ_q) e no momento do cálculo das resistências(γ_m , K_{mod}). Sendo assim, com estas explanações e com os cálculos demonstrados acima, qual seria o real motivo da inserção de um fator redutor (0,4) nos equacionamentos desta norma?

A NBR 7190: 1997 apresenta, em seu Anexo F, um texto intitulado 'Esclarecimentos sobre a calibração desta norma'. Abaixo seguem alguns parágrafos deste texto:

"A nova versão desta norma traz uma profunda mudança e seu modelo de segurança. Do modelo determinista de tensões admissíveis passou-se ao modelo probabilista de estados limites. Para que a mudança possa ser mais facilmente assimilada pelo meio técnico nacional, esta norma foi calibrada para que de início conduza aos mesmos resultados que a versão anterior."

[...]

"uma vez implantada a nova norma, aí então, cautelosamente, poderão ser discutidos e adequados cada um dos parâmetros que compõe a segurança global da estrutura, em função dos resultados da aplicação desta nova versão do regulamento normalizador."

NBR 7190: 1997 – Anexo F

Esta passagem do texto da norma explica um possível motivo de tal formulação apresentar esta discrepância. Como já apresentado anteriormente, na antiga norma (NB-11), aplicava-se fatores redutores nas resistências da madeira, fornecendo certo fator de segurança global X.

Com a mudança para a nova norma, as resistências foram calibradas para serem bastante semelhantes em seus valores, mantendo mesmo fator de segurança global **X**.

Contudo, no modelo probabilista dos estados limites, majoram-se as solicitações antes de se iniciarem os dimensionamentos. Isto gera, no final dos cálculos, um fator de segurança global **Y**, que será maior que **X**.

Para o caso das ligações em madeira, reduz-se ainda mais a resistência com a aplicação do fator 0,4, ignorando muito o potencial resistente da madeira e conduzindo a resultados antieconômicos.

Veloso mostra em seus estudos feitos em ligações em madeira por pinos metálicos que, para valores de $\beta < \beta_{lim}$ há, em alguns casos, a plastificação simultânea da madeira e do pino metálico, conferindo à ligação uma resistência maior. Isto não é considerado no modelo da NBR, contudo existe nas situações reais. Este é mais um indício da desnecessidade do fator 0,4 na formulação da NBR 7190: 1997, no que diz respeito ao dimensionamento de ligações.

Alguns estudos apresentados por Demarzo mostraram que, no caso da não utilização do fator 0,4, a NBR 7190 poderia apresentar resistências maiores (portanto conduzindo a um número menor de parafusos) em comparação à NB-11. Os parâmetros de estudo seguem na Tabela 6.1. Os coeficientes desta tabela, denominados **K**, são dados por:

$$K = \frac{R_{NB-11}}{R_{NBR 7190}}$$

Tabela 6.1 - Valores comparativos da resistência de ligações em madeira.

| Pinho do Paraná (BD) | Eucalipto Citriodora (AD) | Peroba Rosa (MD) |
|----------------------|---------------------------|------------------|
| C20 | 0,75 | C20 |
| C25 | 0,60 | C30 |
| C30 | 0,50 | C40 |
| | | C60 |
| | 2,00 | 1,85 |
| | 1,33 | 1,23 |
| | 1,00 | 0,93 |
| | 0,67 | 0,62 |

Fonte: DEMARZO.

Segundo os estudos feitos por Demarzo, os valores de parafusos, sem a utilização do fator 0,4, poderiam ser menores que o necessário para madeiras de média densidade das classes C20 e C30, e para as madeiras de alta densidade das classes C30 e C20. Isto consiste em um equívoco, pois dificilmente estas situações se mostrariam reais, pois madeiras de média densidade apresentam resistências

superiores às da classe C20, por exemplo, bem como as madeiras de alta densidade que tendem a apresentar resistências maiores que as das classes C30.

Vale ressaltar que esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de verificar a aplicabilidade do fator minorador 0,4 nos equacionamentos da NBR 7190: 1997, testando algumas hipóteses mais comuns em estruturas de madeira e que a comparação com outras normas foi meramente para se ter uma base de dados. Não cabe a este autor o julgamento de qual norma esta correta, pelo menos não sem uma pesquisa vasta e ensaios variados com diversas espécies de madeira.

De maneira bastante simplificada, fez-se uma calibração tomando como base os valores do EC5 e calculando-se um valor ω a ser usado no lugar do 0,4. Isto foi feito para as madeiras eucalipto citriodora (alta densidade) e para o cedro amargo (baixa densidade). Esta calibração serve para mera comparação, visto que há muito mais variáveis que devem ser satisfeitas para uma calibração realmente ter confiabilidade.

A formulação usada para tal calibração e os resultados seguem abaixo.

$$R_d = \omega \times t \times d \times f_{ed}$$

Sendo:

- ✓ ω – Fator minorador a ser calibrado;
- ✓ R_d – Resistência de cálculo obtida pelos cálculos do EC5;
- ✓ f_{ed} – Resistência de cálculo ao embutimento da madeira;
- ✓ t – Espessura da peça de madeira;
- ✓ d – Diâmetro do parafuso (10 mm).

Tabela 6.2 - Angelim pedra verdadeiro à 0° (esquerda) e a 90° (direita).

| d (mm) | w | d (mm) | w |
|---------------|----------|---------------|----------|
| 10,0 | 0,50 | 10,0 | 0,59 |
| 11,0 | 0,52 | 11,0 | 0,62 |
| 12,0 | 0,53 | 12,0 | 0,66 |
| 13,0 | 0,54 | 13,0 | 0,69 |
| 14,0 | 0,56 | 14,0 | 0,73 |
| 15,0 | 0,57 | 15,0 | 0,77 |
| 16,0 | 0,59 | 16,0 | 0,82 |
| 17,0 | 0,61 | 17,0 | 0,86 |
| 18,0 | 0,62 | 18,0 | 0,90 |
| 19,0 | 0,64 | 19,0 | 0,95 |
| 20,0 | 0,65 | 20,0 | 1,00 |

Tabela 6.3 – Cedro amargo à 0° (esquerda) e a 90° (direita).

| d (mm) | w | d (mm) | w |
|--------|------|--------|------|
| 10,0 | 0,59 | 10,0 | 0,74 |
| 11,0 | 0,61 | 11,0 | 0,80 |
| 12,0 | 0,64 | 12,0 | 0,86 |
| 13,0 | 0,66 | 13,0 | 0,93 |
| 14,0 | 0,69 | 14,0 | 1,00 |
| 15,0 | 0,72 | 15,0 | 1,06 |
| 16,0 | 0,74 | 16,0 | 1,13 |
| 17,0 | 0,77 | 17,0 | 1,20 |
| 18,0 | 0,80 | 18,0 | 1,20 |
| 19,0 | 0,83 | 19,0 | 1,20 |
| 20,0 | 0,86 | 20,0 | 1,20 |

$$R_{vd1}^* = \omega \times \frac{t^2}{\beta} \times f_{ed}$$

Através destas tabelas percebe-se que o possível problema da NBR 7190 se encontra nas madeiras de baixa densidade, onde houve incidência de maiores valores de ω . Ainda assim, o menor valor encontrado para ω foi de 0,5, maior que o fator 0,4 da norma.

7. RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Recomendações de Pesquisa

Vários resultados foram obtidos com esta pesquisa, contudo muitos mais ainda devem ser verificados.

Como complemento a este trabalho, aconselha-se acrescentar análises das rigidezes das ligações, além de expandir as verificações já efetuadas para outras espécies de madeira. Aconselha-se também a expansão do número de espécies ensaiadas, de maneira a gerar resultados experimentais e teóricos suficientes para que seja realizada uma calibração da formulação com maior grau de confiabilidade.

7.2. Considerações Finais

“Norma: (1) Aquilo que se estabelece como base ou medida para a realização ou a avaliação de alguma coisa. (2) Princípio, preceito, regra, lei. (3) Modelo, padrão.”

Dicionário Aurélio.

Segundo o conceituado dicionário Aurélio, algumas descrições da palavra Norma são apresentadas acima. O termo bastante importante na citação foi ‘Padrão’. Como sendo um documento modelo, não teria uma norma que ser, dentre outras coisas, estudada o suficiente de tal maneira a se criar preceitos bastante fortes e embasados?

Segundo os resultados apresentado por esta pesquisa, a NBR 7190: 1997, apesar ter de trazido uma visão inovadora e bastante prática para a execução dos projetos em madeira, apresentou pouco aprofundamentos em alguns itens de sua formulação, no que diz respeito ao dimensionamento de ligações parafusadas em estruturas de madeira. A norma, depois de verificadas as situações apresentadas no trabalho, demonstra uma visão bastante simplista do processo de dimensionamento das ligações parafusadas, acarretando tal ato em uma sub-utilização das propriedades das madeiras.

Esta visão apresentada refere-se apenas às pesquisas e trabalhos consultados pelo autor, bem como os ensaios e estudos realizados pelo mesmo, não cabendo talvez um julgamento tão amplo sem mais estudos.

Ainda assim, verificou-se a importância da uma atualização bastante urgente desta referência normativa, além de mais estudos sobre as situações de cálculo apresentadas pela mesma. Nesta evolução, espera-se que a pesquisa aqui apresentada demonstre ser de alguma utilidade para o processo de revisão da norma, seja como um exemplo ou como um contra-exemplo.

A importância de uma pesquisa como esta transcende o conteúdo técnico apenas. Como sendo o primeiro e único trabalho desta magnitude elaborado por alunos da graduação, esta pesquisa representa a oportunidade do aluno de demonstrar seu ponto de vista, sua capacidade de indagação, sua vontade de aprender. Este trabalho também tem a função de instigá-lo a rever tudo o que lhe foi ensinado, reviver e aplicar ensinamentos provenientes de suas experiências pessoais, enfim, este trabalho representa toda uma vivência única e inestimável de cada um de nós.

Cinco anos, mais de 60 cadeiras cursadas, 4464 horas de aulas. Este tempo nunca passou tão rapidamente e tão lentamente. E este último ano não foi diferente. Independente do resultado desta pesquisa, acredito que dedicação foi a palavra-chave que descreve este trabalho, afinal, não é apenas 'um' trabalho e sim 'O' trabalho.

É com muito orgulho e satisfação que finalizo esta etapa da pesquisa, mas não com a pretensão de parar de aprender, mas sim com a visão de continuar, continuar a descobrir e a aprender cada vez mais. Pois isto é a única coisa que realmente nos pertence e que, no final, realmente importa: a vontade de crescer e evoluir.

Espero que este trabalho venha a fornecer a quem necessitar o conhecimento que tentei transmitir através dele e, assim, fazer valer o empenho que nele foi aplicado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Pedro Afonso de O. Notas de aula: Disciplina Projetos de Estruturas de Madeira. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALVAREZ, Ramón Argüelles; **MARTITEGUI**, Francisco Arriaga; **CALLEJA**, Juan José Martínez. Estructuras de madera – diseño y cálculo. **AITIM**, 2000.

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

DEMARZO, Mauro A. Quantidades de pinos metálicos: uma comparação com a NB-11. Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas. 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1995-1.1: Design of timber structures - Common rules and rules for buildings. CEN, 2004.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Dados de caracterizações de madeiras. Disponível em <www.ipt.br>, com último acesso em 25/10/2008.

LIMA, André Luiz; **TEREZO**, Rodrigo Figueiredo. Comparativo de dimensionamento de uma ligação por critérios normativos e experimentais. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MAESTRI, Fernanda Almeida. Influência da temperatura de aquecimento na resistência residual à compressão do paricá. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2008.

MANRIQUEZ, Manuel. Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do paricá. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2008.

MOLTERNO, Antônio. Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeiras. Editora Edgard Blücher, 1981. 2^a edição ampliada. São Paulo, SP.

OLIVEIRA, Marcos Antonio Melo e. Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2001.

PFEIL, Walter. Estruturas de madeiras. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994. 5^a edição. Rio de Janeiro, RJ.

SZÜCS, Carlos Alberto. Notas de aula: Disciplina ECV 5251 - Estruturas de Madeiras I. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008/1.

STAMATO, Guilherme Corrêa. Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2002.

SZÜCS, Carlos Alberto; Et AL. Apostila de Estruturas de Madeira. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

TERNI, Antonio Wanderley; **OLIVEIRA**, Luiz Eduardo de; **FERREIRA**, José Bento. O impacto da norma NBR 7190: 1997 – Projeto de estruturas de madeira na disciplina “estruturas de madeira”. São Paulo, 2001.

VALLE, Ângela do; **DENARDI**, Frederico; **OLIVEIRA**, Elbio. Guia de Técnicas Construtivas – Durabilidade da Madeira. Trabalho de Iniciação Científica – CNPq, disponível em <www.giem.ufsc.br>. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

VALLE, Ângela do. Rígidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

VELOSO, Luís Augusto C. M.; **ALVIM**, Ricardo de C.; **ALMEIDA**, Pedro Afonso de O. Avaliação numérica do modelo de cálculo das ligações mecânicas da NBR 7190:1997. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ANEXOS

Nos anexos que seguem se encontram alguns resultados selecionados pelo autor. O conjunto completo de dados se encontra no CD em anexo a esta monografia.

Anexo A – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às fibras

Anexo B – Resultados dos Ensaios de Embutimento Paralelo às fibras – NBR 7190: 1997

Anexo C – Resultados dos Ensaios de Embutimento Paralelo às fibras – EC5: 2004

Anexo D – Resultados dos Ensaios de Embutimento Perpendicular às fibras – EC5: 2004

Anexo E – Resultados dos Ensaios das ligações

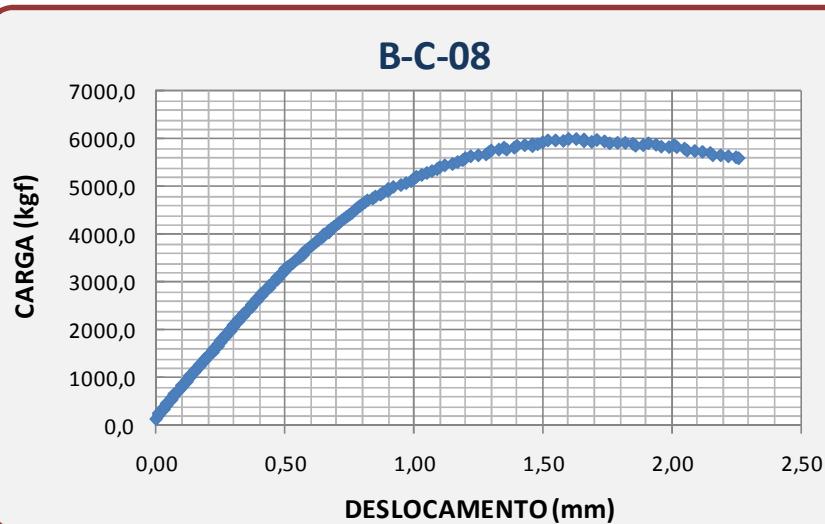
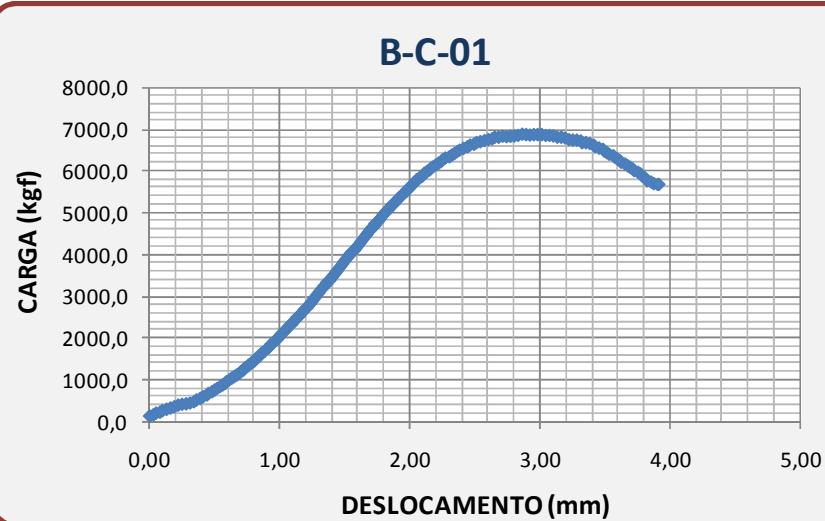
Anexo F – Resultados do Dimensionamento da Estrutura Proposta

Anexo G – Resultados do Dimensionamento das ligações da Estrutura

Anexo H – Quantificação das Cargas de Uma Estrutura

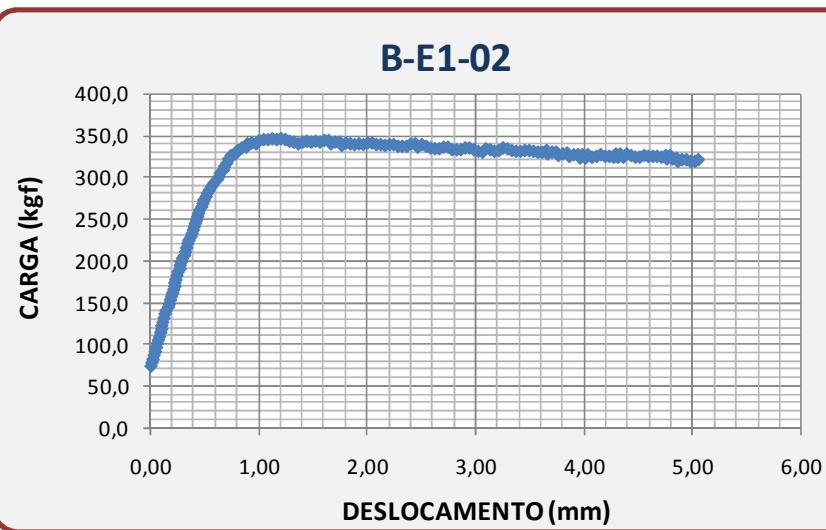
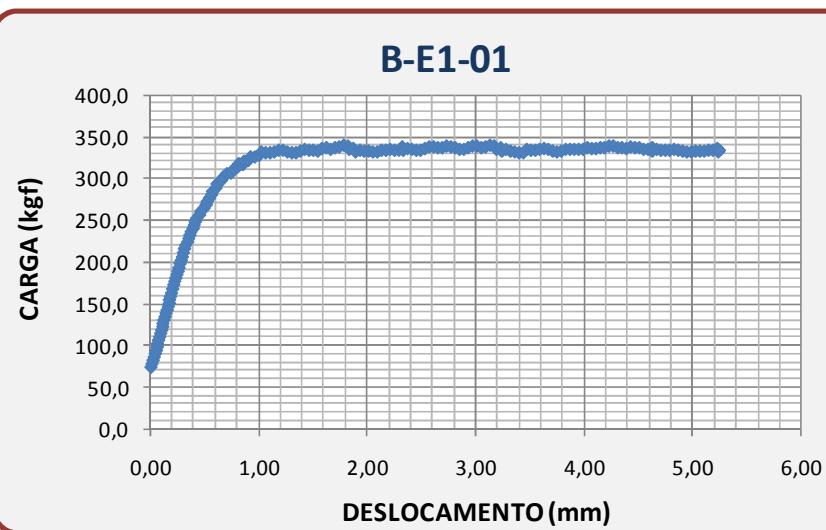
Anexo A – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às fibras

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 22,57 |
| Tensão Característica (MPa) | 16,13 |
| Desvio Padrão (MPa) | 4,92 |
| Variância (%) | 21,80 |



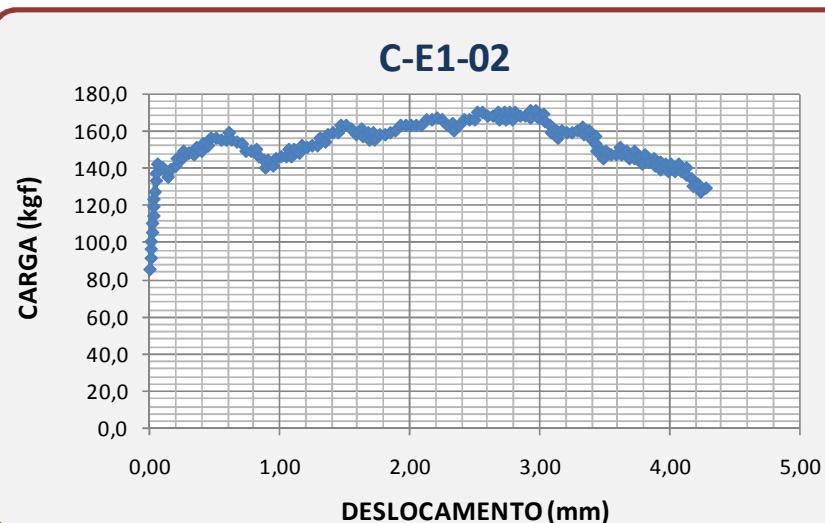
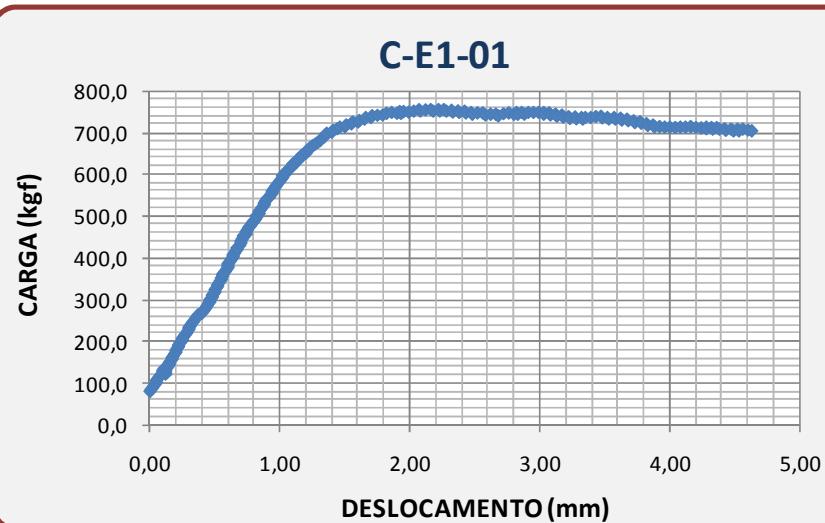
Anexo B – Resultados dos Ensaios de Embutimento Paralelo às fibras – NBR**7190: 1997**

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 16,97 |
| Tensão Característica (MPa) | 15,01 |
| Desvio Padrão (MPa) | 2,23 |
| Coeficiente de Variação (%) | 13,14 |



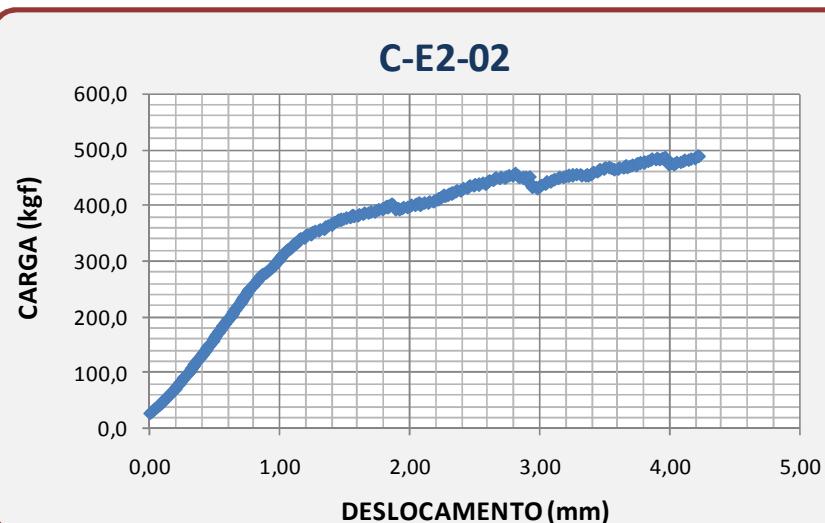
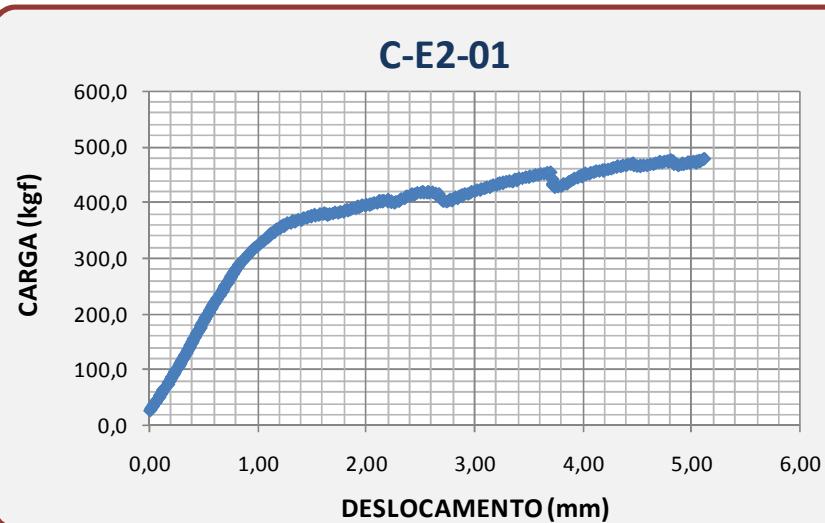
Anexo C - Resultados dos Ensaios de Embutimento Paralelo às fibras - EC5:**2004**

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 22,54 |
| Tensão Característica (MPa) | 13,06 |
| Desvio Padrão (MPa) | 5,75 |
| Variância (%) | 25,50 |



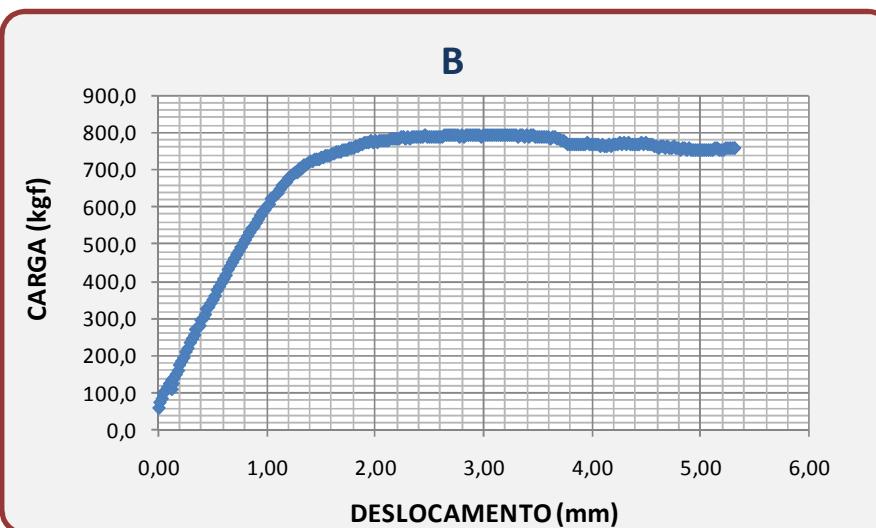
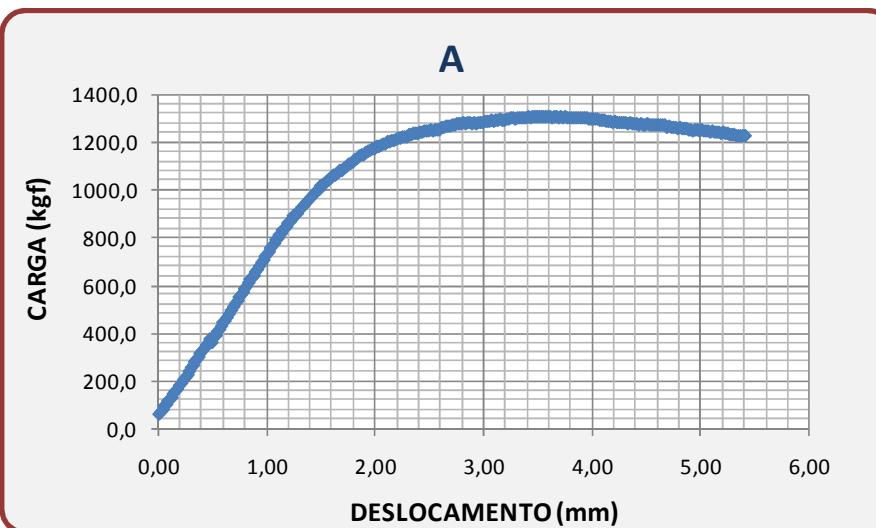
Anexo D – Resultados dos Ensaios de Embutimento Perpendicular às fibras –**EC5: 2004**

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Tensão Média (MPa) | 16,12 |
| Tensão Característica (MPa) | 13,26 |
| Desvio Padrão (MPa) | 1,74 |
| Variância (%) | 10,77 |



Anexo E - Resultados dos Ensaios das ligações

| | |
|-------------------------|----------------|
| Resistência Média (kgf) | 1331,67 |
| Desvio Padrão (kgf) | 27,54 |
| Variância (%) | 2,07 |

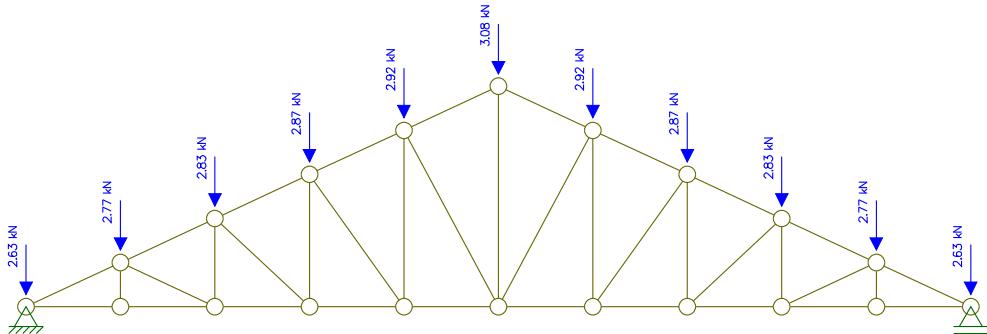


Anexo F – Resultados do Dimensionamento da Estrutura Proposta

Tabela final das cargas do dimensionamento.

CARREGAMENTO NA TRELIÇA DEVIDO AO PESO-PRÓPRIO

| NÓS | CARGA TERÇAS | | PESO PRÓPRIO | | CARGA (Kn) | |
|-----|--------------|------|--------------|------|------------|------|
| | x | y | x | y | x | y |
| 1 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 2,63 |
| 12 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 2,77 |
| 13 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 2,83 |
| 14 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,31 | 0,00 | 2,87 |
| 15 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,36 | 0,00 | 2,92 |
| 16 | 0,00 | 2,69 | 0,00 | 0,39 | 0,00 | 3,08 |
| 17 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,36 | 0,00 | 2,92 |
| 18 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,31 | 0,00 | 2,87 |
| 19 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 2,83 |
| 20 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 2,77 |
| 11 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 2,63 |



Cargas de vento.

| Barra | CARGA DE VENTO (kN) | |
|-------|---------------------|---------|
| | SUCÇÃO | PRESSÃO |
| 1 | -14,51 | 13,22 |
| 2 | -14,51 | 13,22 |
| 3 | -12,59 | 11,35 |
| 4 | -10,67 | 9,47 |
| 5 | -8,76 | 7,59 |
| 6 | -10,67 | 7,59 |
| 7 | -14,51 | 9,47 |
| 8 | -18,33 | 11,35 |
| 9 | -22,14 | 13,22 |
| 10 | -22,14 | 13,22 |
| 11 | 20,92 | -15,33 |
| 12 | 19,56 | -14,00 |
| 13 | 18,20 | -12,67 |
| 14 | 16,84 | -11,33 |
| 15 | 15,48 | -10,00 |
| 16 | 15,10 | -10,00 |
| 17 | 17,82 | -11,33 |
| 18 | 20,54 | -12,67 |
| 19 | 23,25 | -14,00 |

| Barra | CARGA DE VENTO (kN) | |
|-------|---------------------|---------|
| | SUCÇÃO | PRESSÃO |
| 20 | -10,88 | 9,92 |
| 21 | -10,88 | 9,92 |
| 22 | -9,44 | 8,51 |
| 23 | -8,00 | 7,10 |
| 24 | -6,57 | 5,69 |
| 25 | -8,00 | 5,69 |
| 26 | -10,88 | 7,10 |
| 27 | -13,74 | 8,51 |
| 28 | -16,60 | 9,92 |
| 29 | -16,60 | 9,92 |
| 30 | 15,69 | -11,50 |
| 31 | 14,67 | -10,50 |
| 32 | 13,65 | -9,50 |
| 33 | 12,63 | -8,50 |
| 34 | 11,61 | -7,50 |
| 35 | 11,33 | -7,50 |
| 36 | 13,37 | -8,50 |
| 37 | 15,41 | -9,50 |

Esforços nas barras da treliça.

| Barra | Pinus Taeda | | | | | |
|-------|-------------|--------------|-------------|--------------|----------------|--------------|
| | EC5: 2004 | | NB-11: 1982 | | NBR 7190: 1997 | |
| | Favorável | Desfavorável | Favorável | Desfavorável | Favorável | Desfavorável |
| 1 | 27,71 | 63,86 | 13,71 | 41,44 | 4,63 | 57,31 |
| 2 | 27,71 | 63,86 | 13,71 | 41,44 | 4,63 | 57,31 |
| 3 | 24,74 | 56,09 | 12,61 | 36,55 | 4,64 | 50,52 |
| 4 | 21,73 | 48,27 | 11,47 | 31,61 | 4,61 | 43,67 |
| 5 | 18,69 | 40,41 | 10,28 | 26,63 | 4,56 | 36,79 |
| 6 | 18,69 | 40,41 | 8,37 | 26,63 | 1,88 | 36,79 |
| 7 | 21,73 | 48,27 | 7,63 | 31,61 | -0,75 | 43,67 |
| 8 | 24,74 | 56,09 | 6,87 | 36,55 | -3,39 | 50,52 |
| 9 | 27,71 | 63,86 | 6,08 | 41,44 | -6,05 | 57,31 |
| 10 | 27,71 | 63,86 | 6,08 | 41,44 | -6,05 | 57,31 |
| 11 | -30,58 | -71,94 | -10,22 | -46,47 | 1,76 | -64,27 |
| 12 | -27,30 | -64,85 | -8,25 | -41,81 | 2,81 | -57,82 |
| 13 | -23,98 | -57,70 | -6,03 | -36,90 | 3,89 | -51,30 |
| 14 | -20,62 | -50,50 | -4,17 | -32,34 | 5,01 | -44,73 |
| 15 | -17,22 | -43,25 | -2,08 | -27,56 | 6,17 | -38,11 |
| 16 | -17,22 | -43,25 | -2,46 | -27,56 | 5,65 | -38,11 |
| 17 | -20,62 | -50,50 | -3,19 | -32,34 | 6,39 | -44,73 |
| 18 | -23,98 | -57,70 | -3,69 | -36,90 | 7,17 | -51,30 |
| 19 | -27,30 | -64,85 | -4,56 | -41,81 | 7,99 | -57,82 |
| 20 | -30,58 | -71,94 | -5,17 | -46,47 | 8,84 | -64,27 |
| 21 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 22 | -3,28 | -8,57 | -1,22 | -5,40 | 0,01 | -7,49 |
| 23 | 1,39 | 3,63 | 0,52 | 2,29 | 0,00 | 3,17 |
| 24 | -4,12 | -10,70 | -1,57 | -6,76 | -0,04 | -9,36 |
| 25 | 2,81 | 7,30 | 1,07 | 4,61 | 0,03 | 6,39 |
| 26 | -5,24 | -13,53 | -2,03 | -8,56 | -0,10 | -11,86 |
| 27 | 4,26 | 11,01 | 1,66 | 6,97 | 0,08 | 9,64 |
| 28 | -6,52 | -16,75 | -2,57 | -10,61 | -0,19 | -14,69 |
| 29 | 11,49 | 29,53 | 0,97 | 18,70 | -4,67 | 25,90 |
| 30 | -6,52 | -16,75 | 1,48 | -10,61 | 5,49 | -14,69 |
| 31 | 4,26 | 11,01 | -1,02 | 6,97 | -3,67 | 9,64 |
| 32 | -5,24 | -13,53 | 1,26 | -8,56 | 4,51 | -11,86 |
| 33 | 2,81 | 7,30 | -0,71 | 4,61 | -2,48 | 6,39 |
| 34 | -4,12 | -10,70 | 1,05 | -6,76 | 3,63 | -9,36 |
| 35 | 1,39 | 3,63 | -0,38 | 2,29 | -1,25 | 3,17 |
| 36 | -3,28 | -8,57 | 0,89 | -5,40 | 2,96 | -7,49 |
| 37 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Anexo G – Resultados do Dimensionamento das ligações da Estrutura

Dimensionamento pela NB-11.

| | |
|-----------------------------|-------|
| t (mm) | 40 |
| f_c (MPa) | 17,0 |
| σ_{sp} (MPa) | 17,0 |
| σ_{sn} (MPa) | 4,2 |
| σ_{se} (MPa) | 240,0 |
| Φ (°) | 0 |

| d (mm) | η | K_n | K_p | W_n | W_p | F_n (kN) | F_p (kN) | F_a (kN) |
|---------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 10,0 | 1,89 | 92,634 | 208,603 | 0,945 | 1,000 | 2,42 | 5,43 | 2,72 |
| 11,0 | 1,81 | 112,087 | 252,410 | 1,000 | 1,000 | 2,70 | 5,97 | 2,99 |
| 12,0 | 1,74 | 133,393 | 300,389 | 1,000 | 1,000 | 2,83 | 6,52 | 3,26 |
| 13,0 | 1,68 | 156,552 | 352,540 | 1,000 | 1,000 | 2,96 | 7,06 | 3,53 |
| 14,0 | 1,62 | 181,563 | 408,863 | 1,000 | 1,000 | 3,08 | 7,60 | 3,80 |
| 15,0 | 1,57 | 208,427 | 469,358 | 1,000 | 1,000 | 3,20 | 8,15 | 4,07 |
| 16,0 | 1,53 | 237,143 | 534,025 | 1,000 | 1,000 | 3,32 | 8,69 | 4,34 |
| 17,0 | 1,49 | 267,712 | 602,864 | 1,000 | 1,000 | 3,43 | 9,23 | 4,62 |
| 18,0 | 1,45 | 300,134 | 675,875 | 1,000 | 1,000 | 3,54 | 9,77 | 4,89 |
| 19,0 | 1,41 | 334,409 | 753,058 | 1,000 | 1,000 | 3,65 | 10,32 | 5,16 |
| 20,0 | 1,38 | 370,536 | 834,414 | 1,000 | 1,000 | 3,75 | 10,86 | 5,43 |

Dimensionamento pela NBR 7190.

| | |
|-----------------------------|-------|
| t (mm) | 20 |
| f_{yk} (MPa) | 240 |
| γ_w | 1 |
| Φ (°) | 0 |
| f_{cm} (MPa) | 16,97 |
| K_{mod} | 1 |
| γ_m | 1 |

| d (mm) | f_{e0,d} (MPa) | α_e | f_{e90,d} (MPa) | f_{ea,d} (MPa) | β | β_{lim} | R_{vd,1} (kN) |
|---------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------|------------------------|------------------------------|
| 10,0 | 16,97 | 1,89 | 8,01 | 16,97 | 2,00 | 4,70 | 3,39 |
| 11,0 | 16,97 | 1,81 | 7,67 | 16,97 | 1,82 | 4,70 | 3,73 |
| 12,0 | 16,97 | 1,74 | 7,38 | 16,97 | 1,67 | 4,70 | 4,07 |
| 13,0 | 16,97 | 1,68 | 7,11 | 16,97 | 1,54 | 4,70 | 4,41 |
| 14,0 | 16,97 | 1,62 | 6,88 | 16,97 | 1,43 | 4,70 | 4,75 |
| 15,0 | 16,97 | 1,57 | 6,67 | 16,97 | 1,33 | 4,70 | 5,09 |
| 16,0 | 16,97 | 1,53 | 6,48 | 16,97 | 1,25 | 4,70 | 5,43 |
| 17,0 | 16,97 | 1,49 | 6,31 | 16,97 | 1,18 | 4,70 | 5,77 |
| 18,0 | 16,97 | 1,45 | 6,14 | 16,97 | 1,11 | 4,70 | 6,11 |
| 19,0 | 16,97 | 1,41 | 6,00 | 16,97 | 1,05 | 4,70 | 6,45 |
| 20,0 | 16,97 | 1,38 | 5,86 | 16,97 | 1,00 | 4,70 | 6,79 |

Dimensionamento pelo EC5.

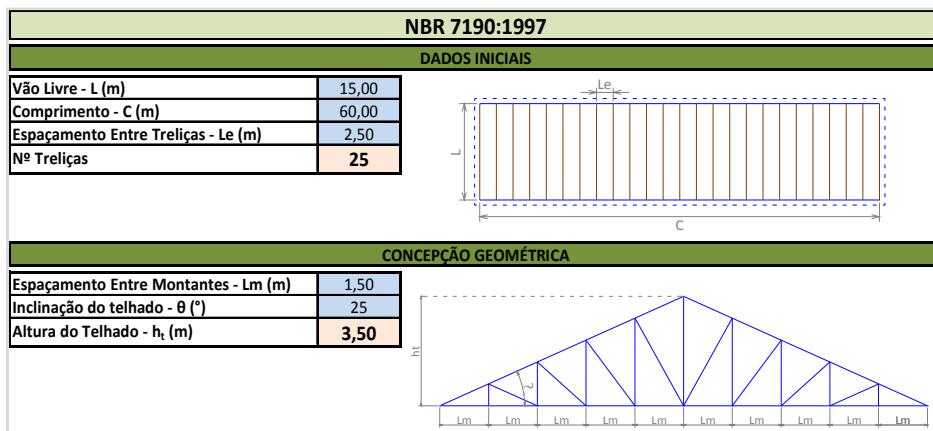
| | |
|-----------------------------|-------|
| t₁ (mm) | 20 |
| t₂ (mm) | 40 |
| F_{yk} (MPa) | 240 |
| γ_w | 1 |
| Φ (°) | 0 |
| f_{cm} (MPa) | 16,12 |
| K_{mod} | 1 |
| γ_m | 1 |

| d (mm) | M_{y,d} (N.m) | F_{0h,d} (MPa) | F_{90h,d} (MPa) | F_{ah,d} (MPa) | R_d (kN) |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 10,0 | 28,66 | 16,12 | 7,60 | 16,12 | 2,32 |
| 11,0 | 36,72 | 16,12 | 7,29 | 16,12 | 2,73 |
| 12,0 | 46,05 | 16,12 | 7,01 | 16,12 | 3,17 |
| 13,0 | 56,70 | 16,12 | 6,76 | 16,12 | 3,64 |
| 14,0 | 68,75 | 16,12 | 6,54 | 16,12 | 4,15 |
| 15,0 | 82,26 | 16,12 | 6,34 | 16,12 | 4,69 |
| 16,0 | 97,28 | 16,12 | 6,15 | 16,12 | 5,16 |
| 17,0 | 113,89 | 16,12 | 5,99 | 16,12 | 5,48 |
| 18,0 | 132,14 | 16,12 | 5,84 | 16,12 | 5,80 |
| 19,0 | 152,09 | 16,12 | 5,70 | 16,12 | 6,13 |
| 20,0 | 173,78 | 16,12 | 5,57 | 16,12 | 6,45 |

Anexo H - Quantificação das Cargas de Uma Estrutura

Nesta etapa da pesquisa será mostrado como se efetuou a quantificação das cargas atuantes em uma estrutura de cobertura em madeira para o Estado Limite Último. As características da estrutura seguem nos tópicos abaixo e na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

- ✓ Vão livre: 15,00 metros;
- ✓ Comprimento em planta: 60,00 metros;
- ✓ Espaçamento das treliças: 2,50 metros;
- ✓ Espaçamento entre montantes: 1,50 metros;
- ✓ Inclinação do telhado: 25°;
- ✓ Altura do telhado: 3,50 metros.



Características da estrutura.

Este dimensionamento foi efetuado com o objetivo aproximar o máximo possível da realidade em comparação entre as três normas, isto porque o processo de dimensionamento de uma ligação começa no dimensionamento da estrutura e na quantificação de esforços.

As cargas obtidas neste item serão utilizadas no dimensionamento das ligações do capítulo seguinte.

O número de parafusos necessários em uma ligação depende da resistência estimada da ligação e da carga atuante na ligação. Se por um lado a NBR 7190: 1997 possa estar conduzindo à valores baixos de resistências das ligações, por outro lado isto pode estar sendo compensado em outras etapas do dimensionamento. Logo, é

interessante que se verifique todo o processo de projeto de maneira a se obter um resultado mais real e idôneo possível.

O dimensionamento será então executado com 6 espécies de madeira, sendo que os dados de caracterização foram obtidos do site IPT <www.ipt.br> e na NBR 7190: 1997. As espécies, com seus nomes populares, são:

- ✓ Angelim pedra verdadeiro
- ✓ Eucalipto citriodora
- ✓ Garapa
- ✓ Peroba rosa
- ✓ Cedro amargo
- ✓ Pinus eliote

No **Anexo F** se encontra uma planilha de dimensionamento da estrutura para fins de exemplificação deste processo de quantificação das cargas. Todas as cargas obtidas foram considerando:

- ✓ Peso próprio das telhas;
- ✓ Peso próprio das madeiras que compõe a estrutura;
- ✓ Cargas de vento;
- ✓ Efeitos de sobrecarga.

Nos itens que seguem serão explicadas algumas das diferenças entre os processos de dimensionamento sugeridos por cada uma das três referencias normativas.

Dimensionamento Segundo A NB-11: 1951

Para o dimensionamento no Estado Limite Último de uma estrutura de cobertura em madeira segundo prescrições da NB-11: 1951, são necessários alguns parâmetros, tais como:

- ✓ Resistência última à compressão paralela às fibras da madeira verde(f_u);

- ✓ Peso específico da madeira à 15% de umidade ($\rho_{15\%}$);
- ✓ Módulo de elasticidade à compressão médio da madeira (E_m).

Os dados obtidos do site d IPT foram feitos com base nesta norma, logo não houve necessidade de adaptações.

Dada a concepção geométrica da estrutura, realizou-se a verificação da esbelteza da peça mais crítica. Os passos do dimensionamento seguem:

ESTRUTURA SECUNDÁRIA

- ✓ Verificação da flexão oblíqua nas ripas;
- ✓ Verificação de tensão cisalhante nas ripas;
- ✓ Verificação da flexo-compressão nos caibros;
- ✓ Verificação da tensão cisalhante nos caibros;
- ✓ Verificação da flexão oblíqua nas terças;
- ✓ Verificação de tensão cisalhante nas terças;

ESTRUTURA PRIMÁRIA

- ✓ Obtenção dos esforços na treliça;
- ✓ Cálculo da carga de vento na treliça;
- ✓ Cálculo do peso-próprio da treliça;
- ✓ Obtenção dos esforços característicos nas barras da treliça;

Para aplicação dos critérios de projeto da NB-11: 1951, não se utilizaram de combinações de ações, nem se fez majoração dos esforços, visto que esta norma aplica o conceito das tensões admissíveis, onde todos os coeficientes de ponderação são aplicados nas resistências (fatores de minoração).

O uso do módulo de elasticidade à compressão médio se deu segundo indicações da NBR 7190:1997.

Valores utilizados no dimensionamento pela NB-11: 1951.

| ESPÉCIE | | | ρ_{ap} (kg/m ³) | Resist. Ruptura - Madeira Verde (MPa) |
|------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Classe Densidade | Nome Científico | Nome Popular | | |
| Alta Densidade | <i>Dinizia excelsa</i> | Angelim pedra verdadeiro | 1090 | 65,2 |
| | <i>Eucalyptus citriodora</i> | Eucalipto citriodora | 1040 | 51,1 |
| Média Densidade | <i>Apuleia leiocarpa</i> | Garapa | 830 | 37,3 |
| | <i>Aspidosperma polyneuron</i> | Peroba rosa | 790 | 41,6 |
| Baixa Densidade | <i>Cedrela odorata</i> | Cedro amargo | 530 | 28,0 |
| | <i>Pinus elliottii</i> | Pinus eliote | 480 | 18,5 |

Fonte: <www.ipt.br>, com acesso em 30/10/2008.

Realizou-se este procedimento para as seis espécies de madeiras aqui estudadas, de maneira a se obter, para cada espécie, um carregamento condizente com suas características.

Dimensionamento Segundo A NBR 7190: 1997

Para o dimensionamento no Estado Limite Último de uma estrutura de cobertura em madeira segundo prescrições da NBR 7190: 1997, são necessários alguns parâmetros, tais como:

- ✓ Resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira a 12% de umidade ($f_{c0,k}$);
- ✓ Peso específico da madeira a 12% de umidade ($\rho_{12\%}$);
- ✓ Módulo de elasticidade à compressão efetivo da madeira ($E_{c0,ef}$).

Algumas alterações foram necessárias, de maneira a se obter os dados necessários para inserção nas tabelas de dimensionamento.

A resistência última à compressão paralela às fibras da madeira verde foi corrigida para um teor de umidade de 12% além de se estimar, segundo prediz a NBR 7190: 1997, seu valor característico.

$$f_{12} = f_u \times \left[1 + \frac{2 \times (U\% - 12)}{100} \right]$$

$$f_{c0,k} = K \times f_{cm}$$

$$K = 1 - 1,645 \times (\text{coeficiente de variação}) \approx 0,7 - \text{Para compressão!}$$

$$K \approx 0,7 - \text{Para compressão}$$

O peso-específico não sofre correções, pois seu uso com teor de umidade de 15% representa um ato a favor da segurança.

O módulo de elasticidade à compressão efetivo foi obtido do valor médio conforme relação recomendada pela norma. Seu uso se deu mediante recomendações da norma, como já explicado no item anterior.

Valores utilizados no dimensionamento pela NBR 7190: 1997.

| ESPÉCIE | | | ρ_{ap} (kg/m ³) | f _{co,k} (MPa) |
|------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Classe Densidade | Nome Científico | Nome Popular | | |
| Alta Densidade | <i>Dinizia excelsa</i> | Angelim pedra verdadeiro | 1090 | 60,03 |
| | <i>Eucalyptus citriodora</i> | Eucalipto citriodora | 1040 | 46,60 |
| Média Densidade | <i>Apuleia leiocarpa</i> | Garapa | 830 | 40,29 |
| | <i>Aspidosperma polyneuron</i> | Peroba rosa | 790 | 40,36 |
| Baixa Densidade | <i>Cedrela odorata</i> | Cedro amargo | 530 | 29,01 |
| | <i>Pinus elliottii</i> | Pinus eliote | 480 | 23,37 |

Fonte: IPT.

Para a NBR 7190: 1997 fez-se, ao final da obtenção dos esforços característicos nas barras da treliça, a composição destes esforços, transformando-os de esforços característicos para esforços de cálculo. Os coeficientes de combinação seguem na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$F_d = \gamma_g \times F_g + \gamma_q \times F_q \quad F_d = \gamma_g \times F_g + \gamma_q \times F_q$$

A combinação utilizada para a quantificação das cargas da estrutura foi a combinação do dimensionamento do Estado Limite Último para casos normais de carregamento.

| Combinações | Para efeitos | |
|----------------------------|------------------|------------------|
| | Desfavoráveis | Favoráveis |
| Normais | $\gamma_g = 1,4$ | $\gamma_g = 0,9$ |
| Especiais ou de construção | $\gamma_g = 1,3$ | $\gamma_g = 0,9$ |
| Excepcionais | $\gamma_g = 1,2$ | $\gamma_g = 0,9$ |

Coeficientes de combinação de esforços. Fonte: NBR 7190: 1997.

Dimensionamento Segundo O EC5: 2004

Para o dimensionamento no Estado Limite Último de uma estrutura de cobertura em madeira segundo prescrições do EC5: 2004, os parâmetros utilizados são basicamente os mesmos da NBR 7190: 1997, alterando-se apenas alguns fatores como coeficiente de modificação (K_{mod}), coeficientes de majoração e minoração tanto das resistências como das cargas.

Os fatores relacionados com as resistências se encontram no item 3.3.3 desta pesquisa.

Para as combinações considerando apenas uma ação variável preponderante, a formulação é a mesma da NBR 7190: 1997, mudando apenas os coeficientes.

$$F_d = \gamma_g \times F_g + \gamma_q \times F_q$$

Coeficientes de combinação de esforços.

| | Permanente | Sobrecarga | Vento |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 1 ação variável | 1,35 (1,00) | 1,50 (0,00) | 0,00 |
| | 1,35 (1,00) | 0,00 | 0,00 |
| | 1,35 (1,00) | 0,00 | 1,50 (0,00) |
| 2 ou mais ações variáveis | 1,35 (1,00) | 1,35 (0,00) | 1,35 (0,00) |

Fonte: AITIM.

As tabelas de dimensionamento, além das cargas obtidas para verificação do número de parafuso, se encontram no **Anexo F**.