

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

NÚBIA CONCEIÇÃO BAHIA CARNEIRO

**ESTUDO COMPARATIVO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE  
LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA CONSIDERANDO A NORMA  
EUROPEIA EUROCODE 5 E A NORMA BRASILEIRA NBR 7190**

MANAUS – AM

**2021**



NÚBIA CONCEIÇÃO BAHIA CARNEIRO

**ESTUDO COMPARATIVO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE  
LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA CONSIDERANDO A NORMA  
EUROPEIA EUROCODE 5 E A NORMA BRASILEIRA NBR 7190**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se no processo SEI/UFAM Nº 23105.023087/2021-53

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a  
Universidade Federal do Amazonas como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Queiroz Silva

MANAUS – AM

**2021**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C289e Carneiro, Núbia Conceição Bahia  
Estudo comparativo dos critérios de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira considerando a norma europeia EUROCODE 5 e a norma brasileira NBR 7190 / Núbia Conceição Bahia Carneiro . 2021  
106 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Wagner Queiroz Silva  
TCC de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Estruturas de madeira. 2. Ligações. 3. Pinos metálicos. 4. Nbr 7190. 5. Eurocode 5. I. Silva, Wagner Queiroz. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



Ministério da Educação  
Universidade Federal do Amazonas  
Departamento de Engenharia Civil

NÚBIA CONCEIÇÃO BAHIA CARNEIRO

**ESTUDO COMPARATIVO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE  
LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA CONSIDERANDO A NORMA  
EUROPEIA EUROCODE 5 E A NORMA BRASILEIRA NBR 7190**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 19 de novembro de 2021

Banca examinadora:

Prof. Dr. Wagner Queiroz Silva - UFAM (Orientador)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos - UFAM

Prof. Dr. Régis Pamponet da Fonseca - UFAM



Documento assinado eletronicamente por **Wagner Queiroz Silva, Professor do Magistério Superior**, em 23/11/2021, às 11:10, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Régis Pamponet da Fonseca, Professor do Magistério Superior**, em 23/11/2021, às 12:20, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raimundo Pereira de Vasconcelos, Professor do Magistério Superior**, em 23/11/2021, às 15:22, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0769115** e o código CRC **665C8558**.

Av. Octávio Hamilton Botelho Mourão - Bairro Coroado 1 Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho, Setor Norte - Telefone: (92) 3305-1181

CEP 69080-900, Manaus/AM, decf@ufam.edu.br

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado a oportunidade de viver e por me dado forças nos momentos mais importunos que passei ao longo do curso, obrigada.

Meus sinceros agradecimentos à minha querida mãe, Sebastiana Bahia, por desde sempre ter me apoiado, mesmo sabendo que para isso eu precisaria ficar longe dela. Agradeço por todos os conselhos e suporte durante todos esses anos. Obrigada pelas palavras de incentivo que me fizeram não desistir.

À minha irmã mais velha, Neiva, por sempre ter se preocupado comigo e de certa forma, durante um tempo ter cuidado de mim.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo da minha trajetória na universidade, principalmente aqueles que estiveram comigo desde o início, Aline Araújo e Victor Hugo, obrigada por compartilharem diversos momentos, tanto bons quanto ruins. E é claro por terem me aguentado, sei que não foi fácil, tenham certeza que vocês têm um lugar especial no meu coração e obrigada por tudo. E aquela que chegou depois: Etlen Neves, agradeço todo apoio nos momentos que mais precisei. Nós conseguimos!

Aos demais colegas de curso, agradeço o companheirismo e toda ajuda, a luta é difícil e todos nós somos capazes de conseguir.

À minha melhor amiga, Carolzinha, obrigada por muitas vezes ser minha sanidade e por sempre me fazer acreditar que eu era capaz e inteligente, até mesmo quando eu fazia 1 + 1 na calculadora. Obrigada por todas as palavras de conforto, pelo ombro amigo e por não me deixar só.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Wagner Queiroz, por toda a paciência e ensinamentos ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma participaram dessa minha conquista, me dando apoio e palavras de incentivo.

## RESUMO

Por ser um material estrutural de fonte renovável, a utilização da madeira como material de construção civil é de suma importância, principalmente por suas propriedades físicas e mecânicas. Devido suas limitações de comprimento relacionadas a sua extração de troncos de árvores, foram criadas alternativas que pudessem vencer essas restrições. Dessa forma, a utilização de elementos de ligações e emendas entre as peças de madeira é fundamental para a construção dos sistemas estruturais. Os tipos de ligações mais usados em estruturas de madeira são os pinos metálicos do tipo pregos e parafusos de aço. As normas NBR 7190:1997 e o EUROCODE 5:2004, apresentam em suas formulações, critérios de dimensionamento para ligações com pinos metálicos, havendo diferenças significativas entre as diretrizes de cada norma. Observa-se que a principal diferença consiste nos modos de ruína para esse tipo de ligação. Assim, o objetivo desse trabalho foi realizar um estudo comparativo entre os critérios de dimensionamento entre as normas NBR 7190:1997 e o EUROCODE 5:2004. Utilizando exemplos para análise e comparação de resultados, foi confeccionada uma planilha eletrônica para cálculo automático de ligações com pinos metálicos. As principais diferenças observadas estão relacionadas ao fato de a norma brasileira possuir apenas dois modos de ruína, enquanto a norma europeia conta com um número maior de modos de colapso possíveis para essas ligações. Outras diferenças foram observadas, como nos casos de ligações com diferentes espécies de madeira, sendo que, ao contrário da norma europeia, a norma brasileira não aborda diretrizes sobre este tema em seu texto. Observa-se assim a importância de uma avaliação comparativa em relação às diretrizes para o dimensionamento de ligações dos diferentes códigos normativos.

Palavras-chave: Estruturas de madeira. Ligações. Pinos metálicos. NBR 7190. EUROCODE 5.

## ABSTRACT

As a structural material obtained from a renewable source, the use of wood as a civil construction material is of great importance, mainly due to its physical and mechanical properties. Due to the length limitations of trees related to its extraction, alternatives were created that could overcome these restrictions. Thus, the use of connections between the wooden pieces is fundamental for the construction of structural elements. The types of connections most used in wooden structures are metal pins such as nails and steel bolts. Standards code NBR 7190:1997 and EUROCODE 5:2004, present in their formulations, dimensioning criteria for connections with metallic pins, with significant differences between each standard. It is observed that the main difference is the failure modes for this type of connection. Thus, the objective of this monograph was to carry out a comparative study between the design criteria between NBR 7190:1997 and EUROCODE 5:2004 standards guideline. Using examples for analysis and comparison of results, an electronic spreadsheet for automatic calculation of connections with metallic pins was created. The major differences observed are related to the fact that the Brazilian standard has only two failure modes, while the European standard has a greater number of possible collapse modes for these connections. Other differences were observed, such as in the cases of connections with different wood species, and, unlike the European standard, the Brazilian standard does not address guidelines on this topic in its text. Thus, it is observed the importance of a comparative evaluation in relation to the guidelines for the dimensioning of connections of the different normative codes.

Keywords: Wooden structures. Connections. Metal pins. NBR 7190. EUROCODE 5.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ligações por contato.....	19
Figura 2 - Ligações por aderência. ....	19
Figura 3 - Ligações por penetração. ....	19
Figura 4 - Peças sujeitas à esforços de compressão.....	27
Figura 5 - Cisalhamento na madeira.....	28
Figura 6 - Flexão na madeira.....	28
Figura 7 - Ligações feitas com prego e pino de madeira. ....	29
Figura 8 - Ligações com parafuso e conector de anel.....	29
Figura 9 - Tipos de pregos.....	30
Figura 10 - Tipos de parafusos. ....	31
Figura 11 - Exemplos de ligações em madeiras. ....	31
Figura 12 - Conectores para ligações em estruturas de madeira. ....	32
Figura 13 - Modelos de prego. ....	34
Figura 14 - Parafuso de porca.....	34
Figura 15 - Verificação da ruptura por tração em regiões localizadas.....	36
Figura 16 - Pinos em corte simples. ....	38
Figura 17 - Pinos em corte duplo.....	39
Figura 18 - Força solicitada inclinada à um ângulo em relação às fibras da madeira. ....	45
Figura 19 - Modos de ruína para seção de corte simples (madeira-madeira, painel-madeira). ....	47
Figura 20 - Modos de ruína seção de corte duplo (madeira-madeira, painel-madeira).....	51
Figura 21 - Modos de ruína para seções de corte simples e duplo (aço-madeira).....	52
Figura 22 - Representação do prego perpendicular e do prego inclinado. ....	56
Figura 23 - Emenda executada com pregos e parafusos.....	60
Figura 24 - Emenda executada com pregos.....	61
Figura 25 - Emenda executada com parafuso.....	62
Figura 26 - Ligações executadas com parafusos. ....	63
Figura 27 - Ligações executadas com parafusos. ....	64
Figura 28 - Ligações de uma viga apoiada em uma mão-francesa. ....	65
Figura 29 - Ligações entre uma peça de madeira e duas cobres juntas de aço.....	67
Figura 30 - Ligações entre uma peça de madeira e duas cobres juntas de madeira. ....	68
Figura 31 - Pórtico de madeira. ....	69
Figura 32 - Modelo em seção de corte duplo para análise da variação da espessura.....	70

Figura 33 - Modelo em seção de corte simples para análise da variação da espessura.....	74
Figura 34 - Modelo de seção entre espécies de madeira diferentes.....	77
Figura 35 - Legenda padronizada utilizada na planilha.....	103
Figura 36 - Cálculo automático para conexões pregadas. ....	103
Figura 37 – Divisão entre os modos de ruína de acordo com a seção de corte. ....	104
Figura 38 - Formulações de acordo com o tipo de prego. ....	104
Figura 39 - Exemplos de conexões executadas com pregos (EUROCODE 5). ....	105
Figura 40 - Exemplos de conexões executadas com parafusos (EUROCODE 5).....	105
Figura 41 – Exemplo de seção dupla calculado com o método da NBR 7190. ....	106
Figura 42 - Exemplo de seção simples calculado com o método da NBR 7190.....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de $\alpha_e$ .....	38
Tabela 2 - Valores de $k_{mod,1}$ .....	42
Tabela 3 - Valores de $k_{mod,2}$ .....	42
Tabela 4 - Coeficientes de ponderação da resistência da madeira - ELU.....	43
Tabela 5 - Coeficientes de ponderação da resistência da madeira - ELS.....	43
Tabela 6 - Classes de resistência das coníferas.....	44
Tabela 7 - Classes de resistência das dicotiledôneas.....	44
Tabela 8 - Coeficiente parcial recomendado para propriedades do material e resistência.....	46
Tabela 9 - Valores de $k_{mod}$ .....	46
Tabela 10 - Porcentagens da contribuição do efeito corda.....	54

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise da variação entre as espessuras $t_1$ e $t_2$ (NBR 7190). .....	71
Gráfico 2 - Modos de ruína para análise da variação da espessura $t_1$ (Eurocode 5).....	72
Gráfico 3 - Modos de ruína para análise da variação da espessura $t_2$ (Eurocode 5).....	72
Gráfico 4 - Valores mínimos do Eurocode 5 com os valores da NBR 7190.....	73
Gráfico 5 - Análise da variação entre as espessuras $t_1$ e $t_2$ (NBR 7190). .....	74
Gráfico 6 - Modos de ruína para análise da variação da espessura $t_1$ (Eurocode 5).....	75
Gráfico 7 - Modos de ruína para análise da variação da espessura $t_2$ (Eurocode 5).....	75
Gráfico 8 - Valores mínimos entre a NBR 7190 e o Eurocode 5. ....	76
Gráfico 9 - Esforço paralelo às fibras da madeira (NBR 7190). .....	77
Gráfico 10 - Esforço perpendicular às fibras da madeira (NBR 7190). .....	78
Gráfico 11 - Esforço paralelo às fibras da madeira (EUROCODE 5).....	79
Gráfico 12 - Esforço perpendicular às fibras da madeira (EUROCODE 5).....	79
Gráfico 13 – Valores percentuais para o Exemplo 1. ....	81
Gráfico 14 – Comparativo entre os valores de resistência (em kN) para o Exemplo 1.....	82
Gráfico 15 - Resultados obtidos no Exemplos 2 e 3. ....	83
Gráfico 16 - Resultados obtidos da resistência da ligação para os Exemplos 4 e 5.....	84
Gráfico 17 - Resultados da resistência da ligação (kN) para parafuso dos exemplos 6, 7 e 8.	86
Gráfico 18 - Resultados da resistência da ligação (kN) para prego dos exemplos 8 e 9.....	87

## Sumário

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
1.1.	JUSTIFICATIVA	21
1.2.	OBJETIVOS	22
1.2.1.	OBJETIVO GERAL	22
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.3.	METODOLOGIA	22
1.4.	APRESENTAÇÃO DA MONOGRAFIA	24
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	25
2.1.	PRINCIPAIS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA	25
2.1.1.	UMIDADE	25
2.1.2.	DENSIDADE	26
2.2.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	26
2.2.1.	RESISTÊNCIA	26
2.2.1.1.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	27
2.2.1.2.	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E À FLEXÃO	27
2.2.1.3.	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	28
2.3.	PROPRIEDADES DOS PINOS METÁLICOS	29
2.3.1.	PREGOS	29
2.3.2.	PARAFUSOS	30
2.4.	LIGAÇÕES EM PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA	31
2.4.1.	LIGAÇÕES EM MADEIRA COM PINOS METÁLICOS	33
2.4.1.1.	RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES	34
2.4.1.2.	PRÉ-FURAÇÃO DAS LIGAÇÕES	35
2.5.	CRITÉRIO DA NORMA BRASILEIRA	35
2.5.1.	VALORES DE CÁLCULO	36
2.5.2.	VALORES REPRESENTATIVOS	41
2.5.2.1.	COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO	41
2.5.2.2.	RESISTÊNCIA CÁLCULO	42
2.5.2.3.	CLASSES DE RESISTÊNCIA	44
2.6.	CRITÉRIO DA NORMA EUROPEIA	44
2.6.1.	VALORES DE FORÇA DE PROJETO	45
2.6.2.	VALORES REPRESENTATIVOS	46

2.6.2.1.	COEFICIENTE PARCIAL .....	46
2.6.2.2.	COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO .....	46
2.6.2.3.	VALORES DE CÁLCULO.....	47
<b>3.</b>	<b>EXEMPLOS DE APLICAÇÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1.</b>	<b>Exemplo 1: Emenda de corte simples executada com pregos e parafusos ..</b>	<b>60</b>
<b>3.2.</b>	<b>Exemplo 2: Emenda de corte simples conectadas por pregos .....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.</b>	<b>Exemplo 3: Ligação de corte duplo conectadas por parafusos .....</b>	<b>62</b>
<b>3.4.</b>	<b>Exemplo 4: Ligação entre viga e pilar conectadas por parafusos.....</b>	<b>63</b>
<b>3.5.</b>	<b>Exemplo 5: Ligação entre peças de madeira com seção composta conectadas por parafusos .....</b>	<b>64</b>
<b>3.6.</b>	<b>Exemplo 6: Ligação entre uma viga e uma mão-francesa conectadas por parafusos</b>	<b>65</b>
<b>3.7.</b>	<b>Exemplo 7: Ligação entre uma peça de madeira e uma chapa de aço .....</b>	<b>66</b>
<b>3.8.</b>	<b>Exemplo 8: Ligação entre peças de madeira.....</b>	<b>67</b>
<b>3.9.</b>	<b>Exemplo 9: Ligação em um pórtico de madeira .....</b>	<b>69</b>
<b>3.10.</b>	<b>Exemplo 10: Análise da variação da espessura convencional .....</b>	<b>70</b>
<b>3.11.</b>	<b>Exemplo 11: Análise em entre peças de madeira com espécies diferentes ..</b>	<b>76</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1.</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO EXEMPLO 1.....</b>	<b>81</b>
<b>4.2.</b>	<b>DISCUSSÕES DOS EXEMPLOS 2 E 3 .....</b>	<b>82</b>
<b>4.3.</b>	<b>DISCUSSÕES DOS EXEMPLOS 4 E 5 .....</b>	<b>84</b>
<b>4.4.</b>	<b>DISCUSSÕES DOS EXEMPLOS 6, 7, 8 E 9 .....</b>	<b>85</b>
<b>4.5.</b>	<b>DISCUSSÕES DO EXEMPLO 10 .....</b>	<b>88</b>
<b>4.6.</b>	<b>DISCUSSÕES DO EXEMPLO 11 .....</b>	<b>89</b>
<b>4.7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>90</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
	<b>ANEXO A – FORMULÁRIO COMPARATIVO PARA CONEXÕES DO TIPO MADEIRA-MADEIRA E PAINEL-MADEIRA .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO B – FORMULÁRIO COMPARATIVO PARA CONEXÕES DO TIPO AÇO-MADEIRA.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE A – CÁLCULO AUTOMÁTICO SEGUNDO OS CRITÉRIOS DO EUROCODE 5: 2004.....</b>	<b>103</b>

<b>APÊNDICE B - ILUSTRAÇÃO DOS EXEMPLOS COM APLICAÇÃO DA PLANILHA.....</b>	<b>105</b>
--	------------



## 1. INTRODUÇÃO

Depois da revolução industrial, observou-se que a utilização da madeira na construção civil como elemento estrutural diminuiu, principalmente no Brasil, que passou a utilizar principalmente a arquitetura em concreto e/ou metálica, dada a invenção e popularização do aço, do cimento e do concreto armado. Devido à falta de estudos avançados na época, em relação às propriedades da madeira, havia certa desconfiança quanto a durabilidade desse material. Posteriormente houve um progresso na investigação científica que permitiu mitigar inconvenientes em relação ao seu uso. Estudos realizados em laboratórios, por exemplo, passaram a demonstrar o bom desempenho da madeira em itens como durabilidade e resistência, quando adequadamente tratada.

A ideia equivocada de que a madeira possui uma pequena vida útil tem negligenciado o uso como material de construção. Embora a madeira seja de fato susceptível ao apodrecimento e ataque de insetos sob algumas condições, é um material muito durável quando utilizado com tecnologia adequada e tratamento químico, pois pode ser efetivamente protegido contra deterioração por período de 50 anos ou mais. Além disso, a madeira tratada com preservativos requer pouca manutenção e pintura. Ao contrário da crença popular, grandes peças de madeira têm boa resistência ao fogo e melhor performance estrutural que outros materiais em condições severas de exposição a incêndios (CALIL NETO, 2014).

Atualmente o uso da madeira como elemento estrutural nas construções está se tornando mais frequente nos canteiros de obras, devido a sua versatilidade, abundância e suas excelentes propriedades mecânicas, considerando que através das tecnologias mais recentes, estas propriedades são determinadas com valores mais confiáveis para se utilizar nos cálculos (SCHWANZ, 2014).

Segundo Xavier (2013) a madeira é um material que possui boa resistência mecânica, capacidade de resistir a esforços mecânicos de compressão e de tração, pequena massa específica, bom comportamento em situações de incêndio, além de ser um bom isolamento térmico e permitir a execução de ligações e emendas com certa facilidade.

De acordo com Moreira (2004), muitos dos componentes utilizados em estrutura de madeira são executados como estruturas reticuladas, na forma de grelhas, pórticos e treliças.

Tais estruturas exigem o emprego de ligações entre seus membros componentes. No caso de emprego de peças de maiores dimensões e compostas, é necessário o emprego de emendas.

Para a construção de estruturas de madeira de maneira geral existe a necessidade da ligação entre os diversos elementos estruturais. A fim de suportarem os esforços solicitantes na estrutura garantindo segurança na sua utilização, estas ligações podem ser realizadas com anéis metálicos, cavilhas de madeira, chapas de dentes estampados, ligações coladas (por adesivos) e por pinos metálicos como pregos, parafusos e barras de aço (BAENA, 2015).

Para a execução de estruturas de madeira de grande comprimento, é difícil encontrar peças maciças com dimensões suficientes para garantir a continuidade, devido principalmente às limitações no tamanho das árvores encontradas na natureza. Quando se quer fazer um bom uso da madeira de forma estrutural, faz-se necessário empregar soluções técnicas que explorem de maneira mais proveitosa a capacidade do material. As ligações, por serem consideradas os pontos mais vulneráveis em estruturas de madeira, devido aos esforços e tensões localizadas, requerem uma atenção especial. Nesse sentido, para vencer grandes vãos ou resistir aos esforços, é indispensável realizar uniões compatíveis com as solicitações mecânicas, oferecendo resistência e segurança com economia.

Pode-se de dizer, de madeira geral, que existem três tipos de ligações para componentes estruturais de madeira: por contato, por aderência e por penetração.

Ligações por contato são aquelas utilizada sob a garantia de que o esforço transmitido será sempre o de esforço de compressão. Um exemplo real de ligação mais comum em que ocorre essa transmissão de esforço de compressão é no nó de apoio de uma tesoura de cobertura para pequenos vãos, como mostra a figura 1. As ligações por aderência ocorrem por meio de uma película fina de adesivo, apresentada na figura 2, no qual os esforços são absorvidos pela superfície da área ligada pelo adesivo. Já a ligação por penetração é caracterizada pela utilização de elementos de ligação, a transmissão de força entre as peças converge para uma pequena área de interface. Citam-se como exemplo as ligações parafusadas e pregadas, onde o parafuso ou prego constituem os principais elementos resistentes. A figura 3(a) traz a representação de uma ligação com parafuso, e a figura 3(b) ilustra uma ligação com pregos.

Figura 1 - Ligações por contato.

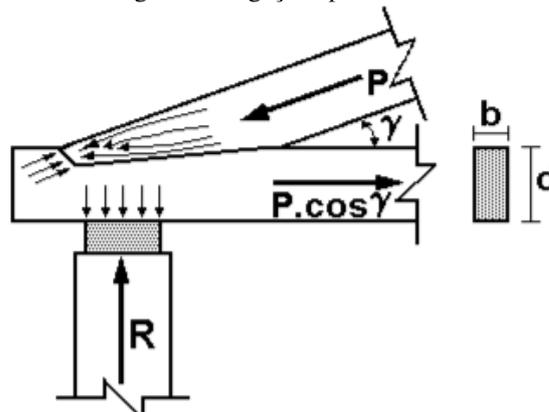
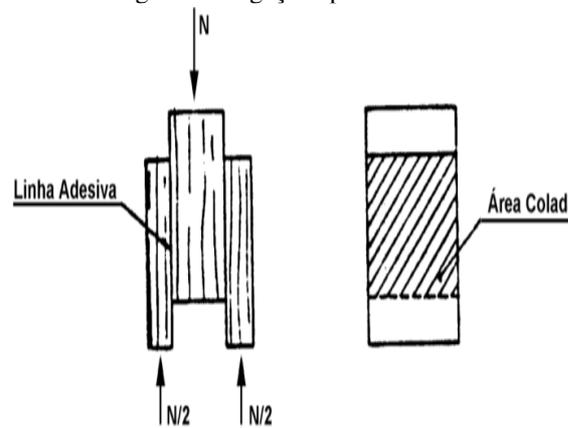
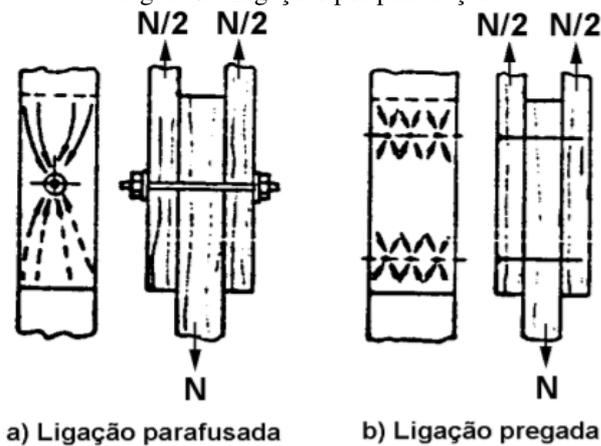
Fonte: PTDOCS (2021)<sup>1</sup>.

Figura 2 - Ligações por aderência.



Fonte: CALIL JÚNIOR e BERARDI (1998).

Figura 3 - Ligações por penetração.



Fonte: CALIL JÚNIOR e BERARDI (1998).

Atualmente a NBR 7190 está passando por uma revisão, segundo Souza Jr. (2021). Em palestra realizadas recentemente pela ABECE em seu canal do Youtube no dia 22 de Abril, foi

<sup>1</sup> PTDOCS. Ligações em peças estruturais de madeira. Disponível em: <<https://ptdocz.com/doc/110774/9.-liga%C3%A7%C3%B5es-em-pe%C3%A7as-estruturais-de-madeira-9.1>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

divulgado que já existe uma proposta de texto para uma nova versão desta norma há cerca de 10 anos, porém ainda não houve o encerramento da discussão para finalização da mesma. Ainda segundo o palestrante, a nova norma brasileira deverá estar muito baseada na norma europeia, e dessa maneira, quando esta estiver em vigor, teremos uma norma moderna e equivalente ao eurocode. O palestrante chamou a atenção também para o fato de que, devido aos avanços da tecnologia, muitas questões em relação à execução das ligações foram se desenvolvendo após o ano de 1997, e com essa atualização será possível anexar novos métodos de cálculo, de ensaio e de classificação de maneira que poderão ser consideradas novas possibilidades em relação a resistência estrutural da madeira e de suas ligações.

Ainda em relação a nova revisão, se tratando do cálculo das resistências, Souza Jr. (2021) diz que, a norma brasileira vem de uma tradição de classificar a madeira em relação a espécie e não ao seu desempenho estrutural, isto é, sua classificação de resistência. Mas, segundo o mesmo, hoje em dia, a visão da norma deve ser mais focada no desempenho e não na espécie.

Em relação ao dimensionamento de ligações, existem diferentes maneiras de se avaliar as tensões, a depender do tipo de ligação. As normas consideradas para o presente estudo abordam diferentes maneiras de se modelar o comportamento mecânico de ligações com pinos metálicos. Segundo Schwanz (2014, p. 96), apesar dos dois modelos de cálculo para ligações com pinos transversais, o da norma brasileira e da norma europeia, advirem da mesma teoria básica, estes apresentam diferenças significativas, principalmente quando são analisadas com duas seções de corte. Mas apesar das diferenças, as metodologias de cálculo da norma brasileira e da norma europeia são derivadas do modelo do Johansen<sup>2</sup>.

Nesta monografia foram desenvolvidas comparações teóricas entre a norma NBR 7190:1997 e o EUROCODE 5:2004. Tendo em vista a referência do eurocode para a revisão da norma brasileira, percebe-se a importância em se compreender estes diferentes códigos normativos, visando aperfeiçoar cada vez mais técnicas relacionadas às estruturas de madeira em nosso país.

---

<sup>2</sup> JOHANSEN, K. W. **Theory of Timber Connections**. International Association of Bridge and Structural Engineering 9, p. 249-262, 1949.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

A madeira é um dos poucos materiais renováveis utilizados na construção civil e quando comparada com os demais materiais estruturais (concreto e aço), sua utilização é favorecida devido às preocupações ambientais e economia de energia, pois durante seu processamento possui baixo consumo energético. Atualmente a maior quantidade de madeira utilizada na construção civil é de espécie de árvore de crescimento rápido, originada de florestas plantadas. Sua contribuição para o efeito estufa ocorre durante sua fase de crescimento, quando captura o carbono da atmosfera e transforma em madeira. Muitos estudos sobre esse material para sistemas estruturais têm confirmação de embasamento teórico a respeito da sua duração, comportamento e segurança estrutural, isso graças aos avanços tecnológicos.

É preciso incentivar o uso desse sistema estrutural pois, ao utilizar a madeira de reflorestamento como elemento estrutural, é possível reduzir o custo quando comparado com os demais materiais utilizados na construção civil, especialmente devido a sua capacidade de resistência mecânica mesmo com baixo peso específico. E no quesito de sustentabilidade nas construções, a madeira apresenta vantagem, devido a redução dos impactos ambientais e por seus subprodutos poderem ser aproveitados para outros fins.

Os critérios da norma brasileira vigente consideram apenas dois modos de ruína, sendo estes o embutimento na madeira e a flexão do pino, enquanto a norma europeia abrange um número maior, trazendo assim maiores soluções de situações de ligações em estruturas de madeira e mais próximas da realidade. Diante disso, considera-se que há uma defasagem da norma brasileira em vigor, por estar limitada apenas a esses dois modos de ruína, deixando assim um espaço na análise de ligações para os diferentes tipos de elementos.

O fato de a norma brasileira em vigor estar a mais de 20 anos defasada exige maiores estudos pois, ao ser comparada com o Eurocode, por exemplo, este tem versões mais recentes. E a norma europeia mesmo tendo uma defasagem de 16 anos, conta com uma quantidade maior de critérios e diretrizes.

Dessa forma, torna-se interessante realizar um estudo comparativo entre os modelos normativos da NBR 7190 (1997) e o Eurocode 5 (2004), levando em consideração que a norma

européia apresenta equações e formulações mais detalhadas, mais abrangentes e com um leque maior de configurações de ligações quando comparada a norma brasileira.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GERAL**

Realizar estudo comparativo entre os critérios normativos para o dimensionamento de ligações em estruturas de madeira da norma brasileira com a norma europeia.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- Estudar modos de ruínas de ligações em estruturas de madeira não contemplados pela NBR 7190:1997;
- Desenvolver metodologia para cálculo automático de ligações em estruturas de madeira segundo os critérios da norma europeia Eurocode 5: 2004;
- Avaliar numericamente o dimensionamento de ligações típicas em estruturas de madeira considerando os critérios das normas europeia e brasileira atualmente em vigor;
- Comparar os resultados entre aplicação dos critérios da norma brasileira e da norma europeia, avaliando impactos no dimensionamento e em projetos de estruturas de madeira.

## **1.3. METODOLOGIA**

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica, por meio de periódicos, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, livros e publicações sobre o cálculo e análise de ligações em estruturas de madeira. Neste sentido havia disponível o Sistema de Bibliotecas da UFAM - SISTEBIB, com acesso ao acervo da Biblioteca Setorial de Ciências Exatas e Engenharias, de um banco de teses e dissertações além do portal de periódicos da CAPES e ao sistema de normas técnicas GEDWEB.

O estudo seguiu com a definição e desenvolvimentos para cálculo de ligações pelo critério da norma brasileira, avaliando os elementos que foram utilizados no decorrer da realização do estudo. Em seguida, foi determinado e desenvolvido o modelo de cálculo automático de ligações pelo critério da norma europeia utilizando-se planilhas eletrônicas, para assim elaborar exemplos de cálculos de dimensionamento.

O processo de análise consistiu inicialmente na realização de exemplos para que se pudesse realizar o dimensionamento de acordo com as normas aqui citadas. Esse dimensionamento foi avaliado para diferentes casos e diferentes tipologias de ligações.

Em relação ao desenvolvimento da planilha, foi utilizado o programa Microsoft Excel®. A planilha foi elaborada de maneira a possuir células para as entradas numéricas de dados, atribuindo-se um padrão de cores para facilitar a interface de uso. As fórmulas utilizadas serão relatadas no capítulo 2, e foram inseridas para automatização dos cálculos e dimensionamentos. Entre os processos de automatização de cálculos temos, por exemplo, o cálculo da força resistente da ligação, o dimensionamento do número de pinos necessários e outros cálculos envolvendo as variáveis necessárias para esse estudo.

O desenvolvimento da planilha foi evoluindo ao longo do trabalho com melhorias para o processamento de diferentes exemplos numéricos, incluindo exemplos de variação de espessura e casos de ligações com diferentes espécies de madeira. Para otimizar o processo de comparação, alguns recursos do programa foram também aplicados, como por exemplo o recurso de ‘atingir meta’, que é utilizado quando se deseja obter um determinado valor por tentativas, de modo a alcançar um resultado pré-determinado. Tal recurso viabilizou a consideração de parâmetros equivalentes, conforme será descrito no capítulo 3.

Neste trabalho foram consideradas ligações com pregos e parafusados por serem os elementos mais comuns e utilizados em ligações de estruturas usuais no Brasil. Dessa forma, a planilha eletrônica foi desenvolvida para conexões pregadas e parafusadas. Além da divisão por seção de corte tipo de pino, a norma europeia também diferencia suas formulações de acordo com o tipo de conexão. Sendo assim, a planilha foi dividida em quadros de acordo com estas conexões: madeira-madeira, painel-madeira e aço-madeira, para os dois tipos de pinos metálicos. A interface da planilha pode ser visualizada no apêndice A.

A utilização de computadores e planilhas eletrônicas facilitou a simulação e processamento de diferentes tipologias, otimizando a análise e a discussão dos resultados obtidos. Tais resultados serviram de base para as análises comparativas entre os critérios das normas em relação à aplicação em projetos de estruturas de madeira, avaliando-se assim os pontos negativos e positivos de cada critério para as verificações de segurança e projetos.

#### **1.4. APRESENTAÇÃO DA MONOGRAFIA**

Essa monografia está organizada da seguinte maneira, no capítulo 1 foram abordados os aspectos iniciais como a introdução, justificativa, objetivos e a metodologia. O capítulo 2 é composto pela revisão bibliográfica contendo abordagens a respeito das propriedades físicas e mecânicas da madeira, propriedades dos pinos metálicos, ligações em peças estruturais de madeira, e por fim serão abordados também as diretrizes tanto da norma brasileira quanto da norma europeia. No capítulo 3 serão apresentados os exemplos analisados, de forma a comparar os métodos de cálculo entre as normas brasileira e europeia. No capítulo 4 estão as discussões dos resultados obtidos no capítulo anterior. E o por fim, tem-se o capítulo 5 com as conclusões observadas ao longo do desenvolvimento desta monografia.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para compreender o funcionamento mecânico das estruturas de madeira e de suas ligações, é necessário entender as propriedades e características dos materiais envolvidos. Nesse sentido, foi realizada uma revisão bibliográfica buscando-se identificar a forma de utilização mais segura e assertiva, uma vez que fatores como as propriedades e as características da madeira influenciam diretamente seu comportamento. Como os maiores esforços se concentram nas regiões das ligações devido ao contato direto entre as peças de madeira, também foi realizada uma revisão literária técnica a respeito dos elementos utilizados nas ligações em estruturas de madeira.

### 2.1. PRINCIPAIS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

#### 2.1.1. UMIDADE

Por ser um material higroscópico, a madeira absorve e libera facilmente água para obter o equilíbrio com a umidade relativa do ar. A quantidade de água presente na madeira possui grande influência na resistência, seu controle tem como importância evitar que fungos causem seu apodrecimento. Na madeira, a umidade pode ser encontrada no interior fibras e quando absorvida nas paredes das mesmas. Após a secagem, a madeira é considerada meio seca quando atinge o grau de umidade de cerca de 30%, ou seja, as paredes das células ainda estão saturadas, mas a água no seu interior evaporou.

O Teor de Umidade da madeira (U) é definido pela Equação 1.

$$U(\%) = \frac{P_i - P_s}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$P_i$  = Peso inicial da madeira;

$P_s$  = Peso seco da madeira.

Como a NBR 7190:1997 estabelece valores na condição-padrão para a madeira com umidade com  $U = 12\%$ , neste trabalho serão levados em consideração os valores tabelados referentes a essa condição-padrão de umidade. O coeficiente parcial de modificação que leva em consideração a classe de umidade é o  $k_{mod,2}$  que será abordado no item 2.5.2.1. O EUROCODE 5:2004 também faz a consideração da umidade a um coeficiente semelhante, atrelada as classes de serviço em que a madeira se enquadra.

### 2.1.2. DENSIDADE

A madeira conta com duas definições diferentes para densidade: densidade básica e aparente. A densidade básica é definida como a massa específica convencional, resultante do quociente da massa seca pelo volume saturado. E a densidade aparente é determinada com teor de umidade padrão de referência de  $12\%$ . A densidade da madeira costuma variar de espécie para espécie ou árvore para árvore, essa variação dentro de uma determinada árvore ocorre na posição do lenho ocupada pela amostra.

Segundo Moreira (2004), a densidade da madeira é uma de suas propriedades mais significativas, estando diretamente relacionada à retratilidade, às resistências mecânicas da madeira e a uma maior dificuldade de secagem, existindo numerosos trabalhos, de diferentes autores, sobre as correlações existentes entre a densidade da madeira e suas características de rigidez e resistência mecânica.

É importante ressaltar que a densidade da madeira nos métodos de cálculos da norma brasileira não é utilizada. No Anexo E da NBR 7190:1997 é disponibilizada uma tabela para diferentes espécies de madeira e nessa tabela encontram-se valores de densidade aparente com corpos de prova a  $12\%$  de umidade. Já nos métodos de cálculo da norma europeia, a densidade da madeira é utilizada para o cálculo da resistência de embutimento, abordada no item 2.6.2.3.

## 2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

### 2.2.1. RESISTÊNCIA

A resistência é determinada convencionalmente pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos-de-prova isentos de defeitos do material considerado, até o aparecimento de fenômenos particulares de comportamento além dos quais há restrição de emprego do material

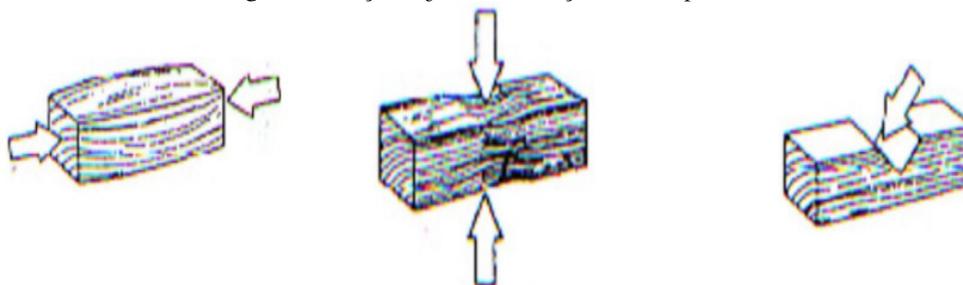
em elementos estruturais. De modo geral estes fenômenos são os de ruptura ou de deformação específica excessiva (NBR 7190, 1997, p.14).

A norma brasileira de projetos de estruturas de madeira descreve os ensaios que devem ser feitos para a obtenção das resistências de compressão, de tração, ao cisalhamento e ao embutimento, normal e paralela às fibras.

#### 2.2.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A compressão na madeira pode ocorrer em três orientações distintas: na direção paralela, normal e inclinada em relação às fibras de crescimento da madeira, como representado na figura 4. Na compressão paralela, as forças agem paralelamente ao comprimento das células, e essas células reagem de forma a conferir a resistência da madeira à compressão. Para a compressão normal, a madeira apresenta resistências menores do que na paralela, devido a força aplicada ser nessa direção produzir um efeito de esmagamento das fibras, sendo por isso uma direção com baixa resistência mecânica. E para as solicitações inclinadas, a NBR 7190, utiliza o modelo de Hankinson para estimativa de valores intermediários.

Figura 4 - Peças sujeitas à esforços de compressão.

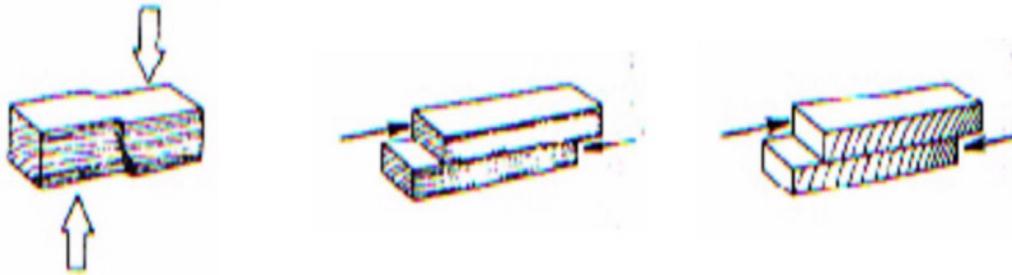


Fonte: RITTER, 1990.

#### 2.2.1.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E À FLEXÃO

Assim como na compressão, o cisalhamento na madeira pode também ocorrer de três formas distintas, quando a força é perpendicular e longitudinal às fibras, e quando a força é aplicada perpendicularmente às linhas dos anéis de crescimento, conforme ilustrado na figura 5, onde é possível visualizar os diferentes comportamentos para forças de cisalhamento. Das três formas citadas, o caso mais crítico geralmente é quando o cisalhamento ocorre na horizontal, rompendo por escorregamento entre as células da madeira.

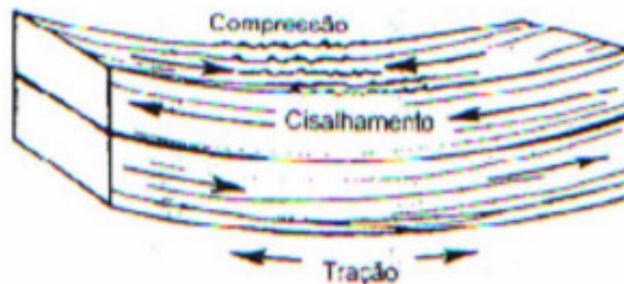
Figura 5 - Cisalhamento na madeira.



Fonte: RITTER, 1990.

Na flexão ocorrem quatro tipos de esforços: compressão e tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal nas seções ao longo do vão, como mostra a figura 6. Para seções nos apoios ocorre a compressão normal às fibras. A ruptura à flexão ocorre geralmente com o surgimento de pequenas falhas de compressão seguidas pelo esmagamento na região comprimida.

Figura 6 - Flexão na madeira.



Fonte: RITTER, 1990.

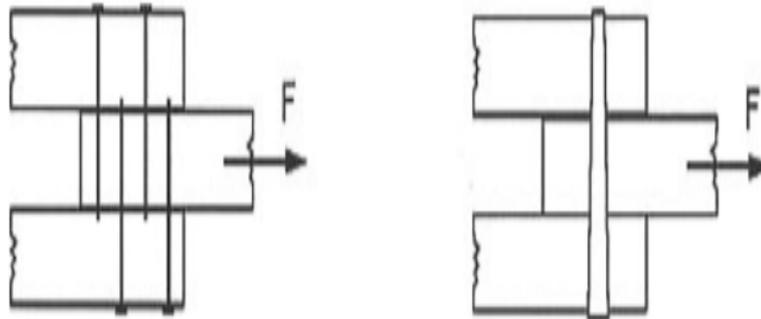
### 2.2.1.3. RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

A chamada resistência ao embutimento da madeira ocorre quando, na presença de um pino metálico em contato com a madeira (isto é, embutido) surgem tensões de contato que tendem a causar o esmagamento da madeira. “Conforme foi observado por XAVIER (2014), a resistência da madeira ao embutimento é um dos fatores levados em consideração durante o dimensionamento de ligações numa estrutura de madeira, visando à segurança, pois a ligação é um ponto crítico, sendo essencial o estudo dos esforços envolvidos”. Para a resistência de embutimento a norma brasileira determina que os esforços resistentes são determinados por um ensaio específico de embutimento, utilizando um método padronizado e quando não é possível determinar experimentalmente, são adotados os critérios simplificados de acordo com os valores tabelados pela própria norma. E a representação para a resistência ao embutimento pode ser observada nas figuras 7 e 8 a seguir.

### 2.3. PROPRIEDADES DOS PINOS METÁLICOS

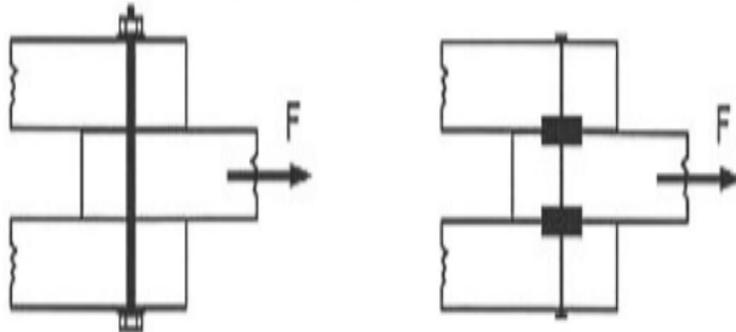
Os pinos metálicos são os mais utilizados nas ligações de construção de estruturas de madeira devido as grandes vantagens quando comparados com outros tipos de ligações existentes. Os pinos metálicos são constituídos por pregos, parafusos, cavilhas e conectores. Para pregos e parafusos de aço, a NBR 7190 especifica normas que devem ser utilizadas de acordo com o pino metálico, os pregos devem seguir a NBR 6627 – Pregos Comuns e Arestas de Aço para Madeira e o aço dos parafusos devem seguir a NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto e Edifícios.

Figura 7 - Ligação feitas com prego e pino de madeira.



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2003.

Figura 8 - Ligação com parafuso e conector de anel.

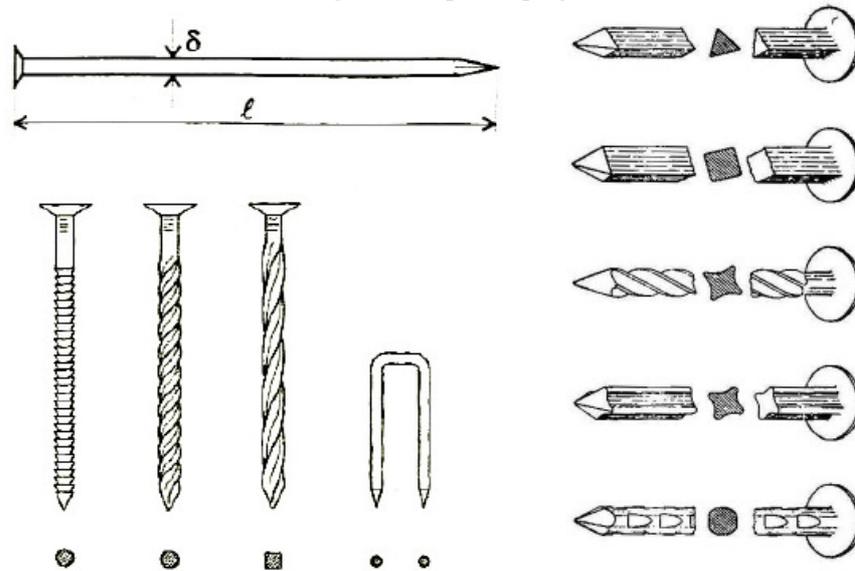


Fonte: PFEIL e PFEIL, 2003.

#### 2.3.1. PREGOS

Dias (2013) diz que, com o advento do aço, começou a utilizá-lo em forma de pregos nas estruturas de madeira. Os pregos são os elementos de ligação mais comuns de serem utilizados e provavelmente os mais tradicionais. São fabricados com arame de aço. O mais comum a se utilizar é o prego com cabeça de fuste cilíndrico circular, porém existem diversos tipos de pregos no mercado e alguns deles são apresentados na figura 9, cada qual com sua função específica.

Figura 9 - Tipos de pregos.



Fonte: Blog estruturas de madeira, 2013<sup>3</sup>.

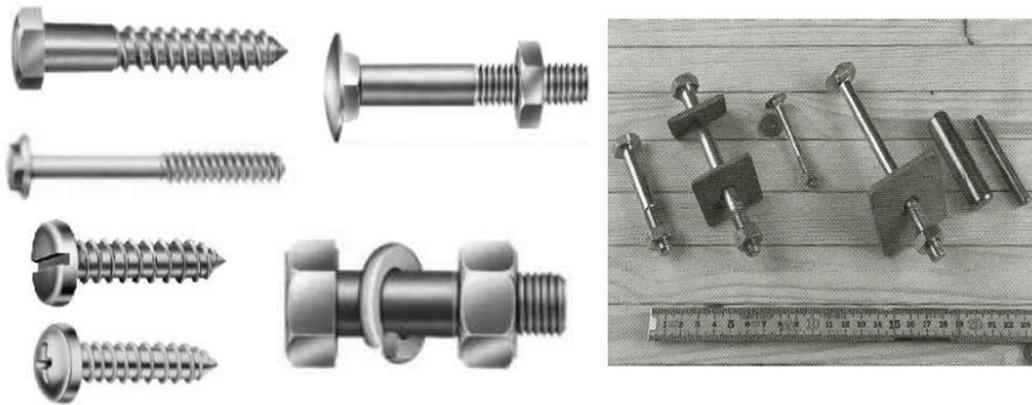
Vale ressaltar que a norma europeia quando se trata de pregos, no cálculo do momento de escoamento característico, por exemplo, faz uma diferenciação quanto ao uso das fórmulas de acordo com o tipo de unha, sendo elas redondas ou quadradas. E outra consideração que o EUROCODE 5 faz em relação à pregos, é no cálculo da força de resistência característica ao arrancamento do pino, sendo que para tal valor, são levadas em consideração unhas lisas e unhas não lisas. Enquanto a norma brasileira não faz considerações tão específicas quanto a norma europeia a respeito dos pregos.

### 2.3.2. PARAFUSOS

Ainda de acordo com Dias (2013), os parafusos são instalados ajustados nos furos de modo a não ultrapassar uma pequena folga. Após a colocação dos parafusos, as porcas são apertadas comprimindo fortemente a madeira, com o esforço sendo transferido com o auxílio de arruelas. Este esforço favorece a ligação pois desenvolve forte atrito entre as ligações, porém devido à deformação lenta da madeira, deveremos dimensionar as ligações sem a consideração do atrito, considerando os parafusos trabalhando como pinos. A figura 10 apresenta alguns modelos dos diferentes tipos de parafusos existente.

<sup>3</sup> Disponível em: < <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2013/02/ligacoes-em-estruturas-de-madeira.html>>. Acesso em:

Figura 10 - Tipos de parafusos.

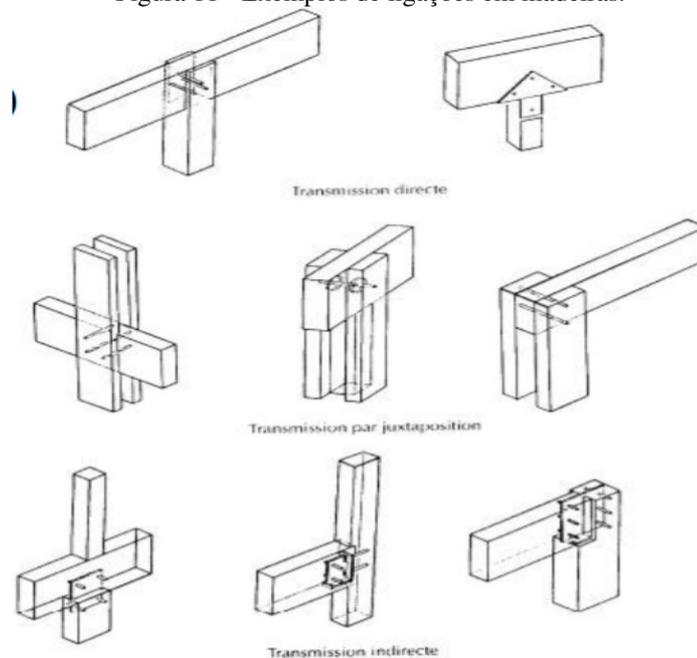


Fonte: Blog estruturas de madeira, 2013<sup>4</sup>.

## 2.4. LIGAÇÕES EM PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

Devido as limitações como o tamanho das peças comerciais de madeira, as ligações surgem como forma de solução para a união de uma ou mais peças de madeira. As ligações são geralmente consideradas os pontos mais fracos de uma estrutura de madeira, por isso é de extrema importância ter domínio nos cálculos e esquemas construtivos usados no dimensionamento e na execução das ligações. A figura 11 mostra alguns exemplos dos tipos de ligações em estruturas de madeira.

Figura 11 - Exemplos de ligações em madeiras.



Fonte: GOVIC, 1995.

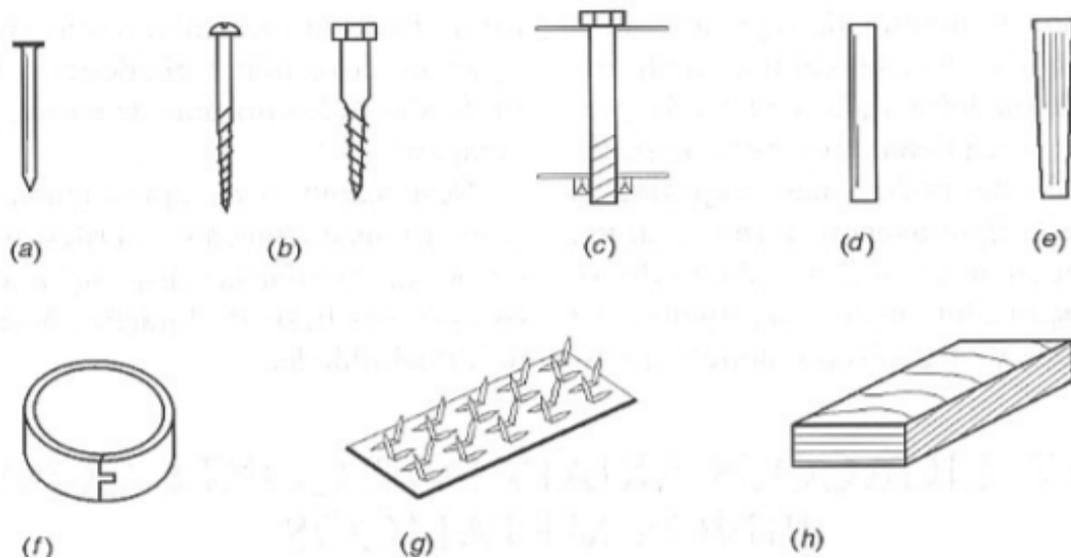
<sup>4</sup> Disponível em: < <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2013/02/ligacoes-em-estruturas-de-madeira.html>>. Acesso em:

As transmissões dos esforços nas ligações são de dois tipos, uma que ocorre por contato direto entre as peças de madeira, como é o caso de encaixes e entalhes ou em que há elementos externos, como pinos metálicos que fazem a função de fixar e transmitir os esforços (CALIL JÚNIOR et al., 2003).

Para confeccionar as estruturas e os sistemas estruturais, as peças são ligadas entre si, utilizando-se diversos dispositivos. Os principais tipos de ligação empregados são: colagem, pregos, grampos, braçadeiras, pinos, parafusos, conectores metálicos, tarugos e entalhes (PFEIL e PFEIL, 2003), como mostra a figura 12.

Grampos e braçadeira são utilizados somente como auxílio de montagem, ou seja, não são considerados elementos de ligação estrutural. A colagem é utilizada principalmente na fabricação de peças de madeira laminada e madeira compensada. Os conectores de anel são peças encaixadas em ranhuras, sua principal característica é a transmissão de esforços. Para ligações em que a madeira precise trabalhar a compressão associada ao corte, os entalhes são os mais recomendados. Os tarugos são utilizados no interior de entalhes, com finalidade de transmitir os esforços. E os pregos e parafusos são os mais utilizados em ligações de montagem e ligações definitivas.

Figura 12 - Conectores para ligações em estruturas de madeira.



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2003.

As ligações mais simples e usuais são efetuadas por meio de pinos, os quais são embutidos na madeira, ligando lateralmente peças entre si. As ligações com pinos são discretas ao longo da área de contato das peças, com a transmissão dos esforços produzindo

concentrações de tensões nas áreas restritas de contato entre o pino e a madeira. Quando a capacidade de carga da ligação é influenciada pelo escoamento dos pinos, o processo de ruptura tende naturalmente a ser dúctil e a resistência da ligação é definida em função de um limite imposto às deformações (MOREIRA, 2004, p. 44).

#### 2.4.1. LIGAÇÕES EM MADEIRA COM PINOS METÁLICOS

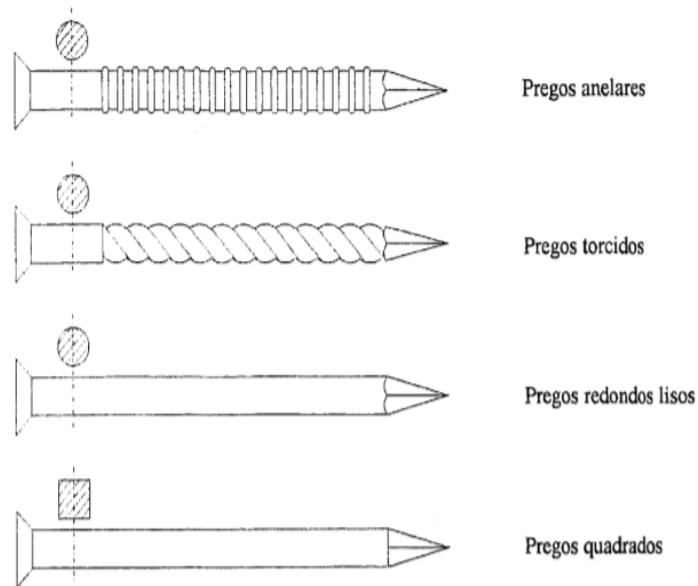
Os pinos metálicos, em meados do século XVII, eram utilizados em estruturas que empregavam peças com pequenas dimensões, com a função de transmitir os esforços entre duas peças estruturais de madeira (ALMEIDA, 1987).

De acordo com a NBR 7190:1997, os pinos metálicos podem ser constituídos por pregos ou parafusos. Segundo PFEIL e PFEIL (2003), os pregos são utilizados em ligações de montagem e ligações definitivas. Os parafusos são de dois tipos: parafusos rosqueados auto-atarraxantes, em geral não se empregam como elementos de ligação de peças estruturais de madeira; parafusos com porcas e arruelas, normalmente são utilizados nas ligações estruturais.

Os pregos são conectores utilizados particularmente para resistirem ao corte, no entanto, conforme observado por MENDES (1994) a sua resistência ao arranque pode ser apreciável, dependendo do tipo de prego utilizado.

Segundo Calil Neto (2014), as ligações com pregos têm grande deformabilidade, associada ao pequeno diâmetro que, normalmente, estes conectores possuem. Essa grande deformabilidade pode, no entanto, revelar-se bastante útil para a resistência as ações sísmicas, uma vez que permite à zona da ligação um comportamento dúctil.

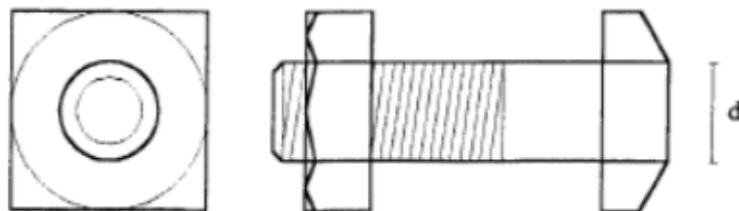
Figura 13 - Modelos de prego.



Fonte: CALIL NETO, 2014.

A respeito dos parafusos de porca, Calil Neto (2014) diz que, nos parafusos de porca a força e aperto entre os elementos ligados é conferida pela compressão transversal nas faces exteriores devido às porcas, enquanto que, nos pinos de madeira, essa força de aperto é transmitida por atrito ao longo do pino. A representação dos parafusos de porca é mostrada na figura 14.

Figura 14 - Parafuso de porca.



Fonte: CALIL NETO, 2014.

#### 2.4.1.1. RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

De acordo com os critérios da NBR 7190:199, não permitido que se utilize ligações apenas com um único pino. Ligações com dois ou três pino são consideradas deformáveis e podem ser usadas somente em estruturas isostáticas. No dimensionamento, essas ligações podem ser consideradas como rígidas, dando-se à estrutura uma contraflecha compensatória. A norma também define que, ligações com quatro ou mais pinos (pregos e parafusos) são consideradas rígidas quando estas respeitem as especificações dos diâmetros de pré-furação.

Para Oliveira (2001), as condições propostas pela NBR 7190:1997, quanto à rigidez da ligação, devem ser criteriosamente analisadas e questionada para cada caso e para cada estrutura. Tais afirmações podem ser contrariadas em diversas situações nas quais o comportamento da ligação pode indicar uma rigidez e uma estabilidade perfeitamente compatíveis com as condições de exposição e de utilização de uma determinada estrutura.

#### 2.4.1.2. PRÉ-FURAÇÃO DAS LIGAÇÕES

Em relação a pré-furação, a norma brasileira divide em ligações pregadas e parafusadas. Para as ligações pregadas, é obrigatório a pré-furação quando o diâmetro  $d_0$  não for maior que o diâmetro efetivo  $d_{ef}$  do prego, com os valores usuais: Coníferas:  $d_0 = 0,85d_{ef}$  e Dicotiledôneas:  $d_0 = 0,98d_{ef}$ . Vale ressaltar que a norma brasileira só admite uso de ligações sem pré-furação em estruturas provisórias de madeira com densidade aparente menor ou igual a  $600 \text{ kg/m}^3$  e que permitam a penetração dos pregos sem risco de fendilhamento, além de que o diâmetro  $d$  do prego não deve ser maior que  $1/6$  da menor espessura da madeira e com espaçamento mínimo de  $10d$ .

E para que as ligações parafusadas sejam consideradas rígidas, a NBR 7190:1997 determina que a pré-furação seja feita o diâmetro  $d_0$  não deve ser superior ao diâmetro  $d$  do parafuso, acrescido de 0,5 mm. Quando esse critério não é atendido, a ligação é considerada deformável.

### 2.5. CRITÉRIO DA NORMA BRASILEIRA

A norma brasileira vigente referente ao projeto de estruturas de madeira determina alguns dispositivos que são utilizados para sua execução, como pinos metálicos, cavilhas e conectores. “Os pinos metálicos podem ser constituídos por pregos ou parafusos, as cavilhas são pinos de madeira torneado e os conectores podem ser constituídos por anéis metálicos ou por chapas metálicas com dentes estampados” (NBR 7190, 1997, p.32).

A formulação para o dimensionamento estrutural considera determinados modos de ruínas, e para cada modo há uma expressão específica de verificação de segurança. A norma brasileira de projetos de estruturas de madeira, no entanto, tem sua última versão datada do ano de 1997. Segundo consulta realizada na plataforma online da Associação Brasileira de Normas

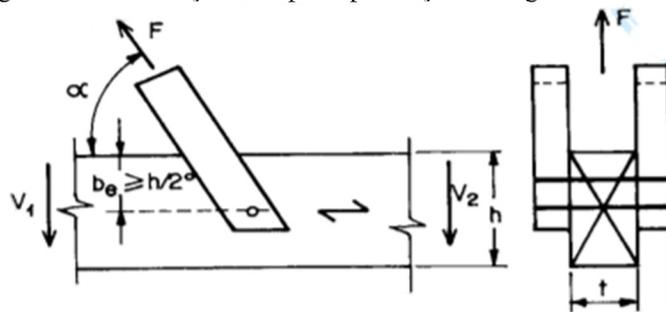
Técnicas (ABNT, 2021) esta norma encontra-se atualmente em processo de revisão, e há expectativas de que a norma europeia seja fonte de referência, de maneira análogo ao que já ocorreu em outras normas técnicas brasileiras.

### 2.5.1. VALORES DE CÁLCULO

Com o objetivo de evitar a ruptura por tração normal às fibras em regiões localizadas, a NBR 7190:1997 recomenda que faça a seguinte verificação, como representado na equação 2. A figura 15 representa a verificação à ruptura por tração normal às fibras em uma ligação com pinos metálicos.

$$V_d \leq \frac{2 \cdot f_{vd} \cdot b_e \cdot t}{3} \quad (2)$$

Figura 15 - Verificação da ruptura por tração em regiões localizadas.



Fonte: NBR 7190, 1997.

Onde:

$V_d$  = Força cortante fictícia, dada por  $V_1 + V_2 = F \cdot \text{sen} \alpha$ , de acordo com a figura acima;

$b_e$  = Distância do eixo do pino mais afastado à borda do lado da solicitação, sendo  $b_e \geq h/2$  e  $h$  é a altura total da peça principal;

$t$  = Espessura da peça principal;

$f_{vd}$  = Resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras;

$\alpha$  = Ângulo de inclinação da força  $F$  em relação às fibras;

Como já mencionado anteriormente no item 2.2.1.3., a resistência de embutimento da madeira pode ser determinada através do ensaio de embutimento padronizado, mas na falta de dados experimentais, a NBR 7190:1997 disponibilizada a caracterização simplificada da madeira, dadas pelas equações 3 e 4.

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (3)$$

$$f_{e90,d} = 0,25f_{c0,d} \cdot \alpha_e \quad (4)$$

Onde:

$f_{c0,d}$  = Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras;

$f_{e0,d}$  = Resistência de cálculo de embutimento na madeira, direção paralela às fibras;

$f_{e90,d}$  = Resistência de cálculo de embutimento na madeira, direção normal às fibras;

$\alpha_e$  = Coeficiente fornecido pela NBR 7190:1997;

Para o caso de resistências a tensões normais inclinadas em relação às fibras da madeira, a NBR 7190 permite ignorar a influência da inclinação em relação às fibras quando o ângulo  $\alpha$  for menor ou igual a  $6^\circ$ , caso o ângulo seja maior que  $6^\circ$ . E para inclinações maiores, a norma considera necessária a redução de resistência através da fórmula de Hankinson, dada pela equação 5.

$$f_{e\alpha,d} = \frac{f_{e0,d} \cdot f_{e90,d}}{f_{e0,d} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{e90,d} \cdot \text{cos}^2 \alpha} \quad (5)$$

Sendo:

$f_{e\alpha,d}$  = Resistência de cálculo de embutimento na madeira, direção inclinada de um ângulo  $\alpha$  em relação às fibras;

$\alpha$  = Ângulo formado entre a força aplicada e as fibras.

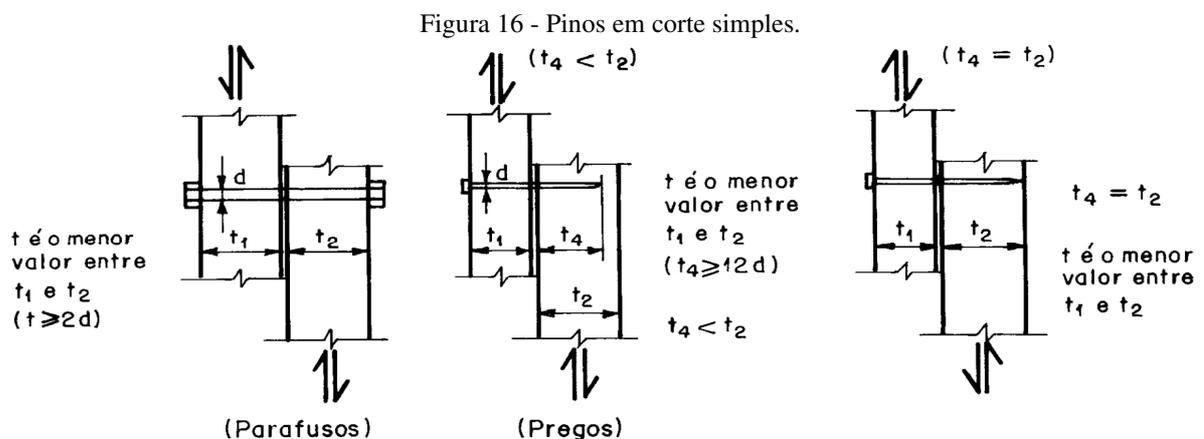
Para os valores do coeficiente  $\alpha_e$ , a norma brasileira dispõe uma tabela com valores de acordo com o diâmetro do pino, representada na tabela 1.

Tabela 1 - Valores de  $\alpha_e$ .

Diâmetro do pino (cm)	$\alpha_e$
$\leq 0,62$	2,50
0,95	1,95
1,25	1,68
1,60	1,52
1,90	1,41
2,20	1,33
2,50	1,27
3,10	1,19
3,80	1,14
4,40	1,10
5,00	1,07
$\geq 7,50$	1,00

Fonte: Adaptado de NBR 7190:1997.

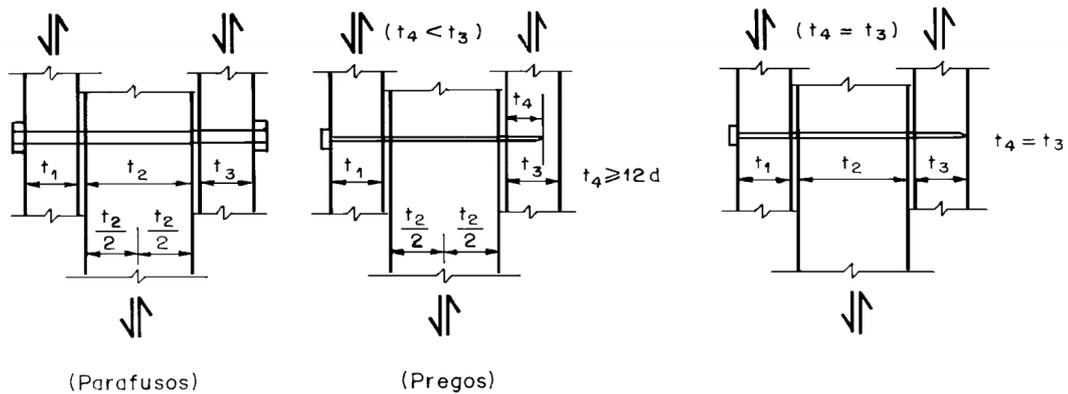
A resistência de um pino em cada seção de corte é determinada pela NBR 7190:1997 em função das resistências de embutimento  $f_{ed}$  das duas peças de madeira ligadas, da resistência de escoamento  $f_{yd}$  do pino metálico, do diâmetro e de uma espessura  $t$ . Para corte simples, a espessura  $t$  é a menor entre as espessuras  $t_1$  e  $t_2$  de penetração do pino em cada uma das peças. A figura 16 apresenta as espessuras das peças de madeira  $t_1$  e  $t_2$ , para a situação de parafusos. Na situação de pregos,  $t_1$  é a menor espessura da peça,  $t_4$  ou  $t_2$  é a espessura de penetração do pino.



Fonte: NBR 7190, 1997.

Para pinos em corte duplo, são aplicados os mesmos critérios para a determinação da resistência citados anteriormente de acordo com cada seção de corte,  $t$  será o menor valor entre  $t_1$  e  $t_2/2$  em uma das seções, e entre  $t_2/2$  e  $t_3$  na outra como mostra na figura 17 abaixo.

Figura 17 - Pinos em corte duplo.



Fonte: NBR 7190, 1997.

Segundo a NBR 7190 (1997), o valor de cálculo da resistência de um pino metálico correspondente a uma única seção de corte é determinado em função do parâmetro  $\beta$ , dado pela equação 6.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (6)$$

Sendo:

$\beta$  = Parâmetro de cálculo;

$t$  = Espessura convencional da madeira determinada como mostra a figura 16;

$d$  = Diâmetro do pino.

A norma brasileira também determina um limite para o mesmo parâmetro  $\beta$ , conforme a Equação 7.

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (7)$$

Sendo:

$\beta_{lim}$  = Parâmetro de cálculo limite;

$f_{yd}$  = Resistência de cálculo ao escoamento do pino metálico;

$f_{ed}$  = Resistência de cálculo de embutimento.

Para a resistência de cálculo ao escoamento do pino metálico, de acordo com a norma brasileira é determinada a partir da resistência característica de escoamento  $f_{yk}$ , com  $\gamma_s = 1,1$ , logo:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \rightarrow f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,1} \quad (8)$$

De acordo com NBR 7190 (1997), os pregos estruturais devem ser feitos de aço com resistência característica de escoamento  $f_{yk}$  de pelo menos 600 MPa, e devem ter diâmetro mínimo de 3 mm. Recomenda-se que os parafusos estruturais tenham diâmetros não menores que 10 mm e resistência característica de escoamento  $f_{yk}$  de pelo menos 240 MPa.

Pela norma brasileira existe apenas dois modos de ruína da madeira e este é determinado a partir da comparação entre  $\beta$  e  $\beta_{lim}$ . O valor de cálculo da resistência do pino para uma dada seção de corte é dado pelas seguintes expressões:

### **I – Embutimento na madeira**

Quando  $\beta \leq \beta_{lim}$  o modo de ruína que ocorre na ligação é o embutimento na madeira e o valor da resistência da ligação de uma seção de corte é dada pela equação 9.

$$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \quad (9)$$

Onde:

$R_{vd,1}$  = Resistência de um pino para uma seção de corte;

$t$  = Espessura convencional da madeira;

$\beta$  = Parâmetro de cálculo;

$f_{ed}$  = Resistência de cálculo ao embutimento.

## II – Flexão do pino

Para  $\beta > \beta_{lim}$  o modo de ruína que ocorre na ligação é a flexão do pino e o valor da resistência da ligação de uma seção de corte é dada pela equação 10.

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} \quad (10)$$

Onde:

$R_{vd,1}$  = Resistência de um pino para uma seção de corte;

$d$  = Diâmetro do pino;

$\beta_{lim}$  = Parâmetro de cálculo limite;

$f_{yd}$  = Resistência de cálculo do pino ao escoamento.

Nas ligações com mais de oito pinos, os pinos suplementares devem ser considerados com apenas 2/3 de sua resistência individual. Neste caso, sendo  $n$  o número efetivo de pinos, a ligação deve ser calculada com o número convencional (NBR 7190, 1997, p.33). Representada pela equação 11.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3}(n - 8) \quad (11)$$

### 2.5.2. VALORES REPRESENTATIVOS

#### 2.5.2.1. COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO

Segundo a NBR 7190 (1997), os coeficientes de modificação  $k_{mod}$  afetam os valores de cálculo das propriedades da madeira em função da classe de carregamento da estrutura, da classe de umidade admitida, e do eventual emprego de madeira de segunda qualidade. O coeficiente de modificação é dado pela equação 12.

$$k_{\text{mod}} = k_{\text{mod},1} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot k_{\text{mod},3} \quad (12)$$

A norma brasileira determina as seguintes considerações para os valores de coeficientes parciais de modificação:

$k_{\text{mod},1}$  = Leva em conta o efeito de duração do carregamento e tipo de material empregado, dado pela tabela 2;

$k_{\text{mod},2}$  = Leva em conta a umidade do ambiente e tipo de material empregado, conforme a tabela 3 a seguir;

$k_{\text{mod},3}$  = Leva em conta a categoria da madeira, de acordo com a norma, para madeira de segunda categoria, admite-se  $k_{\text{mod},3} = 0,8$  e primeira categoria,  $k_{\text{mod},3} = 1,0$ .

Tabela 2 - Valores de  $k_{\text{mod},1}$ .

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: Adaptado de NBR 7190:1997.

Tabela 3 - Valores de  $k_{\text{mod},2}$ .

Classes de umidade	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada colada Madeira compensada	
(1) e (2)	1,0	1,0
(2) e (4)	0,8	0,9

Fonte: Adaptado de NBR 7190:1997.

### 2.5.2.2. RESISTÊNCIA CÁLCULO

Os valores de cálculo são obtidos através dos valores característico, dividindo-os pelos coeficientes de ponderação  $\gamma_w$ . Em peças de madeira esse valor também é minorado multiplicando-o pelo coeficiente de modificação  $k_{\text{mod}}$ . E o valor de cálculo da resistência é dado pela equação 13.

$$f_d = k_{\text{mod}} \frac{f_{\text{wk}}}{\gamma_w} \quad (13)$$

Sendo:

$f_d$  = Resistência de cálculo;

$k_{\text{mod}}$  = Coeficiente de modificação;

$f_{\text{wk}}$  = Resistência característica;

$\gamma_w$  = Coeficiente de ponderação das resistências.

Para o valor de resistência característica da madeira, a norma admite que se utilize a equação 14.

$$f_{\text{wk}} = 0,70 \cdot f_{\text{wm},12} \quad (14)$$

Onde:

$f_{\text{wm},12}$  = Resistência média correspondente a 12% de umidade, obtido através de tratamento estatístico sobre os resultados dos ensaios.

Em relação ao coeficiente de ponderação das resistências, NBR 7190:1977 determina que sejam diferentes para cada uma das solicitações e com os estados limites, portanto:

Tabela 4 - Coeficientes de ponderação da resistência da madeira - ELU.

ELU	
Esforços solicitantes	Coeficiente de ponderação
Compressão	1,4
Tração	1,8
Cisalhamento	1,8

Fonte: Adaptado de NBR 7190:1997.

Tabela 5 - Coeficientes de ponderação da resistência da madeira - ELS.

ELS	
Coeficiente de ponderação	
	1,10

Fonte: Adaptado de NBR 7190:1997.

### 2.5.2.3. CLASSES DE RESISTÊNCIA

A norma brasileira determinou um sistema de classe de resistência de madeiras com propriedades padronizadas, facilitando assim a escolha do material para elaboração de projetos estruturais, tais valores estão representados nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Classes de resistência das coníferas.

Coníferas – Valores na condição-padrão de referência U = 12%					
Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{vk}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{aparente}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C20	20	4	3500	400	500
C25	25	5	8500	450	550
C30	30	6	14500	500	600

Fonte: Adaptado de NBR 7190:1997.

Tabela 7 - Classes de resistência das dicotiledôneas.

Dicotiledôneas – Valores na condição-padrão de referência U = 12%					
Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{vk}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{aparente}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C20	20	4	9500	500	650
C30	30	5	14500	650	800
C40	40	6	19500	750	950
C60	60	8	24500	800	100

Fonte: Adaptado de NBR 7190:1997.

## 2.6. CRITÉRIO DA NORMA EUROPEIA

Embora a norma brasileira e a norma europeia tenham partido da mesma formulação do modelo de Johansen (1949) para a determinação da resistência das ligações, tais documentos apresentam diferenças significativas quando se trata principalmente da determinação dos modos de ruína. Enquanto a NBR 7190:1997 possui apenas duas formulações para seus dois modos de ruína, o EUROCODE 5:2004 leva em consideração seis equações para ligações em corte simples e quatro equações para ligações em corte duplo, ressaltando que essas dez formulações são para conexões do tipo Madeira-Madeira e Painel-Madeira. E para conexões do tipo Aço-Madeira, em relação as ligações em corte simples, são apresentadas cinco equações e para ligações em corte duplo, seis equações. Também são apresentadas as considerações de efeitos como o de corda e força de atrito entre as peças.

### 2.6.1. VALORES DE FORÇA DE PROJETO

Assim como a NBR 7190:1997, o EUROCODE 5:2004 também evita a possibilidade de que ocorra ruptura por tração normal às fibras, contudo, a norma europeia faz a seguinte verificação para satisfazer essa condição, representada pela equação 15.

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (15)$$

Com:

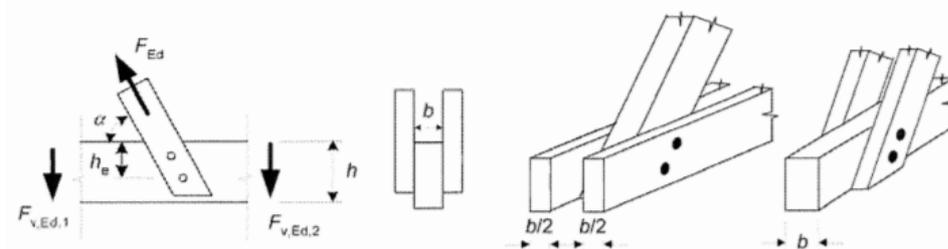
$$F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases} \quad (16)$$

Onde:

$F_{90,Rd}$  = Força de projeto de tração normal às fibras;

$F_{v,Ed,1}$ ,  $F_{v,Ed,2}$  = Força de projeto ao cisalhamento em ambos os lados da conexão, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Força solicitada inclinada à um ângulo em relação às fibras da madeira.



Fonte: EUROCODE 5, 2004.

A força de projeto para uma determinada conexão de madeira é dada pela equação 17.

$$F_{Rd} = k_{mod} \frac{F_{Rk}}{\gamma_M} \quad (17)$$

Sendo:

$F_{Rd}$  = Força de projeto da conexão;

$F_{Rk}$  = Força característica da conexão;

$\gamma_M$  = Coeficiente parcial da conexão de acordo com o material;

$k_{mod}$  = Coeficiente de modificação de acordo com o efeito de duração da carga e umidade.

## 2.6.2. VALORES REPRESENTATIVOS

### 2.6.2.1. COEFICIENTE PARCIAL

Para o coeficiente parcial  $\gamma_M$ , o EUROCODE 5:2004, disponibiliza os valores que variam de acordo com a propriedade do material utilizado, como mostra a tabela 8.

Tabela 8 - Coeficiente parcial recomendado para propriedades do material e resistência.

Material	$\gamma_M$
Madeira maciça	1,30
Madeira laminada colada	1,25
LVL, Compensado, OSB	1,20
Aglomerados	1,30
Placas de fibras (dura, média, MDF, macia)	1,30
Conexões	1,30
Conexão metálicas perfuradas	1,25
Combinações acidentais	1,00

Fonte: Adaptado de EUROCODE 5, 2004.

### 2.6.2.2. COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO

O coeficiente de modificação determinado pelo EUROCODE 5:2004 é determinado de acordo com o tipo de material, com a classe de serviço e com a duração de carga, como mostra a tabela 9.

Tabela 9 - Valores de  $k_{mod}$ .

Material	Classe de serviço	Carga de duração				
		Permanente	Longa duração	Média duração	Curta duração	Instantânea
Maciça	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Laminada colada	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Compensado	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	1	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90

Aglomerados	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Placas de fibras, dura	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Placas de fibras, média	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	2	-	-	-	0,40	0,80
Placas de fibras, MDF	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	2	-	-	-	0,45	0,80

Fonte: Adaptado de EUROCODE 5, 2004.

Para uma conexão entre madeiras diferente, a norma europeia determina a equação 18 para o valor do coeficiente de modificação:

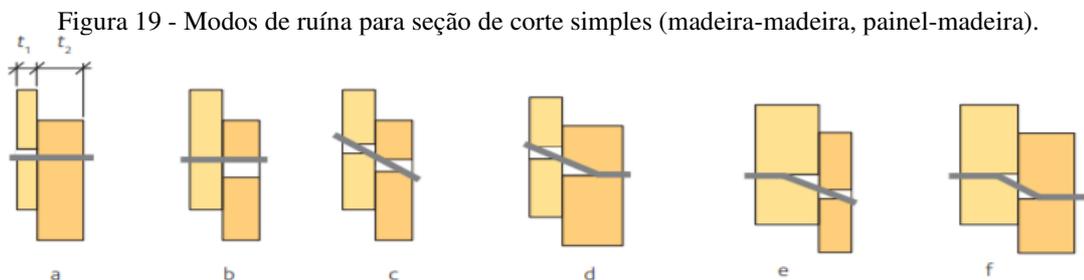
$$k_{\text{mod}} = \sqrt{k_{\text{mod},1} k_{\text{mod},2}} \quad (18)$$

Onde:

$k_{\text{mod},1}$  e  $k_{\text{mod},2}$  = Coeficiente de modificação para cada material 1 e 2.

### 2.6.2.3. VALORES DE CÁLCULO

Como dito anteriormente, o EUROCODE 5:2004 apresenta uma série de equações de acordo com a seção de corte tanto para parafuso quanto para prego. A figura 19 representa a análise para os seis tipos de modos de ruína para uma ligação de seção simples, com duas peças de madeira, sendo a linha cinza representa o pino metálico.



Fonte: Design of timber structures – Volume 2, 2016.

Para a figura 19, tem-se os seguintes modos de ruína: nas ligações (a) e (b) o modo de ruína que ocorre é o embutimento em uma das peças de madeira; para (c) o modo de ruína é o embutimento nas duas peças de madeira; o modo de ruína que ocorrem (d) e (e) é a flexão do

pino causado em uma das peças de madeira; em (f) o modo de ruína que ocorre também é a flexão do pino causado pelas duas peças de madeira.

As expressões apresentadas pelo EUROCODE 5:2004 para o valor de força de resistência característica serão apresentadas pelas relações contidas na equação 19.

$$F_{v,Rk} = \text{mín} \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (a) \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \quad (f) \end{array} \right. \quad (19)$$

Onde:

$F_{v,Rk}$  = Força de resistência característica de um pino;

$t_1$  e  $t_2$  = Espessura da madeira ou a penetração do pino nesta;

$d$  = Diâmetro do pino;

$f_{h,1,k}$  e  $f_{h,2,k}$  = Resistência ao embutimento característica para cada membro da madeira;

$\beta$  = Relação entre as resistências ao embutimento característica dos membros;

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

$M_{y,Rk}$  = Momento de escoamento característico do pino;

$F_{ax,Rk}$  = Força de resistência característica ao arrancamento do pino.

Para o valor do momento de escoamento característico, são dadas duas expressões representadas pela equação 20.

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{para unhas redondas} \\ 0,45 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{para unhas quadradas} \end{cases} \quad (20)$$

Sendo:

$d$  = Diâmetro do pino;

$f_u$  = Resistência à tração característica do material do pino.

Em relação ao cálculo da resistência de embutimento, o EUROCODE 5:2004 determina duas expressões, equações 21 e 22, para conexões do tipo madeira-madeira.

- Sem pré-perfuração ( $d < 8$  mm)

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (21)$$

- Com pré-perfuração (todos os diâmetros)

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01) \cdot d \cdot \rho_k \quad (22)$$

Sendo:

$f_{h,k}$  = Resistência de embutimento característica;

$\rho_k$  = Densidade característica da madeira;

$d$  = Diâmetro do pino.

E para conexões do tipo painel-madeira, o EUROCODE 5:2004 determina as seguintes expressões de acordo com o material do painel, representadas pelas equações 23, 24 e 25.

- Compensado

$$f_{h,k} = 0,11\rho_k d^{-0,3} \quad (23)$$

- Painéis rígidos

$$f_{h,k} = 30\rho_k d^{-0,3} t^{0,6} \quad (24)$$

- Aglomerado e OSB

$$f_{h,k} = 65d^{-0,7} t^{0,1} \quad (25)$$

$f_{h,k}$  = Resistência de embutimento característica;

$\rho_k$  = Densidade característica do compensado;

$d$  = Diâmetro do pino;

$t$  = Espessura do painel.

A equação dada para a resistência característica de embutimento no ângulo  $\alpha$  é representada pelas equações 26, 27 e 28.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (26)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01d) \cdot \rho_k \quad (27)$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d - \text{madeiras macias} \\ 1,30 + 0,015d - \text{LVL} \\ 0,90 + 0,015d - \text{madeira duras} \end{cases} \quad (28)$$

Onde:

$f_{h,0,k}$  = Resistência de característica paralela às fibras;

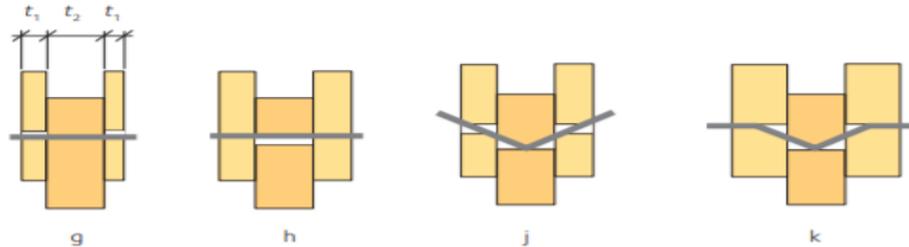
$\rho_k$  = Densidade característica da madeira;

$d$  = Diâmetro do pino;

$\alpha$  = Ângulo da carga em relação às fibras.

Para a seção em corte duplo, a figura 20 representa a análise para os quatro tipos de modos de ruína para uma ligação de seção simples, com três peças de madeira, sendo a linha cinza representa o pino metálico.

Figura 20 - Modos de ruína seção de corte duplo (madeira-madeira, painel-madeira).



Fonte: Design of timber structures – Volume 2, 2016.

Nesse tipo de seção em corte duplo é importante ressaltar a diferença existente entre o EUROCODE 5:2004 e a NBR 7190:1977 quanto a consideração da peça central da ligação. Enquanto a norma brasileira utilizada a metade da espessura da peça central, a norma europeia admite a espessura total da peça central.

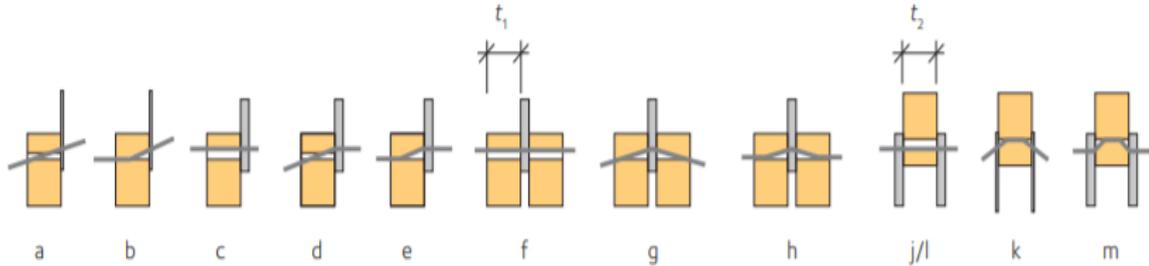
Para a figura 20, tem-se a seguinte análise dos modos de ruína: o modo de ruína que ocorre em (g) e (h) é o embutimento na madeira externa e interna, respectivamente; e o modo de ruína que ocorre em (j) e (k) é a flexão do pino causado pela madeira externa e interna, respectivamente.

As expressões apresentadas pelo EUROCODE 5:2004 para o valor de força de resistência característica serão apresentadas pelas relações contidas na equação 29.

$$F_{v,Rk} = \text{mín} \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{(g)} \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{(h)} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(j)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases} \quad (29)$$

Além das conexões do tipo madeira-madeira e painel-madeira, o Eurocode também determina expressões para conexões do tipo aço-madeira. Assim como no tipo de conexão anterior, a norma europeia sugere a análise para os diferentes tipos de ruína na ligação, como mostra a figura 21. Vale ressaltar que a linha cinza atravessando as peças representa o pino metálico, e as chapas de aço são representadas pelas suas espessuras.

Figura 21 - Modos de ruína para seções de corte simples e duplo (aço-madeira).



Fonte: Design of timber structures – Volume 2, 2016.

O EUROCODE 5:2004, classifica como uma placa de aço fina aquelas com espessura menor ou igual a  $0,5d$  e placas de aço grossa aquelas com espessura maior ou igual a  $d$  com tolerância de  $0,1d$ , onde  $d$  é o diâmetro do pino. Os valores de força resistente característico é determinado de acordo com a classificação de espessura das peças de madeira, logo, tem-se as seguintes expressões:

O valor de força resistente característico para placas de aço fina em cisalhamento simples com ( $t \leq 0,5d$ ) é dado pelas relações contidas na equação 30.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,4 \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{(a)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} & \text{(b)} \end{cases} \quad (30)$$

Para placas de aço espessa em cisalhamento simples com ( $t_{aço} \geq d$ ), o valor de força resistente característico é dado pelas relações contidas na equação 31.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(c)} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} & \text{(d)} \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{(e)} \end{cases} \quad (31)$$

Para placas de aço com qualquer espessura como membro central em seção de corte duplo, tem-se as seguintes as relações contidas na equação 32 referentes ao valor de força resistente característico.

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{(f)} \\ f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(g)} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(h)} \end{cases} \quad (32)$$

Para placas de aço finas como membros externos com ( $t_{aço} \leq 0,5d$ ) em seção de corte duplo, tem-se as seguintes as relações contidas na equação 33 referentes ao valor de força resistente característico.

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{(j)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases} \quad (33)$$

Placa de aço espessa com membros externos com ( $t_{aço} \geq d$ ) em seção de corte duplo, tem-se as seguintes as relações contidas na equação 34 referentes ao valor de força resistente característico.

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{(l)} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases} \quad (34)$$

Onde:

$F_{v,Rk}$  = Força de resistência característica de um pino;

$t_1$  e  $t_2$  = Espessura da madeira ou a penetração do pino nesta;

$d$  = Diâmetro do pino;

$f_{h,1,k}$  e  $f_{h,2,k}$  = Resistência ao embutimento característica para cada membro da madeira;

$M_{y,Rk}$  = Momento de escoamento característico do pino;

$F_{ax,Rk}$  = Força de resistência característica ao arrancamento do pino.

Para o cálculo da resistência de embutimento, o EUROCODE 5:2004 determina duas expressões para conexões do tipo painel-madeira, representadas pelas equações 35 e 36.

- Compensado

$$f_{h,k} = 0,11 \cdot (1 - 0,01d) \cdot \rho_k \quad (35)$$

- Aglomerado e OSB

$$f_{h,k} = 50 \cdot d^{-0,6} \cdot t^{0,2} \quad (36)$$

Onde:

$f_{h,k}$  = Resistência de embutimento característica;

$\rho_k$  = Densidade característica do compensado;

$d$  = Diâmetro do pino;

$t$  = Espessura do painel.

O EUROCODE 5 faz uma consideração para conexões do tipo madeira-madeira e painel-madeira, a respeito da contribuição  $F_{ax,Rk}/4$  (efeito corda), no qual este não deve exceder os seguintes valores de porcentagens da capacidade restante, representados abaixo na tabela 10. A norma europeia também diz que, quando o valor de  $F_{ax,Rk}$  não é conhecido, essa contribuição é considerada como zero.

Tabela 10 - Porcentagens da contribuição do efeito corda.

Material	Porcentagens
Pregos com unhas redondas	15%
Pregos com unhas quadradas e ranhuradas	25%
Outros pregos	50%
Parafusos 1	100%
Parafusos 2	25%
Cavilhas	0%

Fonte: Adaptado de Design of timber structures – Volume 2, 2016.

Para pregos em conexões aço-madeira, as expressões disponibilizadas pela norma europeia serão apresentadas nas equações 37 e 38 abaixo. As formulações estão divididas da seguinte maneira: pregos perpendiculares e pregos inclinados, como mostra a figura 22, e são consideradas o tipo de unha, lisas ou não lisas.

- Para unhas não lisas

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} & (a) \\ f_{head} \cdot d_h^2 & (b) \end{cases} \quad (37)$$

- Para unhas lisas

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} & (a) \\ f_{ax,k} \cdot d \cdot t + f_{head} \cdot d_h^2 & (b) \end{cases} \quad (38)$$

Onde:

$F_{ax,Rk}$  = Força de resistência característica ao arrancamento do pino;

$f_{ax,k}$  = Força de retirada característica do lado da ponta;

$f_{head,k}$  = Força de tração característica da cabeça do pino;

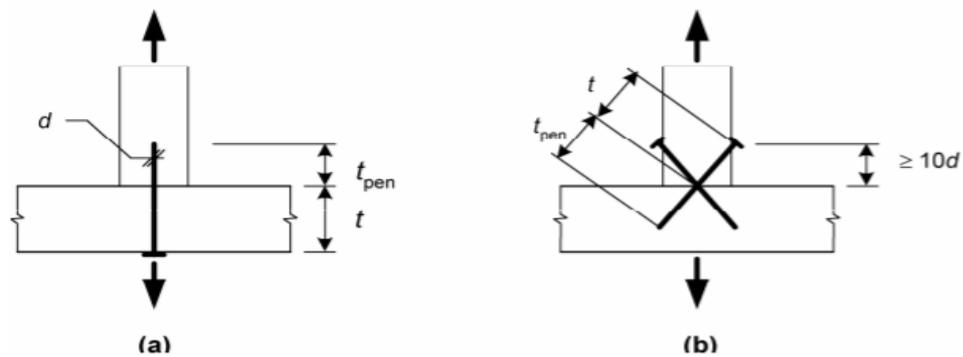
$d$  = Diâmetro do prego;

$d_h$  = Diâmetro da cabeça do prego;

$t$  = Espessura do membro do lado da cabeça do pino, representação na figura 22;

$t_{pen}$  = Comprimento de penetração da ponta ou da parte roscada do lado esquerdo no membro da ponta, representação na figura 22.

Figura 22 - Representação do prego perpendicular e do prego inclinado.



Fonte: Handbook 2, 2008.

E para conexões parafusadas, as expressões utilizadas no cálculo do efeito corda são dadas pelas equações 39, 40, 41 e 42, apresentadas a seguir.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef}(\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} f_{ax,\alpha,k} \quad (39)$$

A força de retirada característica em ângulo  $\alpha$  deve ser tomada como:

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cos^2 \alpha} \quad (40)$$

Como:

$$f_{ax,k} = 3,6 \times 10^{-0,3} \rho_k^{1,5} \quad (41)$$

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (42)$$

Sendo:

$F_{ax,Rk}$  = Força característica ao arrancamento da conexão em um ângulo  $\alpha$  em relação ao grão;

$n_{ef}$  = Número efetivo de parafusos;

$n$  = Número de parafusos;

$d$  = Diâmetro externo medido na parte roscada;

$l_{ef}$  = Comprimento de penetração da ponta da peça roscada menos um diâmetro do parafuso;

$f_{ax,\alpha,k}$  = Força de retirada característica em ângulo  $\alpha$ ;

$f_{ax,k}$  = Força de retirada característica perpendicular;

$\rho_k$  = Densidade característica.



### 3. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados exemplos numéricos com aplicação das metodologias abordadas no capítulo anterior. Os exemplos aqui apresentados foram dimensionados considerando tanto a norma brasileira quanto a norma europeia. Para compreender melhor as análises dos resultados, é importante ressaltar que neste capítulo a resolução dos exemplos foi feita partindo do método de cálculo da norma brasileira para assim seguir com o método de cálculo da norma europeia. Tal procedimento foi utilizado com o objetivo de fazer o uso de alguns valores já calculados pela norma brasileira nas formulações da norma europeia, para assim obter-se uma melhor comparação entre os critérios normativos.

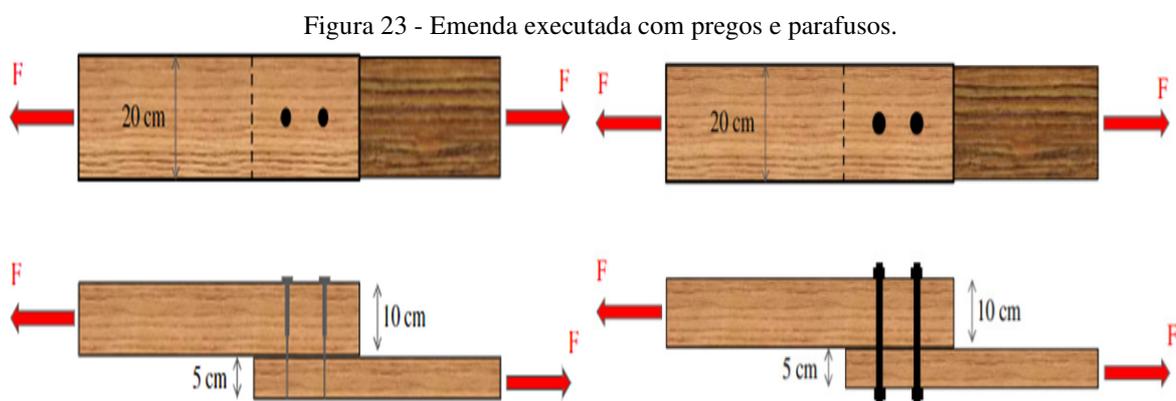
Tanto a norma brasileira como a norma europeia utilizam a letra grega  $\beta$  para a determinação de um parâmetro usado nos seus métodos de cálculo, e será mantida nesse trabalho a denominação original de acordo com os códigos normativos. O valor de  $\beta$  considerado pela norma europeia é a relação empírica entre as resistências de embutimento dos membros adjacentes na ligação. Já pela norma brasileira, há dois parâmetros:  $\beta$  e  $\beta_{lim}$ , que são relacionados as propriedades da madeira e do pino, sendo  $\beta$  a relação entre a espessura convencional da madeira e o diâmetro, e  $\beta_{lim}$  é uma relação limítrofe que definirá a menor capacidade resistente entre a madeira e o pino. Dessa forma é importante observar que a única relação entre parâmetros é a utilização da mesma letra grega, não havendo relação entre si. Afim de evitar possíveis confusões entre os valores dos parâmetros utilizados pelas normas, nesta monografia,  $\beta_{euro5}$  será o parâmetro referente a norma europeia e para a norma brasileira  $\beta_{NBR}$  e  $\beta_{lim(NBR)}$  será a nova representação dos parâmetros brasileiros.

A norma europeia apresenta um número maior de formulações para os modos de ruína, sendo por esse motivo esperada diferença entre os resultados. É importante lembrar que o valor de força resistente característica do pino a ser considerado é sempre o menor valor entre os modos de ruína possíveis.

A seguir apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos com o uso de planilhas eletrônicas para o dimensionamento das ligações. A análise criteriosa e as discussões sobre os resultados serão apresentadas de forma sintetizada no próximo capítulo.

### 3.1. Exemplo 1: Emenda de corte simples executada com pregos e parafusos

Na figura 23 tem-se uma emenda hipotética com corte simples de seções transversais 20 cm x 10 cm e 20 cm x 5 cm, com resistência à compressão de projeto no valor hipotético de  $f_{c0,d} = 10$  MPa. Essa emenda foi dimensionada considerando duas possibilidades: dois pregos de 5 mm de diâmetro e dois parafusos de 10 mm de diâmetro. Foram calculados os valores de força resistente dessa ligação, para fins de comparação entre as metodologias da norma brasileira e da norma europeia.



Fonte: Aula de exemplos de ligações em estruturas de madeira, 2019.

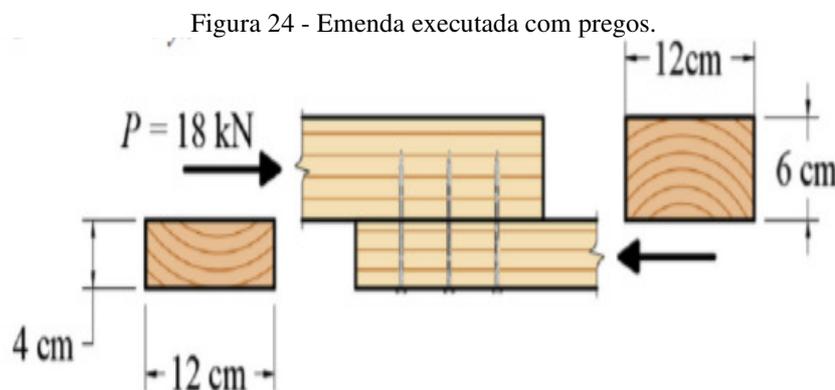
a) Nesse exemplo a resistência de embutimento a ser considerada é a paralela às fibras, portanto, utilizou-se a equação 3 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros para pregos valem:  $\beta_{NBR} = 10$  e  $\beta_{lim(NBR)} = 9,231$ . Assim, o modo de ruína que ocorre é a flexão do pino, logo o valor de resistência de cada pino (calculada com a equação 10) foi de 0,923 kN/pino, e a resistência da ligação considerando dois de pregos é de 1,846 kN. E para o caso da ligação com parafusos, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{NBR} = 5$  e  $\beta_{lim(NBR)} = 5,839$ . O modo de ruína que ocorre, nesse caso, é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência de cada pino (calculado com a equação 9) foi de 2,0 kN/pino, e a resistência da ligação considerando dois parafusos é de 4,00 kN.

b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor parâmetro é de  $\beta_{euro5} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Com os dados hipotéticos disponibilizados nesse exemplo, foi utilizada a função ‘atingir meta’ do Excel para determinar a densidade de 494,103 kg/m<sup>3</sup> para a madeira no caso da ligação com pregos e 338,753 kg/m<sup>3</sup> para o caso da ligação com parafusos, sendo esses valores referentes à resistência de embutimento característica equivalente a 25 MPa. Este valor mantém a relação adotada para a

resistência de cálculo de 10 MPa, admitindo-se, para esse caso, o valor usual do coeficiente  $k_{mod}$  igual a 0,56. O valor de resistência de cada pino (calculado com as equações 19 e 17) foi de 0,852 kN/pino, e o valor da força resistente encontrada para a ligação com pregos foi de 1,703 kN. Observou-se que, assim como na norma brasileira, o modo de ruína, para essa situação, ocorre com a flexão do pino, conforme visto na figura 19 (f). Para o caso da ligação executada com parafusos, o valor de resistência de cada pino (calculado com as equações 19 e 17) foi de 1,875 kN/pino. O valor de força resistente encontrado pela norma europeia para a ligação com parafusos foi de 3,751 kN, ligeiramente menor do que no caso da norma brasileira.

### 3.2. Exemplo 2: Emenda de corte simples conectadas por pregos

Seja uma emenda de corte simples entre peças de seções retangulares de 12 cm x 6 cm e 12 cm x 4 cm, conectadas por pregos de aço com tensão de escoamento no valor de  $f_{yk} = 600$  MPa e diâmetro de 4,4 mm, que sofre a ação de uma força de compressão solicitante de 18 kN. Nesse exemplo foi determinada a quantidade de pregos necessários para essa ligação considerando ambas as formulações das diferentes normas. Adotando uma madeira conífera de classe C40, com o valor do coeficiente  $k_{mod} = 0,56$ .



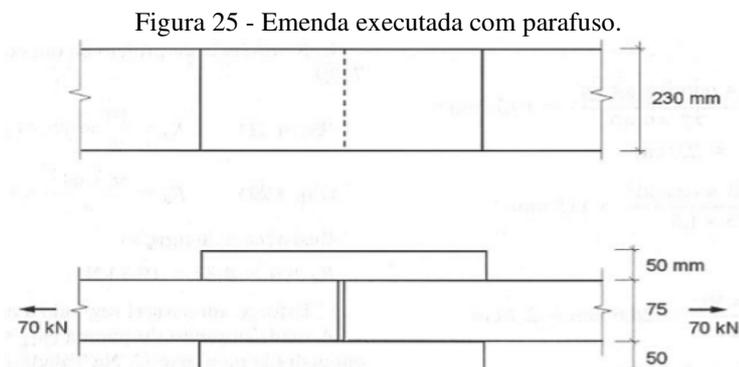
Fonte: Apostila de exercícios de estruturas de madeira.

a) A resistência de embutimento a ser considerada é a paralela às fibras, portanto, utilizou-se a Equação 3 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{NBR} = 9,09$  e  $\beta_{lim(NBR)} = 7,298$ . O modo de ruína que ocorre é a flexão do pino, logo o valor de resistência da ligação considerando um plano de corte é de 0,904 kN/pino. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de pregos com diâmetro de 4,4 mm necessária para a emenda é de 22 unidades.

b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor do parâmetro é de  $\beta_{\text{euro5}} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Nesse exemplo foi utilizada a função ‘atingir meta’ do Excel, para encontrar um valor de densidade característica equivalente de  $426,059 \text{ kg/m}^3$  referente ao valor de resistência de embutimento de  $22,40 \text{ MPa}$ . A resistência individual de cada pino (calculada com as equações 19 e 17) é  $0,640 \text{ kN/pino}$ . A quantidade de pregos encontrada pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 29 unidades, isto é, são necessários 7 pregos a mais em relação a quantidade encontrada pela norma brasileira.

### 3.3. Exemplo 3: Ligação de corte duplo conectadas por parafusos

A seguir, foi dimensionada uma emenda com corte duplo entre peças de seções retangulares de  $23 \text{ cm} \times 7,5 \text{ cm}$  e talas  $23 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ , que sofre uma carga de tração solicitante de cálculo de  $70 \text{ kN}$ , esta emenda será construída com parafusos de aço de  $10 \text{ mm}$  de diâmetro, com uma tensão de escoamento no valor de  $f_{yk} = 240 \text{ MPa}$ . Nesse exemplo foi determinada a quantidade necessária de parafusos da ligação considerando ambas as formulações das diferentes normas. A espécie da madeira utilizada nesta emenda é o Angelim-pedra, com o valor do coeficiente  $k_{\text{mod}} = 0,56$ .



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2003.

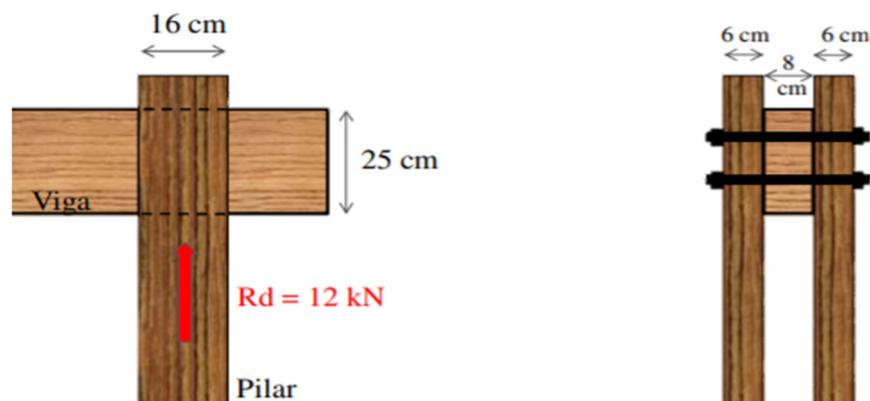
a) Para esse exemplo, a resistência de embutimento a ser considerada é a paralela às fibras, portanto, utilizou-se a Equação 3 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{\text{NBR}} = 3,750$  e  $\beta_{\text{lim(NBR)}} = 4,512$ . O modo de ruína que ocorre é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência de cada pino (calculada com a equação 9) foi de  $2,512 \text{ kN/pino}$ , e a resistência da ligação considerando os dois planos de corte é de  $5,023 \text{ kN}$ . Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de parafusos com o diâmetro de  $10 \text{ mm}$  necessária para a emenda é de 20 unidades.

b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor do parâmetro é de  $\beta_{\text{euro5}} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Utilizando a função ‘atingir meta’ do Excel, foi possível encontrar um valor de densidade característica equivalente de 317,615 kg/m<sup>3</sup> referente ao valor de resistência de embutimento de 23,44 MPa. A resistência individual (calculada com as equações 19 e 17) é 1,816 kN/pino, e a resistência da ligação considerando os dois planos de corte é de 3,632 kN. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de parafusos encontrada pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 27 unidades, isto é, são necessários 7 parafusos a mais em relação a quantidade encontrada pelos cálculos da norma brasileira.

### 3.4. Exemplo 4: Ligação entre viga e pilar conectadas por parafusos

Uma ligação entre uma viga de seção retangular de 8 cm x 25 cm e um pilar de seção composta por duas peças retangulares de madeira de 6 cm x 16 cm, são conectadas por parafusos de 16 mm de diâmetro. A madeira é de classe C40, com uma reação de apoio de 12 kN. Nesse exemplo foi determinada a quantidade necessária de parafusos para a ligação considerando ambas as formulações das diferentes normas. Foi adotado o valor do coeficiente  $k_{\text{mod}} = 0,56$ . E por se tratar de parafuso, o valor de tensão de escoamento utilizado será de  $f_{yk} = 240$  MPa.

Figura 26 - Ligação executada com parafusos.



Fonte: Aula de exemplos de ligações em estruturas de madeira, 2019.

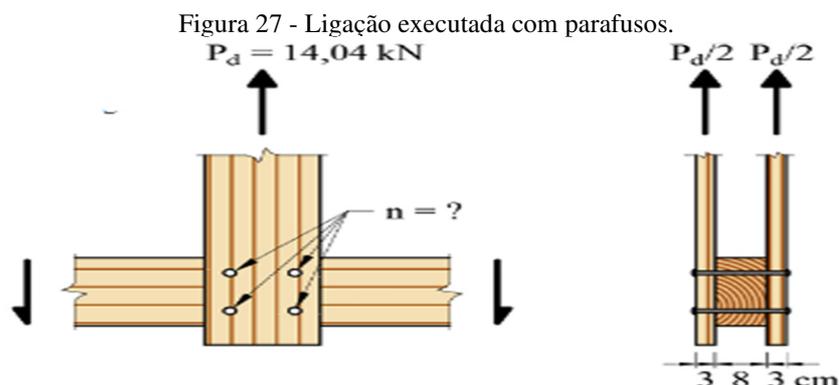
a) Nesse exemplo a resistência de embutimento a ser considerada é a perpendicular às fibras, portanto, utilizou-se a equação 4 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{\text{NBR}} = 2,5$  e  $\beta_{\text{lim(NBR)}} = 7,488$ . Assim, o modo de ruína que ocorre é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência de cada pino (calculado com a equação 9) foi de 1,556 kN/pino, e a resistência da ligação considerando dois planos de corte é de 3,12 kN. Desse modo, considerando o valor de

força da reação de apoio, a quantidade de parafusos com diâmetro de 16 mm necessária para a ligação é de 4 unidades.

b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor parâmetro é de  $\beta_{\text{euro5}} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Utilizando a função 'atingir meta' do Excel, foi possível encontrar um valor de densidade característica de 123,577 kg/m<sup>3</sup> referente ao valor de resistência de embutimento de 8,51 MPa. A resistência individual de cada pino (calculado com as equações 29 e 17) é 1,880 kN/pino, e a resistência da ligação considerando dois planos de corte é de 3,760 kN. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de parafusos encontrada pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 4 parafusos, mesma quantidade encontrada pela norma brasileira.

### 3.5. Exemplo 5: Ligação entre peças de madeira com seção composta conectadas por parafusos

Uma ligação entre uma peça de madeira de seção retangular de 80 mm de espessura e uma seção composta por duas peças retangulares de madeira de 30 mm de espessura é conectada por parafusos de aço com tensão de escoamento no valor de  $f_{yk} = 240$  MPa. A madeira é conífera de classe C30, tem como classe de umidade 1 e carregamento de longa duração. Nesse exemplo foi determinada a quantidade de parafusos para a ligação considerando ambas as formulações das diferentes normas.



Fonte: Apostila de exercícios de estruturas de madeira.

a) A resistência de embutimento a ser considerada nessa ligação é a perpendicular às fibras, portanto, utilizou-se a equação 4 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{\text{NBR}} = 2,40$  e  $\beta_{\text{lim(NBR)}} = 13,004$ . O modo de ruína que ocorre é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência da ligação

em cada plano corte (calculado com a equação 9) é de 0,756 kN/plano de corte. Desse modo, considerando a força solicitante que age em cada face de corte, como mostra a figura 27, a quantidade de parafusos com diâmetro de 12,7 mm necessária para a ligação é de 10 unidades.

b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor do parâmetro é de  $\beta_{\text{euro5}} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Nesse exemplo foi utilizada a função ‘atingir meta’ do Excel, para encontrar um valor de densidade característica de 98,567 kg/m<sup>3</sup> referente ao valor de resistência de embutimento de 7,06 MPa. A resistência individual de cada plano de corte (calculada com as equações 29 e 17) é 0,995 kN/plano de corte/pino. Desse modo, a quantidade de parafusos encontrada pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 8 unidades, isto é, são necessários 2 parafusos a menos em relação a quantidade encontrada pela norma brasileira.

### 3.6. Exemplo 6: Ligação entre uma viga e uma mão-francesa conectadas por parafusos

Uma ligação entre uma viga de seção retangular de 12 cm x 30 cm e uma mão-francesa de seção composta por duas peças retangulares de madeira de 6 cm x 16 cm, inclinada de 30° em relação ao eixo da viga, é conectada por parafusos de 10 mm de diâmetro. A madeira é de classe C40, com uma reação de apoio de 11 kN na direção inclinada, como ilustra a figura 28, e com o valor do coeficiente  $k_{\text{mod}} = 0,56$ . E por se tratar de parafuso, o valor de tensão de escoamento utilizado será de  $f_{yk} = 240$  MPa. O exemplo tem como objetivo a determinação da quantidade necessária de parafusos para a ligação considerando ambas as formulações das diferentes normas.



Fonte: Aula de exemplos de ligações em estruturas de madeira, 2019.

a) Nesse exemplo, a resistência de embutimento a ser considerada é a inclinada entre o esforço solicitante e as fibras, portanto, utilizou-se a equação 5 para o cálculo da resistência de

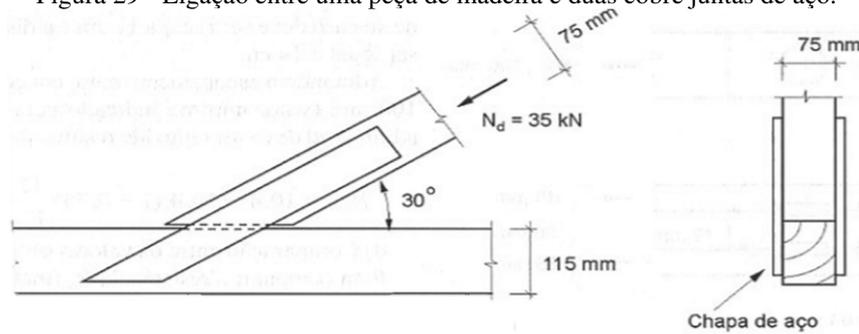
embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{NBR} = 6$  e  $\beta_{lim(NBR)} = 5,187$ . O modo de ruína que ocorre é a flexão do pino, logo o valor de resistência de cada pino (calculado com a equação 10) foi de 2,629 kN/parafuso, e a resistência da ligação considerando a quantidade de planos de corte é de 5,258 kN. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de parafusos com diâmetro de 10 mm necessária para a ligação é de 3 unidades.

b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor do parâmetro é de  $\beta_{euro5} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Nesse exemplo, assim como no anterior, foi dada somente a classe de resistência, sendo assim foi utilizado o mesmo método para encontrar o valor de densidade característica de 270,396 kg/m<sup>3</sup> referente ao valor de resistência de embutimento de 17,74 MPa. A resistência individual de cada pino logo o valor de resistência de cada pino (calculada com as equações 29 e 17) é 1,626 kN/parafuso, e a resistência da ligação considerando a quantidade de planos de corte é de 3,251 kN. O número de parafusos encontrado pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 5 unidades, isto é, são necessários 2 parafusos a mais em relação a quantidade encontrada pela norma brasileira.

### **3.7. Exemplo 7: Ligação entre uma peça de madeira e uma chapa de aço**

Uma ligação entre uma peça retangular de madeira com 75 mm de espessura e uma seção composta por duas cobre-junta retangular de aço com 37,5 mm de espessura, inclinada 30° em relação ao eixo da peça de madeira, é conectada por parafusos de 16 mm de diâmetro, com tensão de escoamento no valor de  $f_{yk} = 240$  MPa. A madeira é de espécie Ipê de segunda categoria e com classe de umidade 3, possui uma força de cálculo de 35 kN na direção inclinada, com carga de longa duração. Para a ligação, foi determinada a quantidade necessária de parafusos considerando ambas as formulações das diferentes normas.

Figura 29 - Ligação entre uma peça de madeira e duas cobre juntas de aço.



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2003.

a) Nesse exemplo, a resistência de embutimento a ser considerada é a inclinada entre o esforço solicitante e as fibras, portanto, utilizou-se a equação 5 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{NBR} = 2,344$  e  $\beta_{lim(NBR)} = 5,309$ . O modo de ruína que ocorre é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência de cada pino (calculado com a Equação 9) foi de 2,902 kN/pino, e a resistência da ligação considerando os dois planos de corte é de 5,804 kN. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de parafusos com diâmetro de 16 mm necessária para a ligação é de 7 unidades.

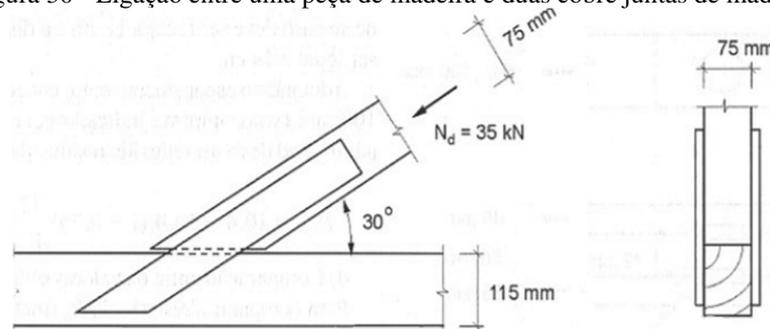
b) Pelo método de cálculo da norma europeia o parâmetro  $\beta_{euro5}$ , para conexões entre peça de materiais diferentes, painel-madeira, é definido através da divisão entre os valores de resistência de embutimento dos membros, assim,  $\beta_{euro5} = 1,148$ . Foi utilizada a função 'atingir meta' do Excel para encontrar o valor de densidade característica de 282,044 kg/m<sup>3</sup> referente ao valor de resistência de embutimento de 16,93 MPa. A resistência individual de cada pino (calculado com as equações 29 e 17) é 2,034 kN/pino, e a resistência da ligação considerando a quantidade de planos de corte é de 4,069 kN. O número de parafusos encontrado pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 9 unidades, isto é, são necessários 2 parafusos a mais em relação a quantidade calculada pela norma brasileira.

### 3.8. Exemplo 8: Ligação entre peças de madeira

Uma ligação entre uma peça retangular de madeira com 75 mm de espessura e uma seção composta por duas cobres-junta retangular de madeira com 30 mm de espessura, inclinada 30° em relação ao eixo da peça de madeira, terá duas possibilidades de ligação: por parafusos de 16 mm de diâmetro e por pregos de 5 mm. A madeira é de espécie Ipê de segunda categoria e classe de umidade 3, com uma força de cálculo de 35 kN na direção inclinada, decorre de uma

carga de longa duração. Para a ligação foi determinada a quantidade necessária de parafusos e pregos considerando ambas as formulações das diferentes normas. Para o parafuso e prego, os valores de tensão de escoamento utilizados foram de  $f_{yk} = 240 \text{ MPa}$  e  $f_{yk} = 600 \text{ MPa}$ , respectivamente.

Figura 30 - Ligação entre uma peça de madeira e duas cobre juntas de madeira.



Fonte: Adaptado de PFEIL e PFEIL, 2003.

a) Nesse exemplo, a resistência de embutimento a ser considerada é a inclinada entre o esforço solicitante e as fibras, portanto, utilizou-se a equação 5 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros para parafuso são:  $\beta_{NBR} = 1,875$  e  $\beta_{lim(NBR)} = 5,310$ . Assim, o modo de ruína que ocorre é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência de cada pino (calculado com a equação 9) foi de 2,322 kN/pino, e a resistência da ligação considerando os dois planos de corte é de 4,643 kN. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de parafusos com diâmetro de 16 mm necessária para a ligação é de 8. E para prego, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{NBR} = 6$  e  $\beta_{lim(NBR)} = 7,589$ . Assim, o modo de ruína que ocorre é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência de cada pino (calculado com a equação 9) foi de 0,888 kN/pino, e a resistência da ligação considerando os dois planos de corte é de 1,776 kN. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de pregos com diâmetro de 5 mm necessária para a ligação é de 20 unidades.

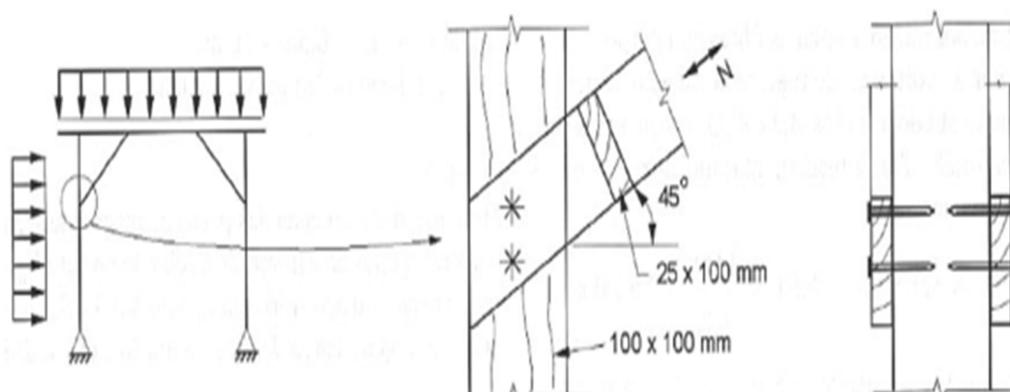
b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor do parâmetro é de  $\beta_{euro5} = 1$  para parafuso, por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Para o parafuso, foi utilizada a função 'atingir meta' do Excel para encontrar o valor de densidade característica de 282,044 kg/m<sup>3</sup> referente ao valor de resistência de embutimento de 16,93 MPa. A resistência individual de cada pino (calculada com as equações 29 e 17) é 1,983 kN/pino, e a resistência da ligação considerando a quantidade de planos de corte é de 3,966 kN. A quantidade

de parafusos encontrada pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 9 unidades, isto é, é necessário 1 parafuso a mais em relação a quantidade encontrada pela norma brasileira. E para prego, o valor do parâmetro é de  $\beta_{\text{euro5}} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Como nesse exemplo foi dado a espécie da madeira, para prego, a densidade característica de  $1068 \text{ kg/m}^3$  utilizada foi a disponibilizada pela Tabela E.1 do anexo E da NBR 7190 referente aos valores médios de espécies de madeiras dicotiledôneas. A resistência individual de cada pino (calculada com as equações 29 e 17) é  $1,216 \text{ kN/pino}$ , e a resistência da ligação considerando a quantidade de planos de corte é de  $2,432 \text{ kN}$ . A quantidade de pregos encontrada pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 15 unidades, isto é, são necessários 5 pregos a menos em relação a quantidade encontrada pela norma brasileira.

### 3.9. Exemplo 9: Ligação em um pórtico de madeira

Um pórtico de madeira está sujeito a cargas permanentes e carga de vento de tal maneira que os esforços axiais atuando em uma mão-francesa (peça inclinada) obtidos na análise estrutural foram:  $N_g = -6 \text{ kN}$  (compressão) e  $N_q = +9 \text{ kN}$  (tração). Para a ligação foi determinada a quantidade de pregos da mão-francesa no pilar com um esforço axial crítico de projeto, considerando ambas as formulações das diferentes normas. Sabendo que a madeira é de espécie Maçaranduba de 2ª categoria. Foi adotada a carga de longa duração e classe de umidade 2.

Figura 31 - Pórtico de madeira.



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2003.

a) Nesse exemplo, a resistência de embutimento a ser considerada é a inclinada entre o esforço solicitante e as fibras, portanto, utilizou-se a equação 5 para o cálculo da resistência de embutimento. Pelo método de cálculo da norma brasileira, os valores dos parâmetros são:  $\beta_{\text{NBR}}$

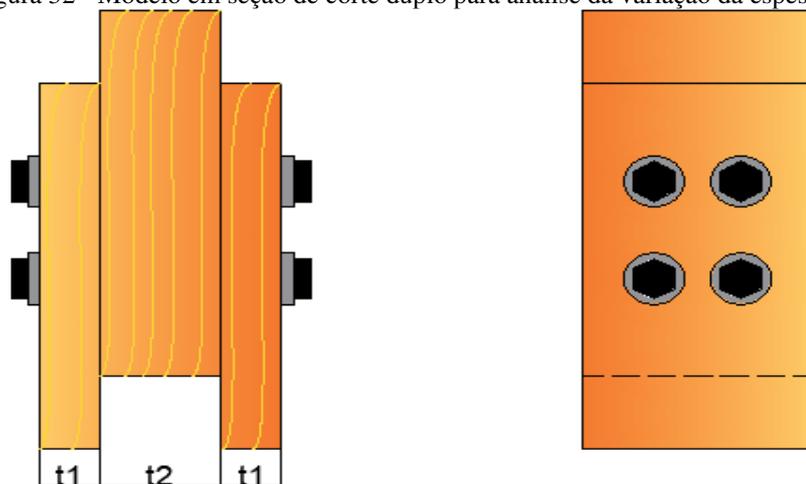
= 5,7 e  $\beta_{lim(NBR)} = 6,9$ . O modo de ruína que ocorre é o embutimento da madeira, logo o valor de resistência da ligação em cada plano corte é de 0,783 kN/pino. Desse modo, considerando a força solicitante, a quantidade de pregos com diâmetro de 4,4 mm necessária para a ligação é 12 unidades.

b) Pelo método de cálculo da norma europeia o valor do parâmetro é de  $\beta_{euro5} = 1$ , por se tratar de uma conexão entre peças de mesmo material (madeira-madeira). Em posse da resistência de embutimento característica no ângulo e utilizando a função ‘atingir meta’ do Excel, foi possível encontrar um valor de densidade característica de 375 kg/m<sup>3</sup> referente ao valor de resistência de embutimento de 24,92 MPa. A resistência individual de cada pino (calculada com as equações 29 e 17) é 0,571 kN/pino. O número de parafusos encontrado pelo método de cálculo da norma europeia, nesse caso, foi de 15 unidades, isto é, 3 parafusos a mais em relação a quantidade encontrada pela norma brasileira.

### 3.10. Exemplo 10: Análise da variação da espessura convencional

a) Foi realizado também um estudo com relação a influência da variação de espessura das peças de madeira na resistência da ligação, tanto para a norma europeia como para a norma brasileira. Para esse teste, a ligação considerada inicialmente foi de corte duplo, considerando quatro parafusos de 12 mm de diâmetro dispostos em dois alinhamentos, como mostra a figura 32.

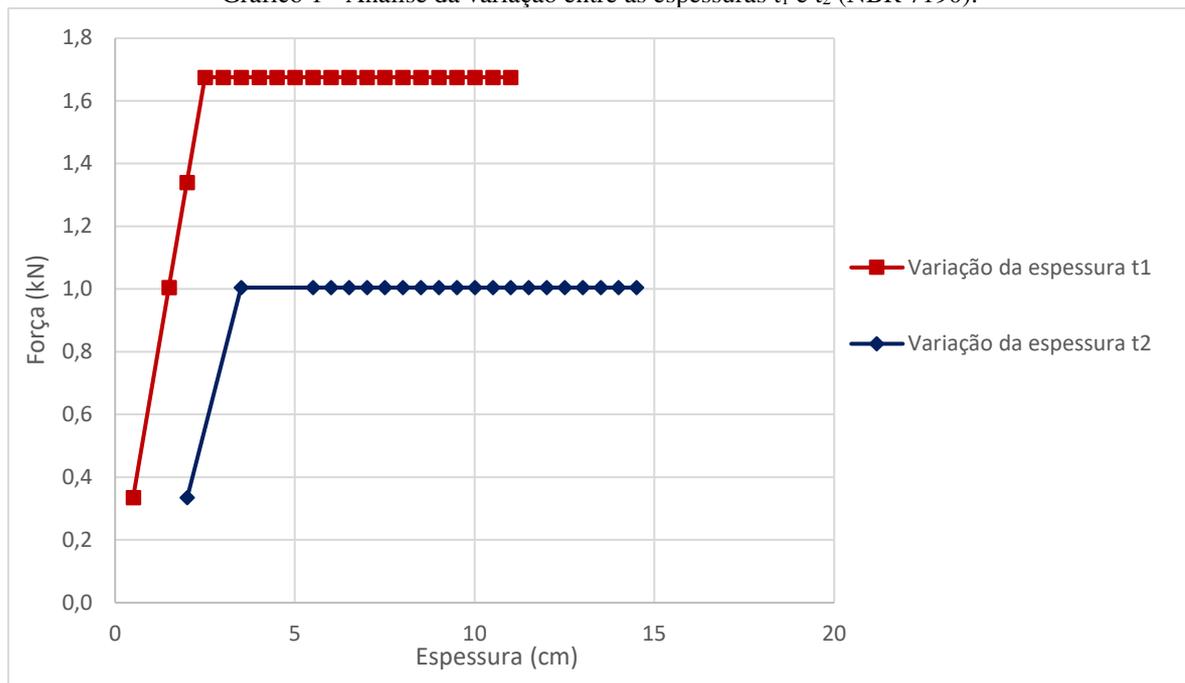
Figura 32 - Modelo em seção de corte duplo para análise da variação da espessura.



Fonte: Adaptado de SILVA JÚNIOR, 2017.

Para avaliar como variam os valores de resistência da ligação em função das espessuras, foram calculadas as forças resistentes para peças com dimensões de espessura  $t_1$  e  $t_2$ , fixando-se uma destas dimensões e variando a outra de 0,5 cm, sendo primeiramente fixada a espessura  $t_2$  e analisada a influência de variação de  $t_1$ . Em seguida foi feito o processo de fixação da espessura  $t_1$ , com a variação das do valor de  $t_2$ . Os resultados obtidos considerando apenas a formulação da norma brasileira NBR 7190 são apresentados a seguir no gráfico 1.

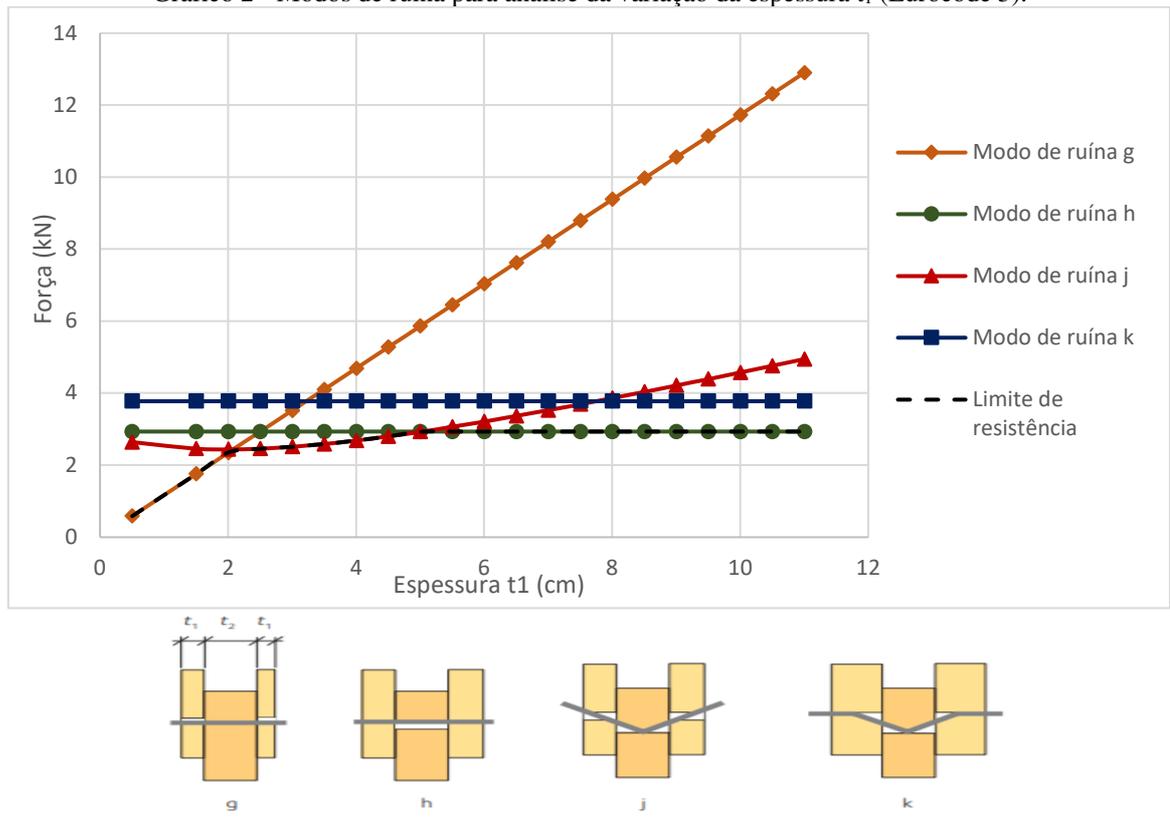
Gráfico 1 - Análise da variação entre as espessuras  $t_1$  e  $t_2$  (NBR 7190).



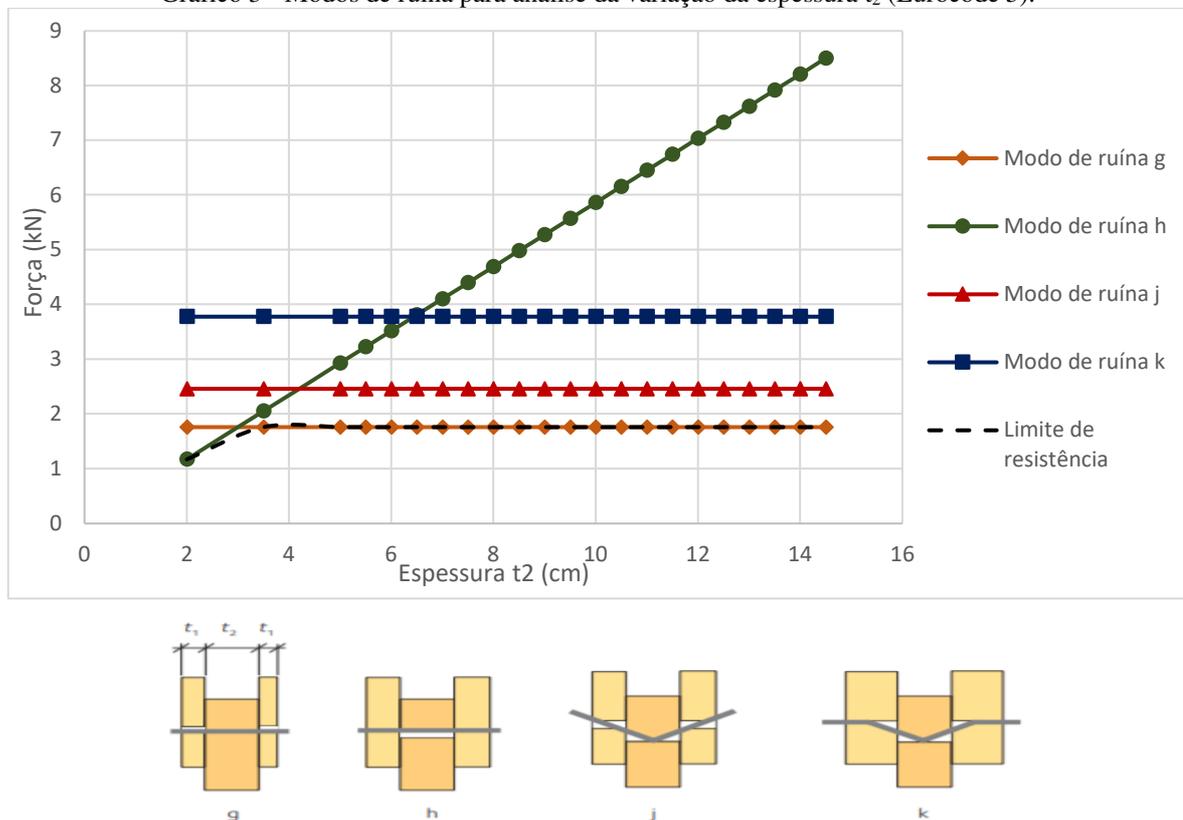
Fonte: Autora, 2021.

Como a norma brasileira possui apenas dois modos de ruína, embutimento da madeira e a flexão do pino, o comportamento do gráfico ficou restrito a apenas dois trechos característicos. Os trechos inclinados das curvas correspondem ao modo de ruína de embutimento da madeira, sendo a curva em vermelho correspondente a variação de  $t_1$  e a curva azul correspondente a variação de  $t_2$ .

A mesma variação foi analisada para a formulação contida no Eurocode. Para corte duplo de conexões do tipo madeira-madeira, a norma europeia possui quatro modos de ruína possíveis. Considerando mesmo procedimento inicial de fixação e variação das espessuras, foi possível obter-se dois gráficos, conforme representado nos gráficos 2 e 3 abaixo. Os gráficos estão contemplados com a representação dos modos de ruína disponibilizados pela norma europeia

Gráfico 2 - Modos de ruína para análise da variação da espessura  $t_1$  (Eurocode 5).

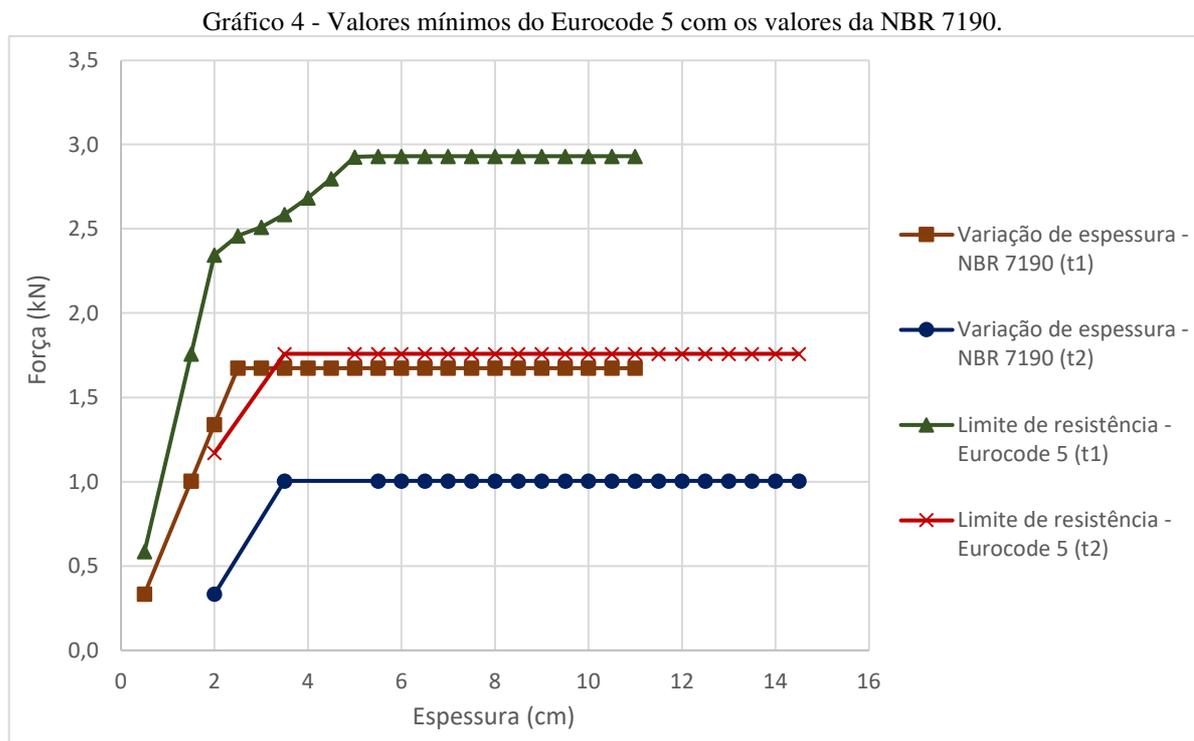
Fonte: Autora, 2021.

Gráfico 3 - Modos de ruína para análise da variação da espessura  $t_2$  (Eurocode 5).

Fonte: Autora, 2021.

Neste caso, para ambos os gráficos, 2 e 3, observam-se quatro curvas, uma para cada modo de ruína considerado pela norma europeia. A linha tracejada indica a limitação inferior, que corresponde a resistência da ligação de fato.

O gráfico 4 abaixo representa os valores mínimos obtidos com a metodologia da norma europeia juntamente com os valores referentes à norma brasileira, para facilitar a comparação entre os resultados.

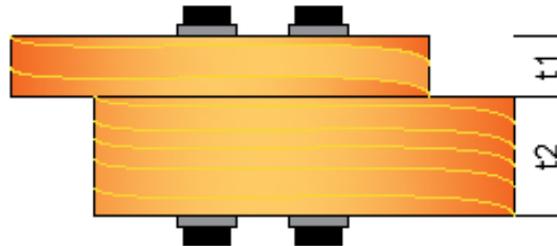


Fonte: Autora, 2021.

É possível observar que, apesar da diferença entre valores, justificada pela utilização de métodos de cálculo diferentes, percebe-se que as curvas em relação a variação das espessuras ficaram com um comportamento aproximado entre as normas brasileira e europeia, como mostra o gráfico 4.

b) Foi realizado também um estudo com relação a influência da variação de espessura das peças na resistência da ligação com corte simples, tanto para a norma europeia como para a norma brasileira. A ligação utilizada possui quatro parafusos de 12 mm de diâmetro, conforme ilustra a figura 33.

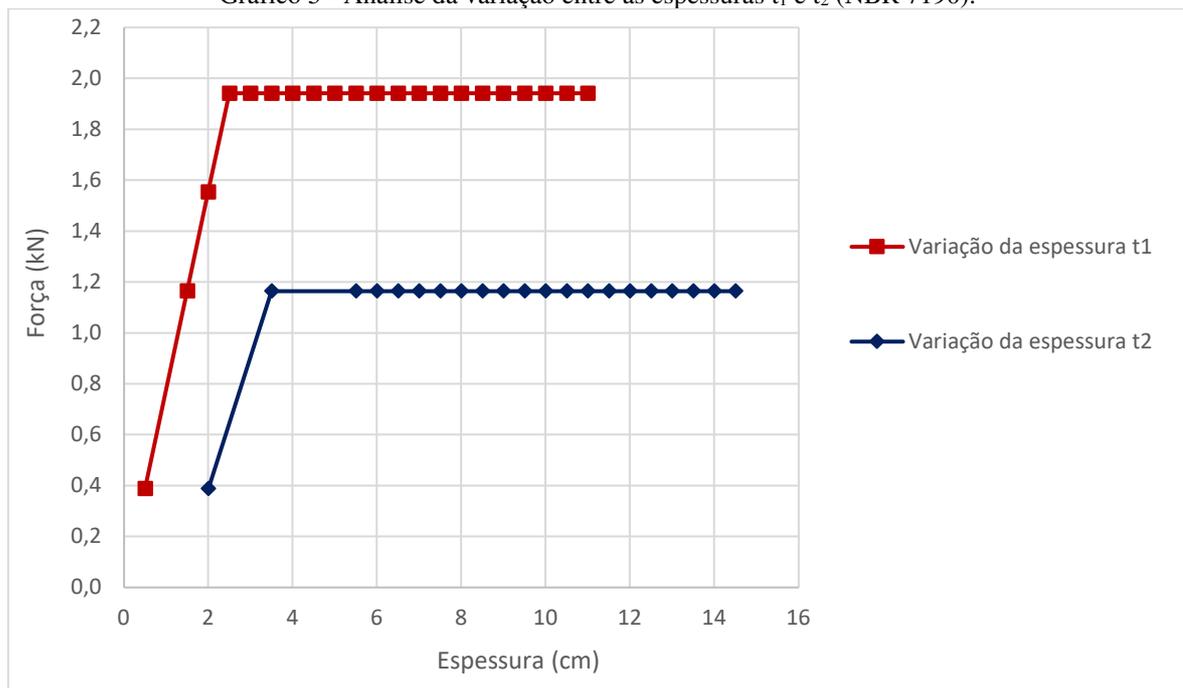
Figura 33 - Modelo em seção de corte simples para análise da variação da espessura.



Fonte: Adaptado de SILVA JÚNIOR, 2017.

Adotando-se o mesmo procedimento utilizado no exemplo de corte duplo, obteve-se um gráfico dos valores de resistência na ligação, variando as espessuras de 0,5 cm em 0,5 cm. Primeiramente a espessura  $t_1$  foi variada e  $t_2$  fixada, em seguida foi feito o processo inverso de fixação e variação das espessuras. Como a norma brasileira possui apenas dois modos de ruína, sendo o embutimento da madeira e a flexão do pino, o comportamento do gráfico ficou como mostra a gráfico 5, que manteve o comportamento anteriormente verificado.

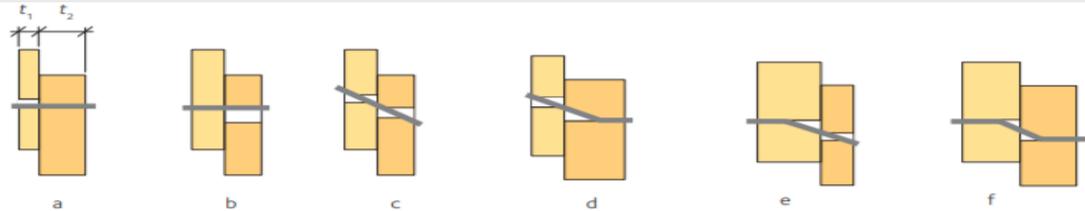
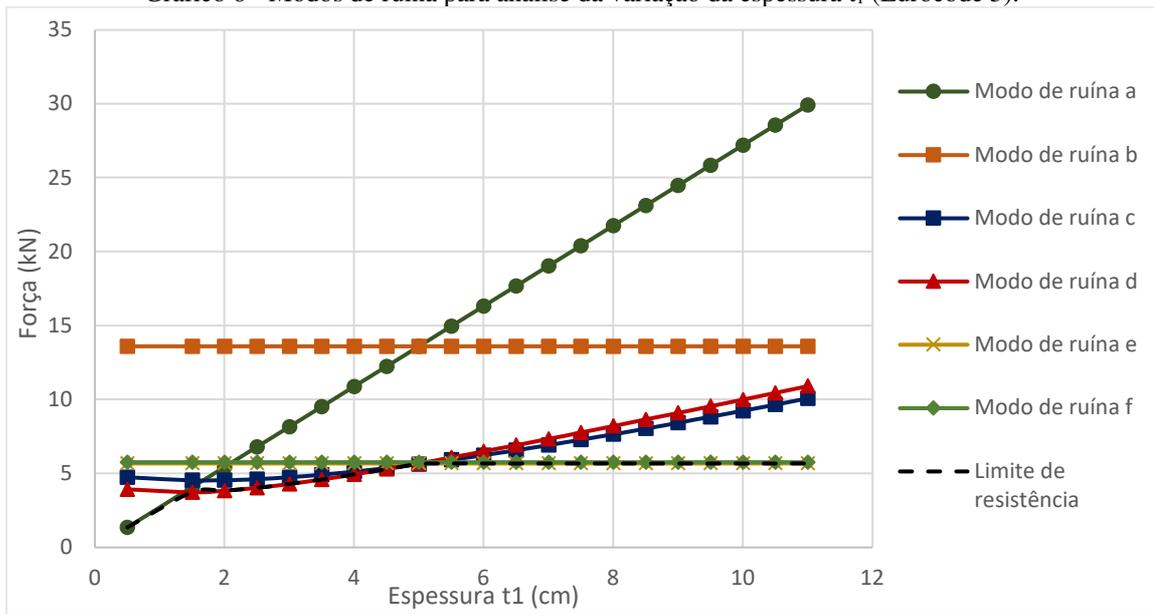
Gráfico 5 - Análise da variação entre as espessuras  $t_1$  e  $t_2$  (NBR 7190).



Fonte: Autora, 2021.

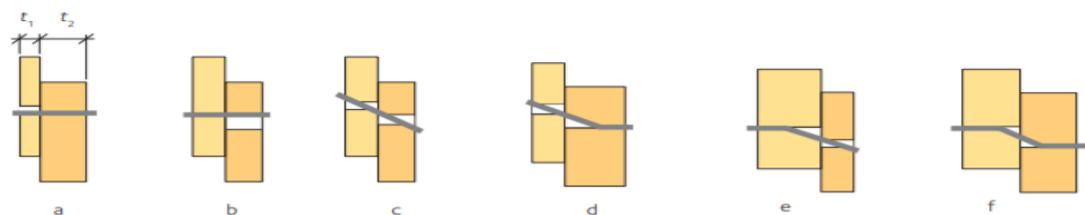
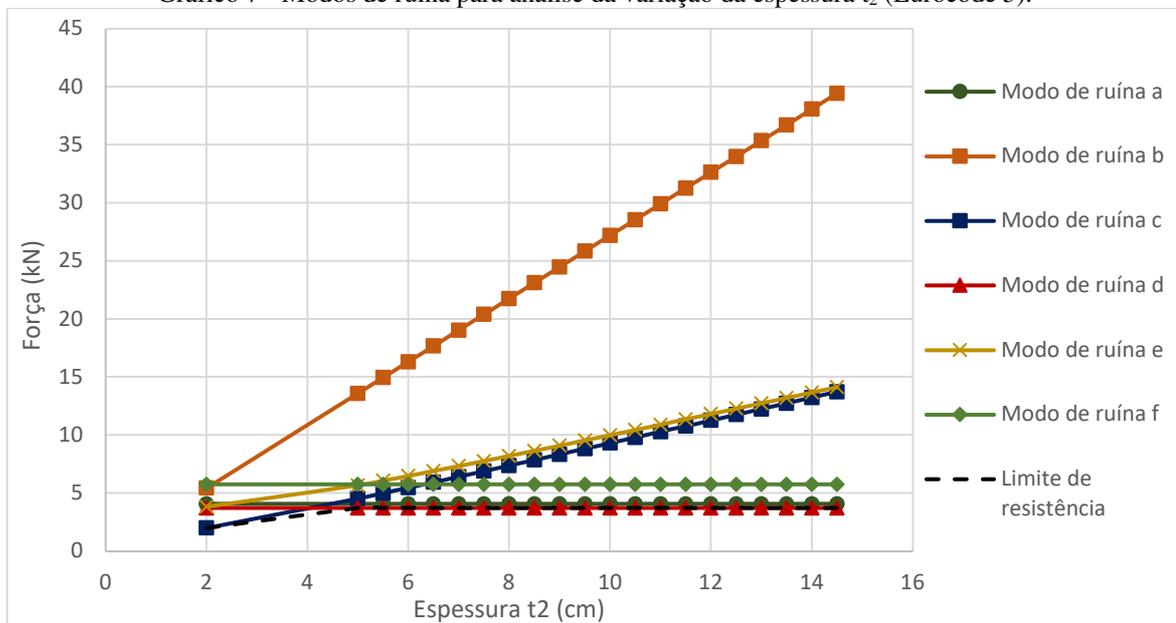
Para a análise de corte simples de conexões madeira-madeira, a norma europeia possui seis modos de ruína. Aplicando-se a variação das espessuras, de modo semelhante ao que foi feito para a norma brasileira, foi possível traçar os gráficos 6 e 7, representados abaixo. Os gráficos estão contemplados com a representação dos modos de ruína disponibilizados pela norma europeia.

Gráfico 6 - Modos de ruína para análise da variação da espessura  $t_1$  (Eurocode 5).



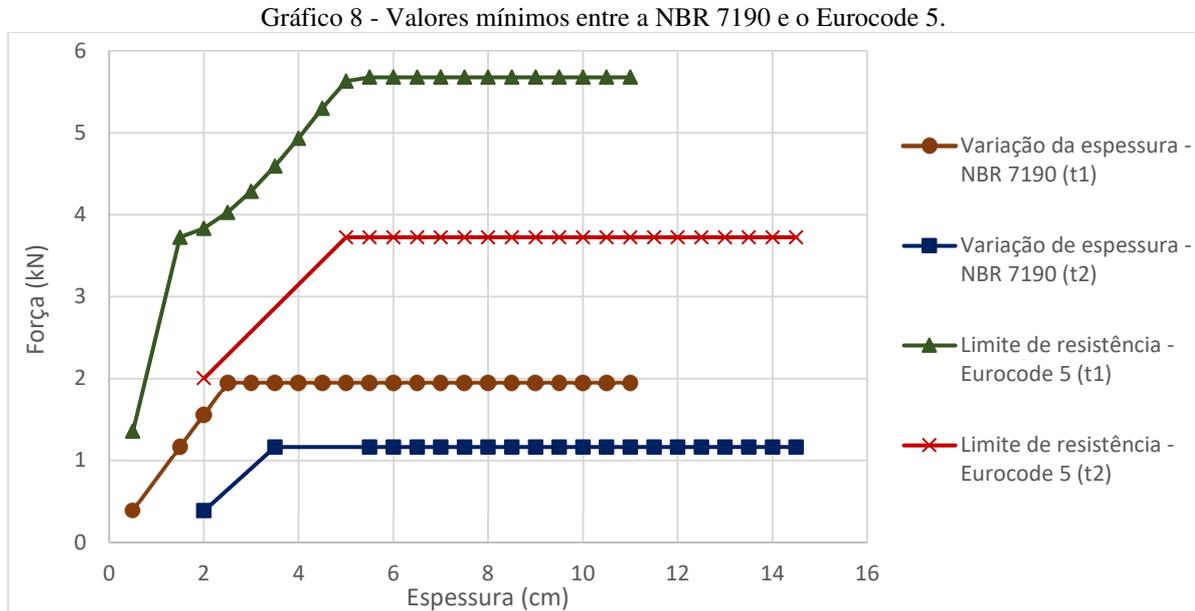
Fonte: Autora, 2021.

Gráfico 7 - Modos de ruína para análise da variação da espessura  $t_2$  (Eurocode 5).



Fonte: Autora, 2021.

O gráfico abaixo representa os valores mínimos da norma europeia junto com os valores referentes à norma brasileira.



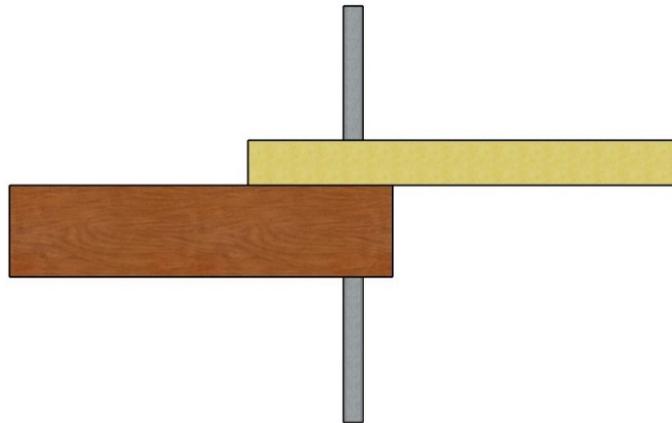
Fonte: Autora, 2021.

De maneira geral, percebe-se que mesmo utilizando métodos de cálculos e uma seção de corte diferentes, os resultados obtidos graficamente possuem um comportamento semelhante para ambas as normas, brasileira e europeia. Porém, os valores de resistência para a norma brasileira são sempre inferiores, o que nos leva a concluir que a NBR 7190 é mais conservadora em relação às ligações com pinos metálicos.

### 3.11. Exemplo 11: Análise em entre peças de madeira com espécies diferentes

Foi feito um estudo sobre ligação com peças de madeira de espécies diferentes. Nesse estudo, a ligação considerada foi de corte simples, considerando pregos com diâmetros variando dentre os valores disponibilizados pela tabela 1 do item 2.5.1, tabela essa que é definida pela NBR 7190 para variação do coeficiente  $\alpha_e$ . Foram consideradas espessuras hipotéticas de  $t_1 = 3$  cm e  $t_2 = 6$  cm, buscando-se uma relação em que uma peça tem o dobro de espessura da outra. As espécies utilizadas foram as de classe C14 e D70 da tabela 1 oriunda da EN 338, espécies estas que possuem, respectivamente, os valores mínimos e máximos de resistência da madeira. Para esse caso, o valor de tensão de escoamento utilizada para o material dos pinos metálicos foi de  $f_{yk} = 250$  MPa, e o valor do coeficiente  $k_{mod} = 0,56$ . Esse modelo hipotético é representado na Figura 34.

Figura 34 - Modelo de seção entre espécies de madeira diferentes.

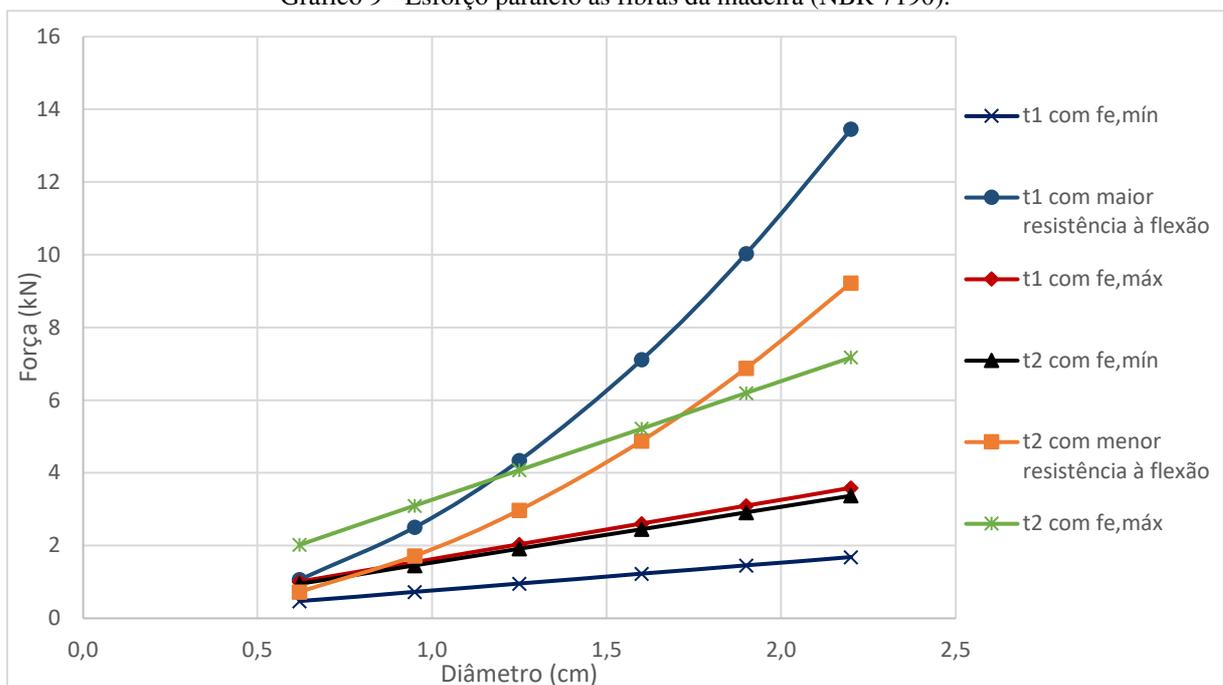


Fonte: Autora, 2021.

Por se tratar de um exemplo teste, os diâmetros citados no enunciado foram todos avaliados utilizando-se as equações da norma brasileira. Por questões práticas, utilizou-se apenas a faixa dos diâmetros de 0,62 cm a 2,2 cm, considerando que os diâmetros iguais ou superiores a 25 mm são pouco utilizados em construções correntes no Brasil.

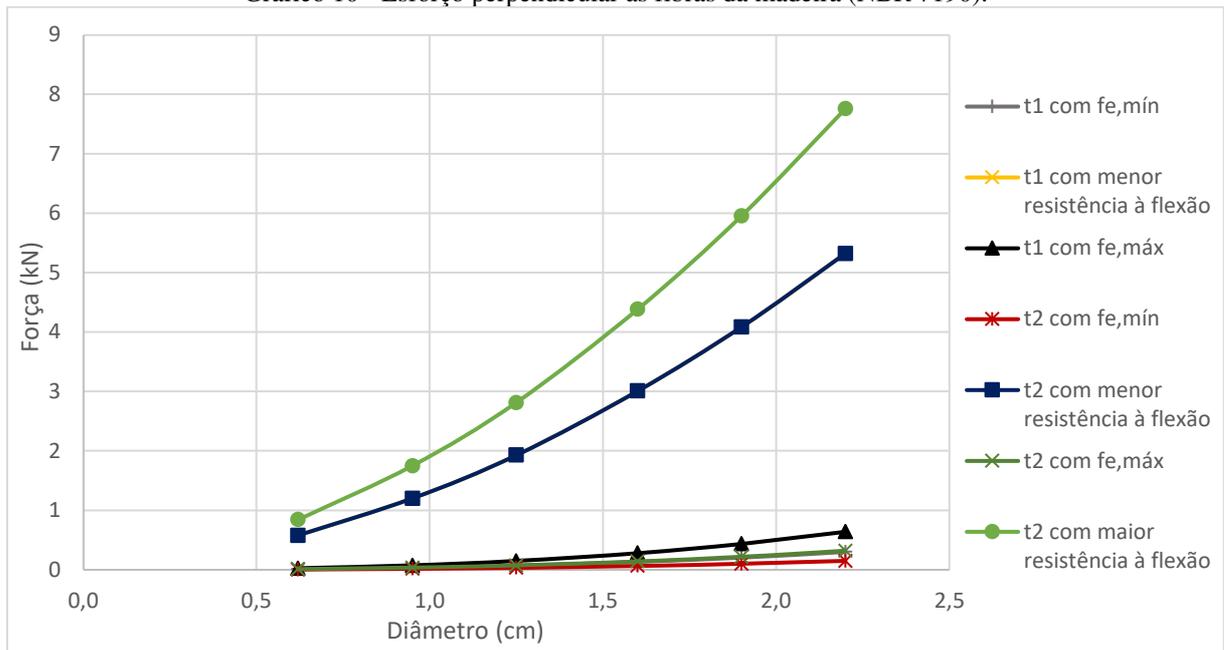
A seguir serão apresentados os gráficos 9 e 10 referentes à uma mesma situação, só que um considerando o embutimento paralelo e o outro o embutimento normal. Os dados desses gráficos são resultados obtidos através das formulações da norma brasileira.

Gráfico 9 - Esforço paralelo às fibras da madeira (NBR 7190).



Fonte: Autora, 2021.

Gráfico 10 - Esforço perpendicular às fibras da madeira (NBR 7190).

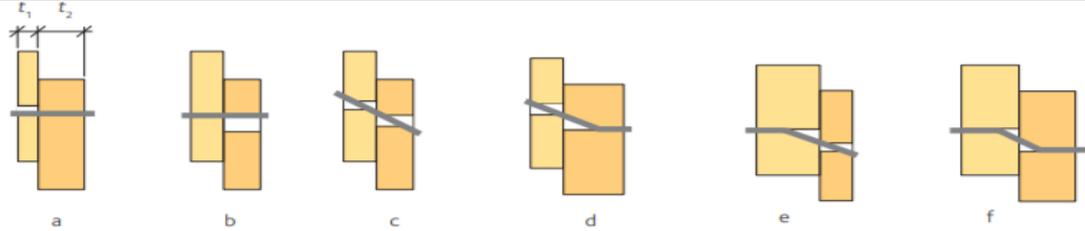
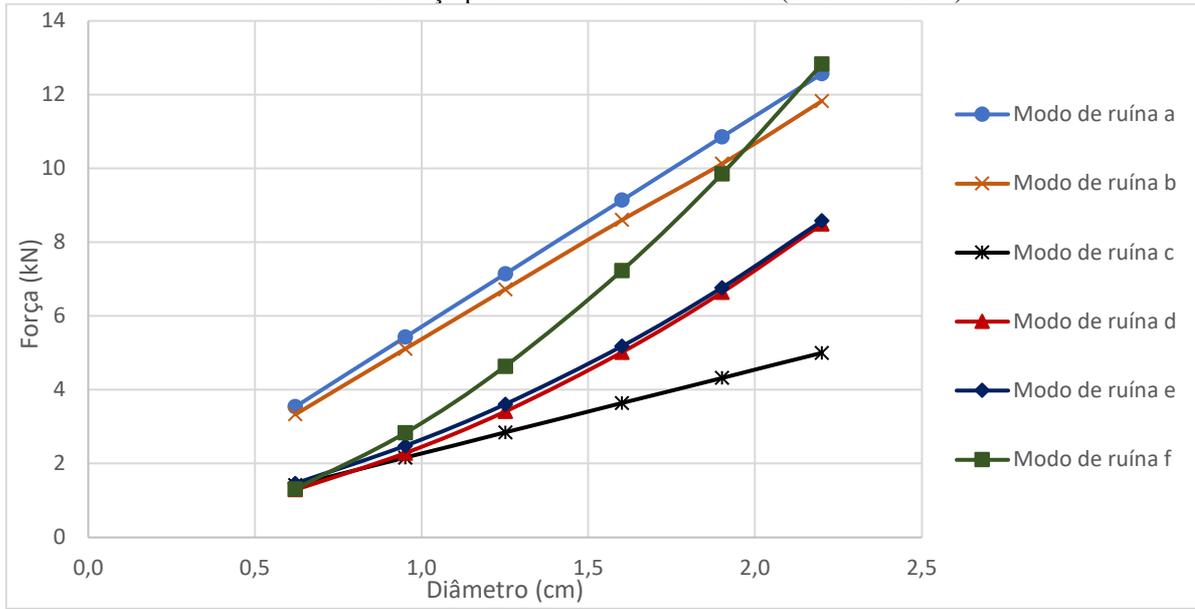


Fonte: Autora, 2021.

É importante ressaltar que para casos de ligações entre peças de madeiras com espécies diferentes, a NBR 7190 não aborda nada especificamente sobre essa questão. Então, para a obtenção dos resultados apresentados nos gráficos 9 e 10 acima, a ideia de cálculo foi utilizar as expressões para cada espessura  $t$ , ou seja, para esse teste desconsiderou-se os limites impostos pela norma brasileira a respeito do uso da espessura, como abordado no item 2.5.1.

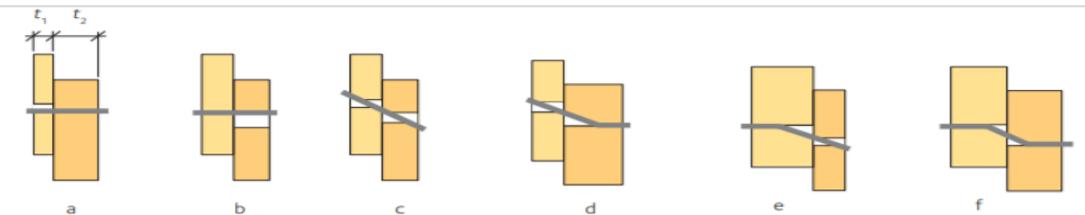
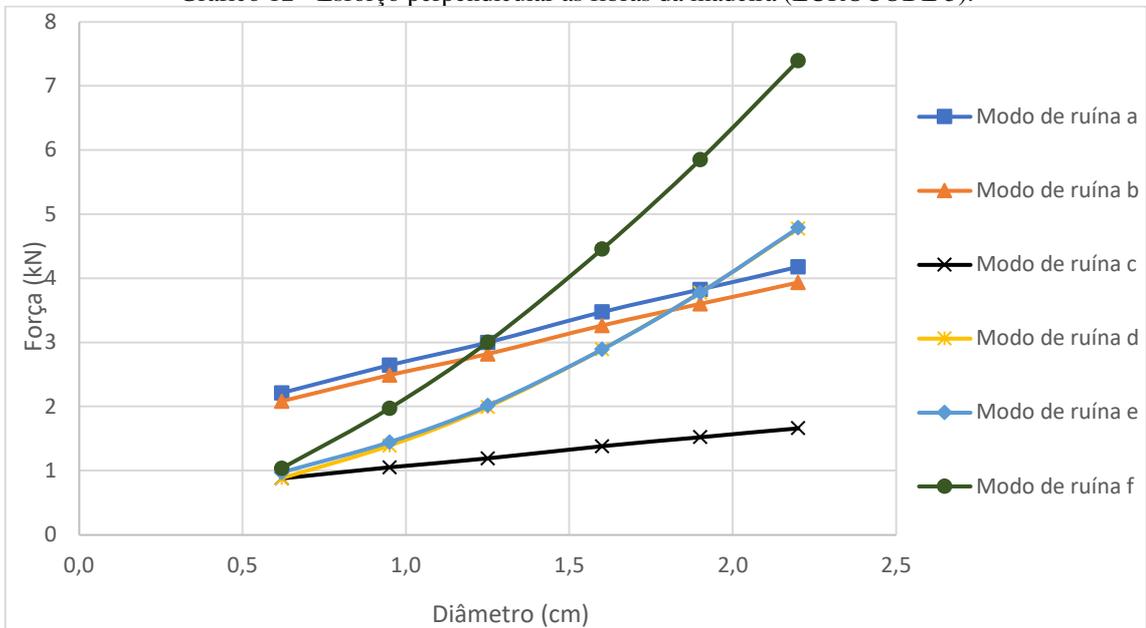
Ao contrário da norma brasileira, pelo o EUROCODE 5 é possível calcular peças de madeira com espécies diferentes. Sendo assim, partindo da mesma ideia da norma brasileira, serão apresentados os gráficos 11 e 12 com dados da resistência de embutimento paralela e da resistência de embutimento normal.

Gráfico 11 - Esforço paralelo às fibras da madeira (EUROCODE 5).



Fonte: Autora, 2021.

Gráfico 12 - Esforço perpendicular às fibras da madeira (EUROCODE 5).



Fonte: Autora, 2021.

Os resultados apresentados nos gráficos 11 e 12 referentes a norma europeia, são de acordo com cada modo de ruína intermediário, calculados para cada valor de diâmetro. Os gráficos estão contemplados com a representação dos modos de ruína disponibilizados pela norma europeia a fim de facilitar a sua leitura e interpretação.

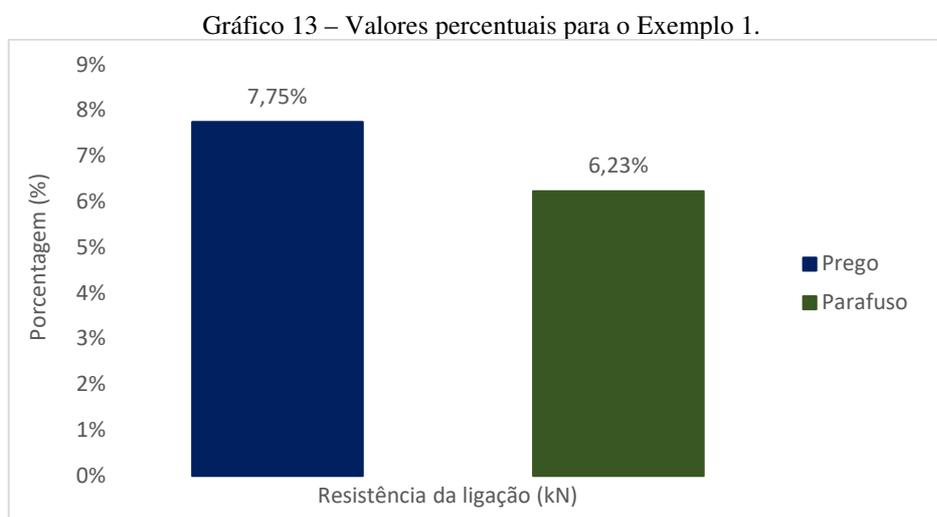
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentadas as interpretações e discussões dos resultados obtidos para os exemplos, com foco nos valores de resistência dos pinos, na resistência da ligação, e na quantidade de pinos necessário para cada uma das ligações analisadas, tanto pela NBR 7190:1997 quanto pelo EUROCODE 5:2004.

### 4.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO EXEMPLO 1

Observou-se que, em ambos os resultados obtidos pelas diferentes normas, o modo de ruína que ocorreu na ligação do exemplo 1 foi a flexão do pino. A melhor representação apresentada pela norma europeia desse modo de ruína é mostrada na figura 19 (f), onde percebe-se que o Eurocode 5 apresenta de forma mais precisa quando considera modos intermediários, enquanto a norma brasileira apenas diferencia esse modo do embutimento da madeira. Dessa forma, com a consideração da norma europeia é possível perceber que a flexão do pino, na verdade, ocorre de forma simultânea um esmagamento parcial da madeira nas peças que compõe a ligação.

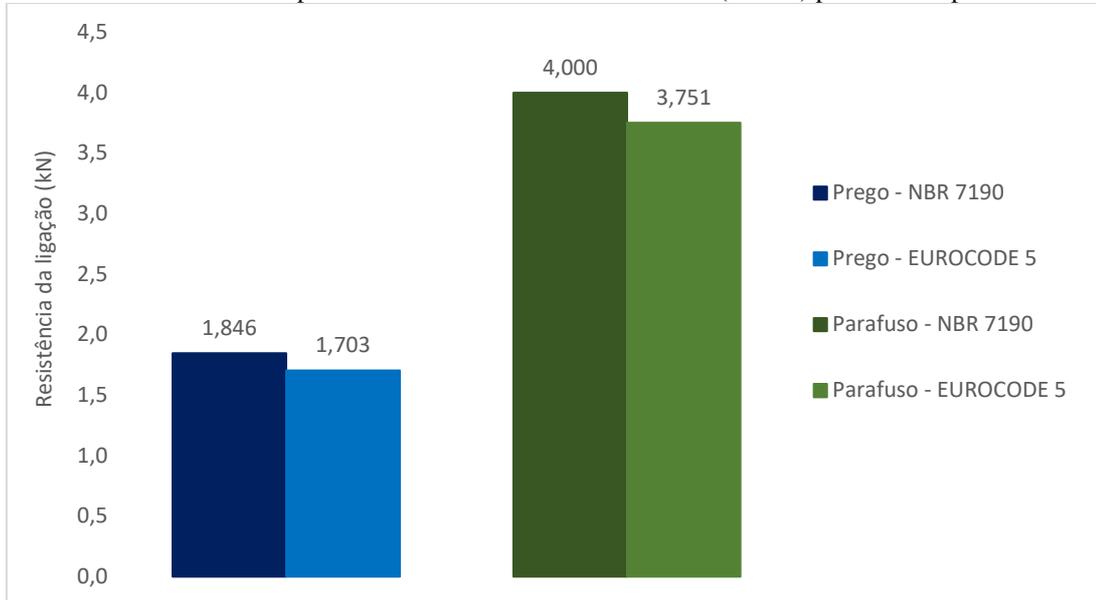
A seguir apresentam-se no gráfico 13, os valores obtidos de força resistente na ligação em termos de porcentagens entre as normas brasileira e europeia, tanto para prego e quanto para parafuso. Nesse caso, a diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens para os pregos ficou maior, sendo de 7,75% enquanto para os parafusos ficou a diferença foi de 6,23%.



Fonte: Autora, 2021.

O gráfico 14 apresenta os valores referentes a resistência da ligação. Percebe-se que a diferença entre os valores tanto para pregos quanto para parafusos mostrara-se pequena.

Gráfico 14 – Comparativo entre os valores de resistência (em kN) para o Exemplo 1.



Fonte: Autora, 2021.

De maneira geral, pode-se dizer que os principais fatores que contribuíram na pequena diferença entre os valores de resistência da ligação obtidos pelas duas normas, tanto para prego quanto parafuso foram:

- os diâmetros (o do prego é menor que o do parafuso),
- os valores de tensão de escoamento, que também são diferentes.

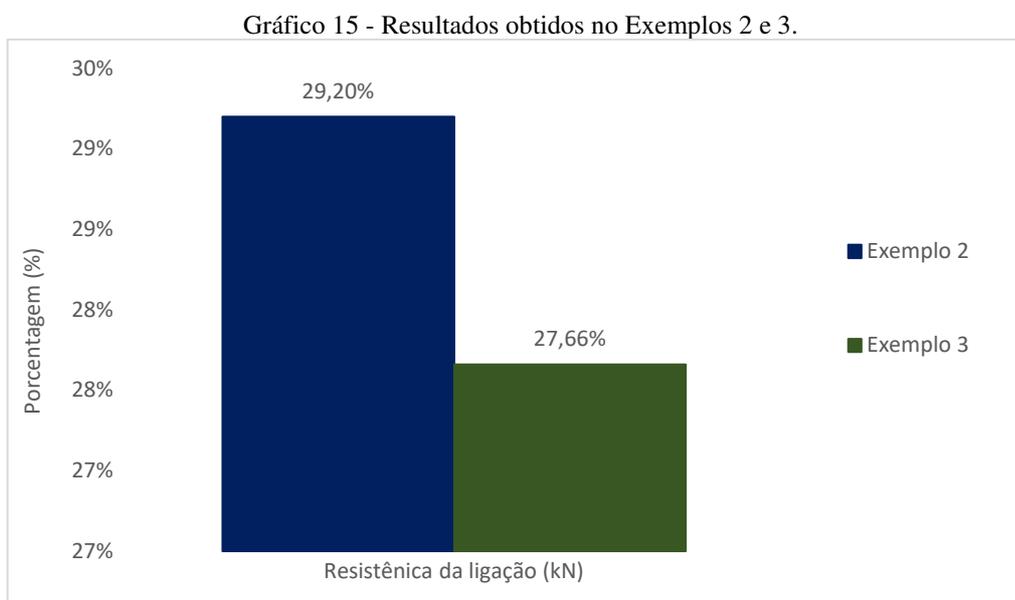
Observa-se também o fato de a norma europeia utilizar a densidade característica da madeira no cálculo da resistência de embutimento, pode interferir na diferença dos resultados.

#### 4.2. DISCUSSÕES DOS EXEMPLOS 2 E 3

Analisando os resultados obtidos no exemplo 2, assim como no exemplo anterior, a flexão do pino ocorre em ambos os casos com as considerações das diferentes normas. A diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens para o caso com pregos ficou em 29,20%. Para a quantidade de pregos necessários na ligação a diferença foi de 31,82%.

No exemplo 3, o modo de ruína que ocorre pelo método de cálculo da norma brasileira é o embutimento na madeira e ao analisar o modo de ruína pela norma europeia, percebe-se que, ao mesmo tempo em que ocorre a flexão do pino, as peças de madeira exterior e interior também sofrem algum esmagamento parcial, como mostra a figura 20 (k). Dessa forma, verifica-se que é possível obter-se uma análise mais aprofundada quando se tem mais opções de modos de ruptura. A diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens para pregos ficou 27,66%. Para a quantidade de parafusos necessários na ligação a diferença foi de 35%.

A seguir é apresentado o gráfico 15, com os dados porcentagens para melhor visualização dos resultados.



Fonte: Autora, 2021.

Em posse dos resultados dos dois exemplos, percebeu-se que, apesar de ambos terem o esforço no sentido paralelo às fibras, não era esperado que os resultados dessem iguais. O fato de ambos terem resultado em valores aproximados pode ser considerado como um ponto positivo em favor da norma brasileira. Ressalta-se que estes são dois exemplos muito distintos em relação aos dados e a seção de corte, pois um tem uma seção de corte simples e o outro seção de corte duplo. Assim como no exemplo 1, o pino conector entre as peças é diferente, sendo que no exemplo 2 são utilizados pregos e no exemplo 3 são utilizados parafusos, e ambos têm valores de tensão de escoamento diferentes. Outro ponto que pode ser considerado nessa análise é que a peça de madeira da ligação do exemplo 3 é mais espessa que a peça da ligação

do exemplo 2. Sendo estes fatores que interferem no valor de resistência de embutimento da madeira, conseqüentemente afetam também a resistência da ligação.

A respeito da diferença de porcentagens entre as quantidades de pinos entre ambas as normas, vale ressaltar que o exemplo 2 o valor de força solicitante é menor que o valor de força solicitante do exemplo 3, sendo que este dado interfere diretamente no número de pinos em cada caso. Sendo assim, percebe-se que mesmo com as divergências de dados e seção de corte, os valores ainda ficaram próximos quando comparados entre si.

#### 4.3. DISCUSSÕES DOS EXEMPLOS 4 E 5

Ao contrário dos exemplos discutidos até aqui, os exemplos 4 e 5 possuem a mesma seção de corte. Observou-se que em ambos os resultados obtidos pelas diferentes normas, o modo de ruína ocorrido na peça foi o embutimento da madeira. Para melhor visualização, a figura 20 (j) traz a representação desse modo de ruína.

No exemplo 4 o valor de resistência da ligação entre as diferentes normas, expresso em porcentagem foi de 20,51%. Nesse exemplo foi obtido a mesma quantidade de parafusos para ambas as normas. No exemplo 5, a porcentagem do valor de resistência da ligação entre as normas foi de 31,61%. Para a quantidade de parafusos necessários na ligação a diferença na resistência foi de 20%. A seguir será apresentado o gráfico 16 com os dados em porcentagens para melhor visualização.



Fonte: Autora, 2021.

Analisando o exemplo 4, percebeu-se que apesar da utilização de diferentes formulações, do uso de dados como a densidade característica da madeira e da diferença nos valores de resistência da ligação, o número de parafusos encontrados pelos dois casos foi o mesmo. A diferença só é percebida quando analisamos os Algarismos Significativos em cada caso, sendo assim, é notável que o arredondamento, nesse caso, contribuiu para não ajuste da quantidade de pinos. No exemplo 5, observou-se que o valor em porcentagem de resistência da ligação ficou na ordem de 30% enquanto o exemplo 4 foi de 20%, resultando assim em uma diferença de aproximadamente 11%. Essa diferença pode ter sido causada principalmente por conta dos valores de densidade da madeira, pois a densidade adotada no exemplo 4 é maior do que a que foi considerada para o exemplo 5.

#### **4.4. DISCUSSÕES DOS EXEMPLOS 6, 7, 8 E 9**

Primeiramente serão comentados os resultados do exemplo 6, por ter sido o único com o modo de ruína a flexão do pino. Em seguida serão comentados os resultados do exemplo 7 por ter sido o único com ligação entre uma peça de madeira e uma chapa de aço. E por último, serão feitas as considerações a respeito dos exemplos 8 e 9.

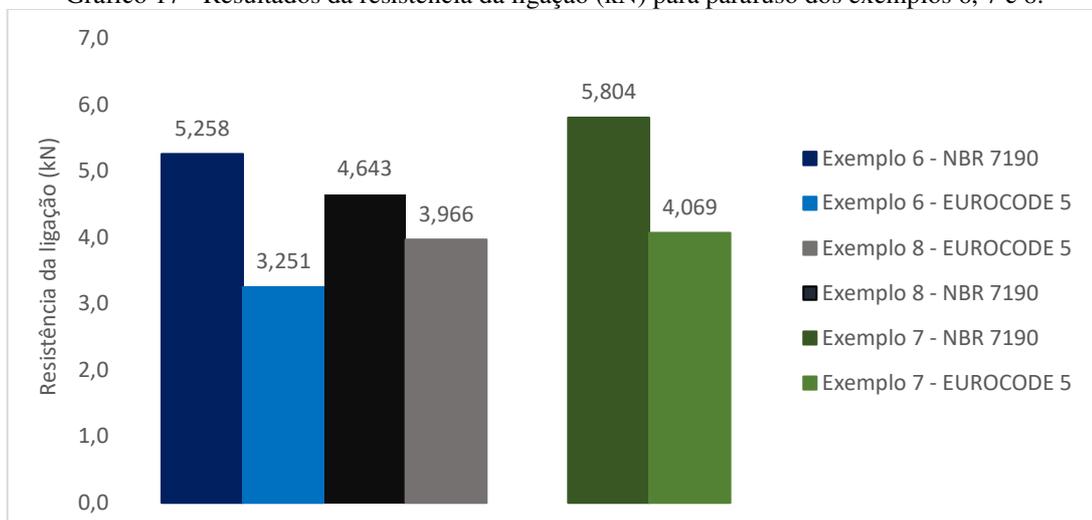
Em relação aos resultados obtidos no exemplo 6, percebeu-se que, diferente dos demais exemplos abordados nesse item, o modo de ruína que ocorreu nessa ligação foi o da flexão do pino para ambas as normas. De acordo com o modo encontrado pelos critérios da norma europeia, percebeu-se que ao mesmo tempo em que ocorre a flexão do pino, as peças de madeira também sofrem algum esmagamento parcial, como mostra a figura 20 (k). A diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens foi de 23,66%. Para a diferença na quantidade de parafusos necessários, a norma brasileira precisou de dois parafusos a menos em comparação com a aplicação dos critérios da norma europeia.

No exemplo 7, o modo de ruína que ocorreu em ambos os casos foi o embutimento na madeira, mas no caso da consideração dos critérios da norma europeia, de acordo com a figura 21 (k), percebeu-se que o pino também sofreu uma flexão em dois pontos ao longo do seu comprimento. A diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens foi de 29,89%. Para a diferença na quantidade de parafusos necessários, a norma brasileira resultou em uma quantidade de dois parafusos a menos quando comparada com a norma europeia. Logo, a norma europeia foi mais conservadora para esse caso.

O exemplo 8 é um caso semelhante ao exemplo 1 no qual foi dimensionado considerando duas possibilidades, com parafusos e com pregos. O modo de ruína que ocorreu em ambos os casos para as diferentes normas, adotando parafusos, foi o embutimento na madeira. Mas observa-se que, no caso da norma europeia, de acordo com a figura 20 (j), o pino sofreu também uma flexão parcial. A diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens para parafusos foi de 14,58%. Em relação à diferença na quantidade de parafusos necessários, a norma brasileira foi menos conservadora pois resultou em uma quantidade de um parafuso a menos do que a norma europeia. Adotando pregos, o modo de ruína também foi o embutimento na madeira, e conforme a figura 20 (k) o pino também sofreu uma flexão parcial ao longo do seu comprimento. A diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens para parafusos foi de 36,94%. Para a diferença na quantidade de pregos necessários, a norma europeia foi mais conservadora pois resultou em uma quantidade de cinco pregos a menos do que a norma brasileira.

O modo de ruína ocorrido no exemplo 9 foi o embutimento na madeira, o mesmo para a consideração das duas normas. Da mesma forma que aconteceu no exemplo 8, adotando parafusos, e de acordo com a figura 20 (j), o pino também sofreu uma flexão parcial ao longo do seu comprimento. A diferença no valor da resistência da ligação em termos de porcentagens para parafusos foi de 27,08%. Em relação à diferença na quantidade de pregos necessários, a norma brasileira foi menos conservadora pois precisou de três pregos a menos do que a norma europeia. A seguir é apresentado o gráfico 17 para melhor visualização dos resultados, com os dados das resistências das ligações em relação ao parafuso.

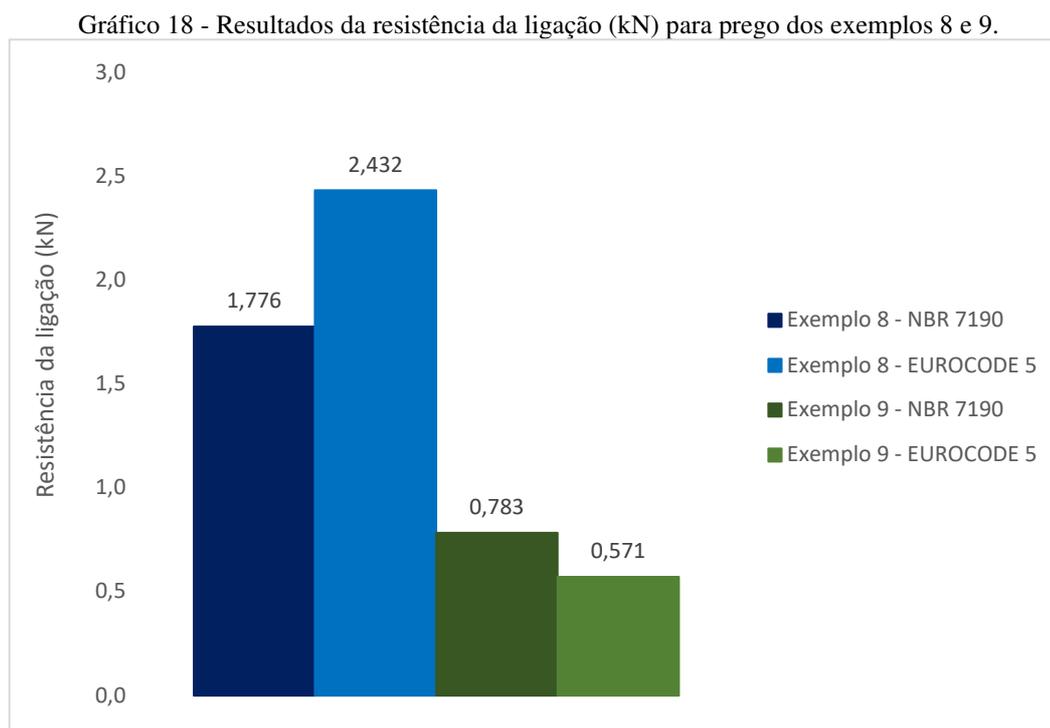
Gráfico 17 - Resultados da resistência da ligação (kN) para parafuso dos exemplos 6, 7 e 8.



Fonte: Autora, 2021.

De maneira geral, ao analisar os valores de resistência apresentados no gráfico 17, percebeu-se que, as diferenças entre os valores em cada um dos exemplos foram maiores, principalmente nos exemplos 6 e 7, resultando assim em uma diferença de mais de 1 kN. E ao verificar os valores das quantidades necessárias de parafusos nas ligações, notou-se que a diferença foi pequena. Assim como nos exemplos dos itens anteriores, fatores como os diâmetros, os valores de tensão de escoamento e a densidade característica da madeira contribuem nas diferenças encontradas nos resultados. É importante lembrar também que, no exemplo 7 são usadas chapas de aço na ligação e a norma europeia dispõe de outras formulações para casos específicos como esse. Já a norma brasileira não apresenta essa diferenciação entre os tipos de conexões.

A seguir é apresentado o gráfico 18, com os dados das resistências das ligações em relação ao prego, para melhor visualização dos resultados.



Fonte: Autora, 2021.

Ao analisar os valores de resistência apresentados no gráfico 18, percebeu-se que as diferenças entre os valores em cada um dos exemplos foram pequenas. Mas ao verificar os valores das quantidades necessárias de pregos nas ligações, notou-se que a diferença foi maior no exemplo 8. Os mesmos fatores comentados anteriormente também contribuíram com as diferenças nos resultados.

#### 4.5. DISCUSSÕES DO EXEMPLO 10

Como para a situação da influência da variação da espessura foram considerados dois casos, um com seção de corte duplo e outro de seção de corte simples, primeiramente serão comentados os resultados obtidos para a seção de corte duplo seguindo com a análise da seção de corte simples. Em ambos os casos, os gráficos da norma europeia serão comentados primeiro, para assim partir para análise do gráfico referente a norma brasileira.

- Antes de realizar as análises dos gráficos, é necessário avaliar a influência das espessuras nas formulações dos critérios dos modos de ruptura apresentados pela norma europeia. Com os modos de ruína apresentados na equação 29, percebeu-se que a variação das espessuras terá influência nos modos (g), (h) e (j). A espessura  $t_1$  influenciará nos modos (g) e (j), e a espessura  $t_2$  no modo (h). Diante de tais considerações e como base nos resultados obtidos no gráfico 2, observou-se que, ao fixar a espessura  $t_2$ , os dois modos de ruína que não dependiam de  $t_2$  permaneceram com os valores de resistência da ligação constantes, enquanto os demais sofreram variação nos resultados ao longo da reta. Ao fixar  $t_1$ , apenas um modo de ruína sofreu variação, os demais permaneceram com valores constantes, como mostra o gráfico 3.

O gráfico 1 apresenta os resultados referentes à norma brasileira e ao analisá-los, percebeu-se que, com a variação da espessura  $t_1$  os valores de resistência da ligação sofreram mudança até a espessura de 2 cm. Para espessuras maiores, o gráfico teve um comportamento constante, e o mesmo aconteceu ao variar  $t_2$ . De acordo com as dimensões das peças de madeira utilizadas no exemplo 10, segundo a norma brasileira, o modo de ruína foi o embutimento na madeira, condizendo com a equação 9. Como a equação 10 não depende da espessura, não havia como observar variações relativas à flexão do pino nesse caso.

Como visto nos gráficos 2 e 3, existe uma linha tracejada que indica a limitação inferior correspondente a resistência da ligação em cada caso. Esses valores limites de resistência da ligação foram colocados no gráfico 4 juntamente com resultados obtidos no gráfico 1. Ao analisá-los, percebeu-se que existe uma semelhança no comportamento das curvas entre os valores das normas brasileira e europeia. Essa semelhança dar-se ao fato de que, em ambas as normas, a espessura gera influência em suas formulações. Com a junção dos resultados

mostrados no gráfico 4, notou-se que a norma europeia obteve valores de resistência da ligação superiores aos valores encontrados pela norma brasileira.

- Da mesma forma que foi feito para seção de corte duplo, fez-se uma análise da influência da variação das espessuras nas formulações apresentadas pela norma europeia. Com a equação 19, percebeu-se que a variação da espessura não influenciará apenas no modo (f). A espessura  $t_1$  terá influência nos modos (a), (c) e (d) e a espessura  $t_2$  nos modos (b), (c) e (e). Com isso, observou-se que ao fixar a espessura  $t_2$  e como base nos resultados obtidos no gráfico 6, os três modos de ruína que não dependiam de  $t_2$  permaneceram com os valores constantes, enquanto os demais sofreram variação ao longo da reta. Fixando a espessura  $t_1$ , apenas três modos de ruína sofreram variação nos valores de resistência da ligação, os demais permaneceram com valores constantes, como mostra o gráfico 7.

Mesmo com uma quantidade maior de equações, a análise dos resultados para a seção de corte simples pode ser feita da mesma forma que no caso da seção dupla, pois em questão de comportamento das curvas e retas, em ambos os casos resultados foram semelhantes, como mostram os gráficos 5 e 8.

#### **4.6. DISCUSSÕES DO EXEMPLO 11**

Analisando os resultados dos gráficos 9 e 10, observou-se que a flexão do pino nesse caso independe da espécie de madeira. Os gráficos, nesse caso, terão duas curvas de flexão do pino e quatro retas de embutimento da madeira. Outros pontos a serem considerados são referentes ao embutimento que acontece de duas maneiras: na peça mais espessa com a madeira mais resistente, e com a peça menos espessa com a madeira menos resistente. Os demais são os valores intermediários da peça de menor espessura com a maior resistência e da peça com maior espessura com a menor resistência.

Os gráficos 11 e 12, referentes à norma europeia tiveram um comportamento semelhante com os da norma brasileira. Como a norma europeia possui um número maior de modos de ruína, ao analisar os gráficos, percebeu-se que em ambos os casos os gráficos são contemplados com três retas e três curvas. As retas são referentes ao modo de embutimento na madeira e para o caso das curvas, percebe-se que além do embutimento na madeira, em alguns pontos também ocorre a flexão do pino.

Ao verificar os valores das resistências de ligação obtidos por ambas as normas, percebeu-se que houve uma semelhança entre os valores dos gráficos 9 e 11, e dos gráficos 10 e 12, referentes ao esforço paralelo e normal às fibras. Sendo assim, estes poderão ser analisados da mesma forma que foi feito anteriormente, resultando em conclusões semelhantes.

#### **4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A seguir serão apresentadas as considerações finais em relação as diferenças observadas nos resultados obtidos para todos os exemplos calculados no capítulo 3 de maneira geral.

De maneira geral é possível visualizar que existem diferenças entre as expressões de cálculo apresentadas pela NBR 7190:1997 e pelo EUROCODE 5:2004. A norma brasileira apresenta apenas duas fórmulas para o cálculo da resistência de ligação em seções de corte simples e duplo. No total, a norma europeia apresenta vinte e uma fórmulas, diferenciadas de acordo com o tipo de conexão e seção de corte. E para visualizar melhor essa discrepância entre as formulações, no Anexo A e B serão apresentados quatro quadros. As equações foram separadas de acordo com o modo de ruína, seção de corte e o tipo de conexão.

A espessura convencional da madeira é utilizada em ambas as formulações das normas brasileira e europeia. A diferença é que, a norma brasileira para corte simples considera a menor espessura entre as peças que concorrem na ligação, e para corte duplo, considera a menor espessura entre a peça externa ( $t_1$ ) e a metade da espessura da peça interna ( $t_2/2$ ), como comentado ao longo dessa monografia. Já a norma europeia utiliza valores convencionais de espessura de cada peça conforme cada caso de ruína, de acordo com as formulações em cada tipo de conexão e seção de corte. Analisando os valores de força características dos modos de ruína da norma europeia, percebeu-se que, para as peças com espessuras da extremidade maior, os valores de força característica são sempre superiores.

É importante observar inicialmente que no Eurocode 5, para o cálculo de força característica do plano de cisalhamento é necessário obter o valor da resistência de embutimento, e este leva em consideração o valor de densidade característica da madeira, que é determinado de acordo com sua classificação, enquanto que a NBR 7190 em sua versão atual, não utiliza a densidade em suas formulações.

Para o valor da resistência à tração característica do material do pino metálico ( $f_u$ ) a norma europeia utiliza o valor tensão de escoamento característico, que serve para encontrar o valor do momento fletor que causa a formação de rótula plástica no pino metálico. Enquanto que a norma brasileira utiliza o valor de tensão de projeto no cálculo do parâmetro  $\beta_{lim(NBR)}$ . A norma brasileira assim como a norma europeia, quando se trata da resistência ao embutimento leva em consideração a direção preferencial das fibras da madeira, perpendicular e paralela as fibras, mas com equações diferentes.

Ao verificar os valores de exemplos em que a direção das fibras era a direção normal, percebeu-se que a norma brasileira obteve valores de resistência da ligação superiores aos valores da norma europeia. Para os exemplos com a direção perpendicular às fibras, os valores de resistência da ligação calculados pela norma europeia foram maiores que os valores da norma brasileira. Quanto ao dimensionamento da quantidade de pinos, para ambos os casos (resistência normal e resistência paralela às fibras), notou-se que, com valores menores da resistência da ligação, o dimensionamento da quantidade de pinos calculados pela norma europeia foi maior quando comparado com a norma brasileira. Com valores maiores de resistência da ligação, o dimensionamento da quantidade de pinos calculados pela norma europeia foi menor quando comparado com a norma brasileira.

No caso dos exemplos na direção inclinada entre o esforço solicitante e as fibras, notou-se que os valores de resistência da ligação calculados pela norma brasileira foram superiores aos valores de resistência da ligação calculados pela norma europeia. Com valores menores, a norma europeia obteve uma quantidade de pinos maiores que a quantidade encontrada pela norma brasileira. Como no exemplo 8 havia duas possibilidades de execução com pinos, os valores de resistência da ligação calculados para o prego pela norma brasileira, nesse caso, foram menores e tiveram uma quantidade de pinos maiores do que a norma europeia.

Nos exemplos em que as espessuras foram variadas, com o comportamento dos gráficos, percebeu-se que apesar da norma europeia ter um leque maior de modos de ruína, quando pegou-se o valor limite calculado segundo a norma brasileira, estes obtiveram o mesmo comportamento para ambas as normas. Isso se justifica pela origem das formulações serem a mesma, apesar da notável diferença entre valores.

Para caso do exemplo entre peças com espécies diferentes, de acordo com as dimensões adotadas, a resistência da peça menos espessa feita com a madeira mais resistente compensou a madeira menos resistente utilizada para a peça mais espessa. Observou-se que, com as proporções aqui adotadas, a resistência individual de cada peça resultou praticamente igual, como mostram os gráficos 9 e 10. Nesse caso, quem “conduziu” a resistência da ligação foi a peça de madeira com menor espessura sempre que esta é feita com a madeira de menor resistência, o que já era esperado. Para o caso com a madeira menos resistente com a peça de madeira mais espessa, em algum ponto do gráfico a flexão do pino passa a ter influência. Diante de tais fatos, nota-se que a peça de madeira mais espessa sempre tende a resistir mais. A flexão do pino parece não ser predominante para peças de maior espessura, sendo a resistência ao embutimento normal fator que mais prevaleceu.

## 5. CONCLUSÃO

Em relação à resistência da madeira, para o cálculo do valor da resistência de embutimento, a norma brasileira leva em consideração principalmente a resistência à compressão paralela às fibras através da caracterização simplificada. A norma europeia, por outro lado, utiliza uma relação da resistência com a densidade característica da madeira e o diâmetro do pino metálico como parâmetros.

O EUROCODE 5:2004 contempla um número maior de modos de ruína quando comparado com a NBR 7190:1997 que possui apenas dois modos de ruptura. Ao todo são vinte e uma formulações na norma europeia, divididas de acordo com o tipo de conexão, tipo de pino e seção de corte. Sendo assim, percebe-se que o modelo teórico apresentado pela norma europeia contempla equações diferentes para as ligações de seções com corte simples e duplo, e a norma brasileira distingue estes casos apenas admitindo que a resistência é válida para cada plano de corte. Dessa forma é perceptível que, com a diversidade nas formulações para os modos de ruína, a norma europeia possibilita um melhor estudo de ligações em estruturas de madeira mais próximas da realidade.

O desenvolvimento do cálculo automático com a planilha eletrônica mostrou-se eficiente e prático, facilitando assim a execução das muitas possibilidades utilizando os critérios da norma europeia. No Apêndice A desta monografia é possível visualizar a estrutura da planilha eletrônica e a metodologia utilizada para o cálculo automático.

Com as análises feitas nos exemplos (1 a 9) calculados no capítulo 3 e apresentados no Apêndice B, é notório que há diferenças nos resultados obtidos entre a NBR 7190 e o EUROCODE 5. Apesar de utilizarem formulações diferentes, percebeu-se que as diferenças entre diversos dos casos avaliados foram pequenas, o que acaba trazendo como ponto positivo para a nova atualização da NBR 7190, já que esta nova revisão é baseada na norma europeia. De maneira geral, nota-se que os fatores mais relevantes que contribuem para as divergências nos resultados adquiridos entre ambas as normas são: a consideração que a norma europeia faz em relação ao uso da densidade característica da madeira e o diâmetro do pino para o cálculo da resistência de embutimento, enquanto a norma brasileira leva em consideração a caracterização simplificada para a resistência de embutimento. Observa-se ainda o fato de a norma europeia utilizar o valor de tensão de escoamento característico no cálculo de um valor

de momento fletor de plastificação do pino metálico, sendo que a norma brasileira considera tal fenômeno de fora indireta apenas com o cálculo do parâmetro  $\beta_{LIM(NBR)}$ . Observa-se também que a norma brasileira leva em conta o critério de espessura convencional entre as peças generalizando para qualquer ligação, já a norma europeia, considera a espessura  $t$  em cada caso inserindo esta variável nos equacionamentos.

Ao analisar os resultados obtidos no exemplo 10, e ao variar as espessuras das peças de madeira utilizando o critério da norma brasileira, nota-se que esta variação teve pouca interferência nos valores de resistência final da ligação. Pelos gráficos 1 e 5 percebeu-se que não houve mudança nos valores de resistência da ligação para os valores de espessuras em cada situação, estes permaneceram constantes, e isso se dá ao fato de a norma brasileira estar limitada apenas à dois modos de ruína. Como apenas o embutimento na madeira depende diretamente da espessura, logo, não foi possível visualizar graficamente o caso da força limitada pela flexão do pino. Com uma maior variedade de modos de ruptura, a norma europeia proporciona com mais precisão, detalhes que a norma brasileira não nos fornece em sua versão atual.

Para o caso do exemplo 11, devido a norma brasileira não fazer nenhuma consideração a respeito de espécies de madeira diferentes, foi necessário analisar as espessuras de forma separada, para no final analisar os valores em conjunto e obter uma melhor avaliação. Nesse sentido, obteve-se bons resultados ao compararmos com a norma europeia. Assim como na norma brasileira, os valores de resistência paralelo às fibras foram superiores aos valores de resistência normal às fibras, o que era esperado. Quando se tem uma peça de madeira com menor espessura e a menor resistência mecânica, esta é quem conduzirá a resistência da ligação.

Ao comparar os critérios normativos entre a NBR 7190 e o EUROCODE 5, percebe-se que é necessária uma avaliação criteriosa e cuidadosa no dimensionamento de ligações, pois o fato da norma brasileira considerar apenas os critérios simplificados na determinação de resistência da ligação e por possuir apenas dois modos de ruína, pode gerar dúvidas por parte de quem está realizando projetos de estruturas de madeira pela falta de precisão, considerando ainda os mais de 20 anos de defasagem.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser realizados maiores estudos em casos de ligações com diferentes espécies de madeiras com solicitação na direção normal às fibras. Outras sugestões seriam avaliar comparativamente o dimensionamento das ligações utilizando

a norma americana NDS:91, ou outras normas internacionais, e estudar de forma mais criteriosa as relações entre densidade da madeira e sua resistência, principalmente considerando uma possível adaptação em relação às propriedades físicas e mecânicas de espécies de madeira comuns na Europa com as espécies tropicais do Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Revisão da norma para projetos de estruturas de madeira. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/noticias/3680-revisao-da-norma-para-projetos-de-estruturas-de-madeira>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

ALMEIDA, Pedro Afonso de Oliveira; FUSCO, Péricles Brasiliense. Uniões pregadas de madeira. 1987. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.

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

BAENA, Juliano Silveira. Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira. Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

BRITO, Laríssa Aló Pinto. Análise comparativa entre a NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 da influência do ângulo e da espessura de ligação da resistência de ligações parafusadas em pino metálico. Orientador: Prof. Msc, Caio Cesar Veloso Acosta. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, 2021.

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

CALIL NETO, Carlito. Ligações com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso em estruturas de madeira. Orientador: Francisco Antonio Rocco Lahr. 328 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

CROCETTI, Roberto. et. al. Design of timber structures: Rules and formulas according to Eurocode 5. 2 ed. Vol. 2. Estocolmo: Swedish Wood, 2016.

DESIGN OF TIMBER STRUCTURES: STRUCTURAL ASPECTS OF TIMBER CONSTRUCTION. 2 ed. Vol. 1. Estocolmo: Swedish Wood, 2016.

DIAS, Alan. Ligações em estruturas de madeira. 15 fev. 2013. Disponível em: <<http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2013/02/ligacoes-em-estruturas-de-madeira.html>>. Acesso em 15 ago. 2021.

DIAS, Antonio Alves; CALIL JUNIOR, Carlito; LAHR, Francisco Antonio Rocco; MARTINS, Gisele Cristina Antunes. Estruturas de Madeira: Projetos, Dimensionamento e Exemplos de cálculo. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. 185 p.

DIAS, João Miguel Santos. Ligações estruturais de aço coladas com epóxi em madeiras de alta densidade – Influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica. Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1995-1-1:2004+A1 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules of buildings. Bruxelas: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 338:2009 - Structural timber – Strength classes. 2009.

GESUALDO, Francisco A. Romero. Estruturas de Madeira: Notas de Aula. Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

HANDBOOK 2. Design of timber structures according to Eurocode 5. Education and Culture Leonardo da Vinci. 2008.

LE GOVIC, Claude. Les assemblages dans la construction en bois. CTB, 1995.

LOPES, Marina Stygar. O uso da madeira na construção civil. 8 jan. 2019. Disponível em: <<https://www.matanativa.com.br/madeira-na-construcao-civil/>>. Acesso em 25 ago. 2020.

MOREIRA, Márcio Sampaio Sarmet. Ligações estruturas de peças de madeira por meio de adesivo em áreas reduzidas associado a elementos de pino. 462 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

OLIVEIRA, Marcos Antônio Melo. Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira. Orientador: Prof. Dr. Antônio Alves Dias. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

PFEIL, Walter. Estruturas de madeira. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

RODRIGUES, Luana Monteiro. A madeira e sua utilização na construção civil. Juazeiro do Norte, jun. 2018. Disponível em: <<https://www.webartigos.com/artigos/a-madeira-e-sua-utilizacao-na-construcao-civil/159256>>. Acesso em 04 nov. 2021.

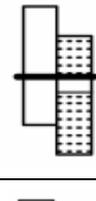
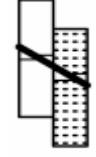
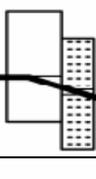
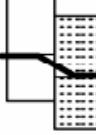
SCHWANZ, Marcos Vinícius. Elaboração de software educacional para dimensionamento de ligações em madeira com pinos metálicos segundo a Eurocode 5 (2008). Orientador: Prof. DR. Jorge Luís Nunes de Góes. 132 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

SILVA, Wagner Queiroz. Ligações em estruturas de madeira – exemplos e exercícios. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2020.

VALLE, Ângela. Ligações: Baseado no capítulo 8 da NBR 7190:1997. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015. Disponível em <[https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1376880/mod\\_resource/content/0/Ligacoes%20com%20pinos2015.pdf](https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1376880/mod_resource/content/0/Ligacoes%20com%20pinos2015.pdf)>. Acesso em 16 out. 2021.

**ANEXO A – FORMULÁRIO COMPARATIVO PARA CONEXÕES DO TIPO MADEIRA-MADEIRA E PAINEL-MADEIRA**

Quadro 1 - Formulário comparativo para corte simples.

Corte Simples: Conexões madeira-madeira e painel-madeira		
Representação do modo de ruína – Eurocode 5	Expressões NBR 7190	Expressões EUROCODE 5
Embutimento na madeira		
		$f_{h,1,k}t_1d$
	$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed}$	$f_{h,2,k}t_2d$
		$\frac{f_{h,1,k}t_1d}{1+\beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
Flexão do pino		
		$1,05 \frac{f_{h,1,k}t_1d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}dt_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
	$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd}$	$1,05 \frac{f_{h,1,k}t_2d}{1+2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}dt_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
		$1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,1,d}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Fonte: Autora, 2021.

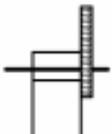
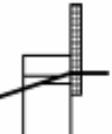
Quadro 2 - Formulário comparativo para corte duplo.

Corte Duplo: Conexões madeira-madeira e painel-madeira		
Representação do modo de ruína – Eurocode 5	Expressões NBR 7190	Expressões EUROCODE 5
Embutimento na madeira		
	$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed}$	$f_{h,1,k} t_1 d$
		$0,5 f_{h,2,k} t_2 d$
Flexão do pino		
	$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd}$	$1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2} - \beta} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
		$1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,d} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Fonte: Autora, 2021.

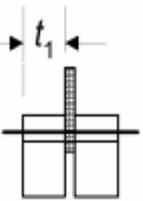
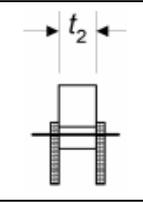
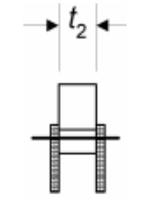
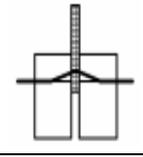
## ANEXO B – FORMULÁRIO COMPARATIVO PARA CONEXÕES DO TIPO AÇO-MADEIRA

Quadro 3 - Formulário comparativo para corte simples.

Corte Simples: Conexões aço-madeira		
Representação do modo de ruína – Eurocode 5	Expressões NBR 7190	Expressões EUROCODE 5
		Embutimento na madeira
	$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed}$	Placas de aço fina em cisalhamento simples ( $t \leq 0,5d$ ):
		$0,4f_{h,1,k}t_1d$
		Placas de aço espessa em cisalhamento simples ( $t_{aço} \geq d$ ):
		$f_{h,k}t_1d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}dt_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
Representação do modo de ruína – Eurocode 5		Flexão do pino
	$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd}$	Placas de aço fina em cisalhamento simples ( $t \leq 0,5d$ ):
		$1,15 \sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,1,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
		Placas de aço espessa em cisalhamento simples ( $t_{aço} \geq d$ ):
		$2,3 \sqrt{M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
		Placas de aço espessa em cisalhamento simples ( $t_{aço} \geq d$ ):
		$f_{h,k}t_1d$

Fonte: Autora, 2021.

Quadro 4 - Formulário comparativo para corte duplo.

Corte Duplo: Conexões aço-madeira		
Representação do modo de ruína – Eurocode 5	Expressões NBR 7190	Expressões EUROCODE 5
		Embutimento na madeira
	$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed}$	Placa de aço com qualquer espessura como membro central – cisalhamento duplo:
		$f_{h,k} t_1 d$
		Placas de aço finas como membros externos ( $t_{aço} \leq 0,5d$ ) – cisalhamento duplo:
		$0,5f_{h,2,k} t_2 d$
		Placa de aço espessa com membros externos ( $t_{aço} \geq d$ ) – cisalhamento duplo:
		$0,5f_{h,2,k} t_2 d$
Representação do modo de ruína – Eurocode 5		Flexão do pino
	$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd}$	Placa de aço com qualquer espessura como membro central – cisalhamento duplo:
		$2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
		Placas de aço finas como membros externos ( $t_{aço} \leq 0,5d$ ) – cisalhamento duplo:
		$1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
		Placa de aço espessa com membros externos ( $t_{aço} \geq d$ ) – cisalhamento duplo:
	$2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	
		Placa de aço com qualquer espessura como membro central – cisalhamento duplo:
		$f_{h,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2} - 1} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Fonte: Autora, 2021.

## APÊNDICE A – CÁLCULO AUTOMÁTICO SEGUNDO OS CRITÉRIOS DO EUROCODE 5: 2004.

A seguir serão ilustradas algumas imagens retiradas da planilha eletrônica que foi desenvolvida nesse trabalho. A figura 35 representa a legenda padronizada por cores utilizada na planilha para facilitar a interfase e a modificação dos valores.

Figura 35 - Legenda padronizada utilizada na planilha.

LEGENDA	
	Valores de entrada
	Valores tabelados
	Critério de norma ou livro
	Complemento de fórmula de acordo com o tipo de unha ou madeira
	Valor final a ser considerado

Fonte: Autora, 2021.

A figura 36 mostra a divisão em quadros para os tipos de conexões determinadas pela norma europeia. Essa uniformização foi considerada tanto para conexões com pregos quanto com parafusos. É possível modificar os dados iniciais relacionados a geometria e característica da madeira, assim como os dados referentes ao pino metálico.

Figura 36 - Cálculo automático para conexões pregadas.

CONEXÕES PREGADAS: MADEIRA-MADEIRA				CONEXÕES DE AÇO-MADEIRA			
Informações Iniciais				Informações Iniciais			
Dados geométricos		Característica da madeira		Propriedades do aço		Dados geométricos	
hp	31,5	cm	Conífera C24	hp	31,5	cm	Conífera C24
bp	21,5	cm	Densidade	bp	21,5	cm	Densidade
t1	0,5	cm	ρ <sub>k</sub> 390 kg/m <sup>3</sup>	t1	0,5	cm	ρ <sub>k</sub> 390 kg/m <sup>3</sup>
t2	0,8	cm	ρ <sub>m</sub> 430 kg/m <sup>3</sup>	t2	0,8	cm	ρ <sub>m</sub> 430 kg/m <sup>3</sup>
t	0,5	cm	Dados geométricos - prego	t	0,5	cm	ls 6 cm
d1	4	mm	ls 6 cm	d1	4	mm	tpen1 5,5 cm
d2	16	mm	tpen1 5,5 cm	d2	16	mm	tpen2 4,7 cm
			tpen2 4,7 cm				dh 8 mm
			dh 8 mm				dhole1 5 mm
			dhole1 5 mm				dhole2 17 cm
			dhole2 17 cm				
Relação entre a resistência de embutimento dos membros				Momento de escoamento característico			
β	1,000		β 1,000	fu	360	MPa	fu 360 MPa
				f.u.r	0,3		f.u.r 0,3
				f.u.q.r	0,45		f.u.q.r 0,45
				My,Rk	3,970	kN.mm	My,Rk 145,927 kN.mm
				My,Rk	0,3970	kN.cm	My,Rk 14,5927 kN.cm
				Porcentagem de Capacidade Resistente			
				P.C.R	15	%	P.C.R 15 %
				P.C.R	25	%	P.C.R 25 %
				Força de retirada característica			
				Obs.: Quando Fax,Rk não for conhecido, a contribuição do efeito da corda deve ser considerado			

Fonte: Autora, 2021.

Na figura 37 tem-se um trecho da planilha com a representação da divisão entre os modos de ruínas para ligações madeira-madeira, onde estão separados de acordo com a seção de corte. Essa mesma divisão também foi feita para os modos de ruína referentes a conexões aço-madeira.

Figura 37 – Divisão entre os modos de ruína de acordo com a seção de corte.

f: $= (0,082 * SALS14 * (SAIS17^{(-0,3)})) / 10$									
L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
	Fv,Rk	4,256	kN				Fv,Rk	3,561	kN
	Fv,Rk	4,392	kN				Fv,Rk	3,375	kN
						<b>Fv,Rk (mín)</b>	<b>3,375</b>	<b>kN</b>	
<b>Força característica por plano de cisalhamento</b>									
	Fv,Rk	9,196	kN				Fv,Rk	5,484	kN

1 pregos Força resistente - pregos | Exemplos - pregos | Conexões com parafusos | Força resistente - p ...

Fonte: Autora, 2021.

Além da divisão nas formulações de acordo com o tipo de conexão, tipo de pino e seção de corte, a norma europeia também disponibiliza equações para pregos lisos e pregos não lisos, sendo assim, a planilha também foi programada para esses casos específicos, como mostra a figura 38. Ainda na figura 38 é possível observar a divisão feita na planilha para os dois casos de pré-perfuração atribuídos pela norma europeia.

Figura 38 - Formulações de acordo com o tipo de prego.

Modos de ruína para conexões de aço com madeira				Modos de ruína para conexões de aço com madeira			
<b>PARA UNHAS QUE NÃO SEJAM UNHAS LISAS</b>				<b>PARA UNHAS LISAS</b>			
Placa de aço fina em cisalhamento simples ( $t \leq 0,5d$ )				Placa de aço fina em cisalhamento simples ( $t \leq 0,5d$ )			
<b>Força de retirada característica</b>				<b>Força de retirada característica</b>			
Obs.: Para pregos liso com $t_{pen} \leq 12d$ , os valores de Força de retirada características devem ser encontradas pelas seguintes expressões:				Obs.: Para pregos liso com $t_{pen} \leq 12d$ , os valores de Força de retirada características devem ser encontradas pelas seguintes expressões:			
t <sub>pen</sub>	5,5	cm		t <sub>pen</sub>	5,5	cm	
12d	4,8	cm	NÃO OK	12d	19,2	cm	OK
fax,k	0,304	kN/cm <sup>2</sup>		fax,k	0,304	kN/cm <sup>2</sup>	
fhead,k	1,065	kN/cm <sup>2</sup>		fhead,k	1,065	kN/cm <sup>2</sup>	
	Fax,Rk	0,669	kN		Fax,Rk	2,677	kN
<b>Força característica por plano de cisalhamento</b>				<b>Força característica por plano de cisalhamento</b>			
Expressões empíricas para determinação da Resistência de Embutimento Característica				Expressões empíricas para determinação da Resistência de Embutimento Característica			
Sem pré-perfuração (d < 8 mm)		Com pré-perfuração (todos os diâmetros)		Sem pré-perfuração (d < 8 mm)		Com pré-perfuração (todos os diâmetros)	
fh,0,k	2,110	kN/cm <sup>2</sup>		fh,0,k	2,686	kN/cm <sup>2</sup>	
fh,0,k	2,110	kN/cm <sup>2</sup>		fh,0,k	2,686	kN/cm <sup>2</sup>	

Fonte: Autora, 2021.

## APÊNDICE B – ILUSTRAÇÃO DOS EXEMPLOS COM APLICAÇÃO DA PLANILHA.

As figuras apresentadas nesse apêndice trazem a ilustração de alguns trechos da planilha eletrônica desenvolvida com partes do cálculo de alguns dos exemplos que foram apresentados no capítulo 3. A figura 39 ilustra os cálculos dos exemplos 1 e 2. A figura 40 ilustra os exemplos 3 e 4. Já as figuras 41 e 42 apresentam a metodologia considerada para a situação em que foram variadas as espessuras  $t_1$  e  $t_2$  do exemplo 10.

Figura 39 - Exemplos de conexões executadas com pregos (EUROCODE 5).

EXEMPLO 1 (a)				EXEMPLO 2			
CONEXÕES MADEIRA-MADEIRA E PAINEL-MADEIRA				CONEXÕES MADEIRA-MADEIRA E PAINEL-MADEIRA			
Informações Iniciais				Informações Iniciais			
Dados geométricos		Característica da madeira		Dados geométricos		Característica da madeira	
hp	cm			hp	cm	Conífera	C40
bp	cm		Densidade	bp	cm		Densidade
t1	5 cm	pk	494,103 kg/m <sup>3</sup>	t1	4 cm	pk	426,059 kg/m <sup>3</sup>
t2	10 cm	pm	kg/m <sup>3</sup>	t2	6 cm	pm	kg/m <sup>3</sup>
t	0,5 cm			t	0,5 cm		
d1	5 mm			d1	4,4 mm	I <sub>min</sub>	9,28 cm
d2	10 mm			d2	8 mm	t <sub>pen</sub>	5,28 cm
Relação entre a resistência de embutimento dos membros				Relação entre a resistência de embutimento dos membros			
β	1,000	β	1,000	β	1,000	β	1,000
Momento de escoamento característico				Momento de escoamento característico			
fu	600 MPa	fu	600 MPa	fu	600 MPa	fu	600 MPa
f.u.r	0,3	f.u.r	0,3	f.u.r	0,3	f.u.r	0,3
f.u.q.r	0,45	f.u.q.r	0,45	f.u.q.r	0,45	f.u.q.r	0,45
My,Rk	11,819 kN.mm	My,Rk	71,659 kN.mm	My,Rk	8,477 kN.mm	My,Rk	40,115 kN.mm
My,Rk	1,182 kN.cm	My,Rk	7,166 kN.cm	My,Rk	0,848 kN.cm	My,Rk	4,011 kN.cm

Fonte: Autora, 2021.

Figura 40 - Exemplos de conexões executadas com parafusos (EUROCODE 5).

EXEMPLO 3				EXEMPLO 4			
CONEXÕES GERAIS E PARAFUSADAS - MADEIRA-MADEIRA				CONEXÕES GERAIS E PARAFUSADAS - MADEIRA-MADEIRA			
Informações Iniciais				Informações Iniciais			
Dados geométricos		Característica da madeira		Propriedades do aço		Dados geométricos	
hp	cm	Angelim-pedra				hp	cm
bp	cm	Densidade		t	0,8 cm	bp	cm
t1	5 cm	pk	317,615 kg/m <sup>3</sup>	h	65 cm	t1	6 cm
t2	7,5 cm	pm	kg/m <sup>3</sup>	b	20 cm	t2	8 cm
t	0,5 cm			Dados geométricos - parafuso		t	0,5 cm
d	10 mm			ls	6 cm	d	16 mm
				t <sub>pen1</sub>	1 cm		
				t <sub>pen2</sub>	-6,5 cm		
				dhole1	11 mm		
				α	0 °		
Obs.: Para parafusos com d ≤ 30 mm, os seguintes valores de Resistência de Embutimento Característica no ângulo α devem ser usados.				Obs.: Para parafusos com d ≤ 30 mm, os seguintes valores de Resistência de Embutimento Característica no ângulo α devem ser usados.			
f <sub>h,2,k</sub>	2,344 kN/cm <sup>2</sup>	f <sub>h,1,k</sub>	2,344 kN/cm <sup>2</sup>	f <sub>h,2,k</sub>	0,851 kN/cm <sup>2</sup>	f <sub>h,1,k</sub>	0,851 kN/cm <sup>2</sup>
f <sub>.mc</sub>	1,35	β	1,000	f <sub>.mc</sub>	1,35	β	1,000
f <sub>.LVL</sub>	1,3			f <sub>.LVL</sub>	1,3		
f <sub>.md</sub>	0,9			f <sub>.md</sub>	0,9		
k <sub>90</sub>	1,5			k <sub>90</sub>	1,59		
Momento de escoamento característico				Momento de escoamento característico			
fu	240 MPa	My,Rk	28,664 kN.mm	fu	240 MPa	My,Rk	97,285 kN.mm
		My,Rk	2,8664 kN.cm			My,Rk	9,7285 kN.cm

Fonte: Autora, 2021.

Figura 41 – Exemplo de seção dupla calculado com o método da NBR 7190.

CONEXÕES PARAFUSADAS MADEIRA-MADEIRA					
Informações Iniciais					
Dados geométricos			Característica da madeira		
hp		cm			
bp		cm		Densidade	
t1	0,5	cm		$\rho_k$	kg/cm <sup>3</sup>
t2	2	cm		Propriedade de força	
t		cm		fc0,m	57,8 MPa
d1	0	mm			
d2	12	mm			
Parâmetro $\beta$					
t	0,5	cm	kmod1	0,7	$\beta$ 0,417
fyk	240	MPa	kmod2	1,0	$\beta_{lim}$ 6,989
$\gamma_s$	1,1		kmod3	0,8	
fyd	218,182	MPa	kmod	0,56	Modo de ruína
fc0,k	40,460	MPa	$\alpha_e$	1,725	<b>EMBUTIMENTO NA</b>
fc0,d	16,184	MPa	fe90,d	6,979	<b>MADEIRA</b>
Modos de ruína					
Resistência dos pinos					
I. Embutimento na madeira			II. Flexão do pino		
Rvd,1	0,168	kN	Rvd,1	2,810	kN
Corte	duplo		Corte	duplo	
nº P.C	2		nº P.C	2	
Rvd,1	0,335	kN	Rvd,1	5,619	kN

Fonte: Autora, 2021.

Figura 42 - Exemplo de seção simples calculado com o método da NBR 7190.

CONEXÕES PARAFUSADAS MADEIRA-MADEIRA					
Informações Iniciais					
Dados geométricos			Característica da madeira		
hp		cm			
bp		cm		Densidade	
t1	1,5	cm		$\rho_k$	kg/cm <sup>3</sup>
t2	3,5	cm		Propriedade de força	
t		cm		fc0,m	57,8 MPa
d1	0	mm			
d2	12	mm			
Parâmetro $\beta$					
t	1,5	cm	kmod1	0,7	$\beta$ 1,250
fyk	240	MPa	kmod2	1,0	$\beta_{lim}$ 4,590
$\gamma_s$	1,1		kmod3	0,8	
fyd	218,182	MPa	kmod	0,56	Modo de ruína
fc0,k	40,460	MPa	$\alpha_e$	1,725	<b>EMBUTIMENTO NA</b>
fc0,d	16,184	MPa	fe0,d	16,184	<b>MADEIRA</b>
Modos de ruína					
Resistência dos pinos					
I. Embutimento na madeira			II. Flexão do pino		
Rvd,1	1,165	kN	Rvd,1	4,278	kN
Corte	simples		Corte	simples	
nº P.C	1		nº P.C	1	
Rvd,1	1,165	kN	Rvd,1	4,278	kN

Fonte: Autora, 2021.