

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LARISSA ALÓ PINTO BRITO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A NBR 7190/97 E O EUROCODE
5:2004 DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO E DA ESPESSURA DE
LIGAÇÃO NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM
PINO METÁLICO**

FLORIANÓPOLIS, 2021

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LARISSA ALÓ PINTO BRITO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A NBR 7190/97 E O EUROCODE
5:2004 DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO E DA ESPESSURA DE
LIGAÇÃO NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM
PINO METÁLICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para a
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Caio Cesar Veloso
Acosta

FLORIANÓPOLIS, 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Brito, Larissa Aló Pinto

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A NBR 7190/97 E O EUROCODE 5:2004 DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO E DA ESPESSURA DE LIGAÇÃO NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM PINO METÁLICO

/ Larissa Aló Pinto Brito ; orientação de Caio Cesar Veloso Acosta. - Florianópolis, SC, 2021.

112 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.

Inclui Referências.

1. Estruturas de madeira.
2. Ligações em madeira.
3. Ligações parafusadas.
4. NBR 7190/97.
5. EUROCODE 5:2004. I. Acosta, Caio Cesar Veloso. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A NBR 7190/97 E O EUROCODE
5:2004 DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO E DA ESPESSURA DE
LIGAÇÃO NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM
PINO METÁLICO**

LARISSA ALÓ PINTO BRITO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 26 de abril, 2021.

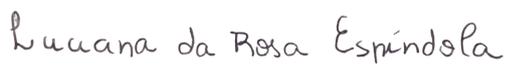
Banca examinadora:



Caio Cesar Veloso Acosta, Msc.



Fernando Toppan Rabello, Dr.



Luciana da Rosa Espíndola, Dra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Mirna Aló Pinto Brito e Daniel da Silva Brito que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões, sempre me deram todo suporte possível e impossível para que eu conquistasse meus maiores sonhos. Meu eterno agradecimento por todos os momentos que estiveram ao meu lado sempre acreditando na minha capacidade e investindo em mim. Sem vocês não estaria aqui.

Ao meu irmão Nicolás Brito que sempre me divertiu e me fez sorrir mais ao longo da jornada acadêmica.

Ao meu primo Caio Vinícius por ter me feito companhia, mesmo de longe, durante a execução desse trabalho em inúmeros finais de semana.

Ao meu avô João do Amaral que me apoiou e me deu grandes incentivos durante a minha graduação.

As amigades que construí nesses cinco anos de curso e ao IFSC e todos os professores envolvidos na minha formação.

Ao meu orientador, professor Msc Caio Cesar Veloso Acosta, grande estudioso das estruturas, que foi capaz de transmitir um pouco de seu conhecimento e me inspirou a realizar esse trabalho.

Por fim aos amigos que, de perto ou de longe, me apoiaram todos os dias.

RESUMO

A madeira é um material amplamente utilizado pelo homem, especialmente como material de construção por suas características físicas e químicas. Para que se possa vencer as limitações das dimensões comerciais da madeira são criados novos elementos a partir de ligações entre as peças, sendo a ligação por pino metálico a mais utilizada. A capacidade de carga da estrutura passa a ser determinada pela própria resistência da ligação, que deve ser durável, resistente e segura. Para tanto, as ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira são dimensionadas seguindo documentos normativos como a NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004. O rompimento das ligações pode ocorrer por embutimento do pino na madeira ou por flexão do pino, e isso depende do tipo e espessura da madeira da ligação, do ângulo da ligação e do diâmetro do pino. Mesmo tendo origem no mesmo estudo de Johansen (1949), existem inúmeras diferenças entre os dimensionamentos da NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 e quanto ao tipo de ruptura da ligação. Dessa forma, foi feita a análise e comparação da variação da resistência de ligação com pino metálico entre a ABNT NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 a partir da variação de espessura e do ângulo de ligação, a partir da confecção de uma planilha de cálculo no software Excel onde foram propostas vinte e quatro ligações diferentes. Os cálculos foram feitos com a utilização de duas espécies de madeira, Pinus Taeda e Eucalyptus Grandis, por serem as madeiras mais utilizadas na construção civil no Brasil e com a finalidade de propor composições mais econômicas com o uso de duas espécies distintas; foi usado o pino metálico liso de aço CA-25 com diâmetro de 12,5mm e arruelas lisas de 1/2" de diâmetro. Os resultados obtidos pelas ligações propostas deixam claro que existem inúmeras divergências entre a norma brasileira e a norma europeia, principalmente relacionado aos modelos de cálculo de ligações parafusadas, visto que a NBR 7190/97 apresenta critérios simplificados para a determinação da resistência de ligação, pois conta com apenas dois tipos de modos de ruptura e apenas o critério de espessura mínima. Já o EUROCODE 5:2004 leva em consideração outros elementos de variação, como diferença entre ângulo de solicitação, espécie das peças, relação entre resistência das peças e ângulo de atuação da força.

Palavras-chave: Estruturas de madeira. Ligações em madeira. Ligações parafusadas. NBR 7190/97. EUROCODE 5:2004.

ABSTRACT

Wood is a material widely used by humankind, especially as a building material for its physical and chemical characteristics. In order to overcome wood's limitations of the commercial dimensions, new elements are created from connections between the pieces, the metallic pin connection being the most used. The load capacity of the structure is determined by the strength of the connection, which must be durable, resistant and safe. For this purpose, the connections with metallic pins in wooden structures are dimensioned following normative documents such as NBR 7190/97 and EUROCODE 5:2004. The rupture of the connections can occur by embedding the pin in the wood or by flexing the pin, and this depends on the type and thickness of the wood of the connection, the angle of the connection and the diameter of the pin. Even originating from the same study by Johansen (1949), there are numerous differences between the dimensions of NBR 7190/97 and EUROCODE 5:2004 and in terms of the type of connection rupture. An analysis and comparison of the variation of bond strength with metallic pin between ABNT NBR 7190/97 and EUROCODE 5:2004 was made based on the variation in thickness and the bond angle, from a spreadsheet in Excel software where twenty-four different connections were proposed. The calculations were evaluated using two wood species, Pinus Taeda and Eucalyptus Grandis, as they are the most used wood in Brazil's civil construction and with the purpose of proposing more economical compositions using two different species; CA-25 steel flat metallic pin with a diameter of 12.5mm and 1/2" diameter flat washers were used. The results obtained by the proposed connections make it clear that there are numerous divergences between the Brazilian norm and the European norm, mainly related to the models for calculating bolted connections, since NBR 7190/97 presents simplified criteria for determining the bond strength, since it has only two types of rupture modes and only the minimum thickness criterion. EUROCODE 5:2004, on the other hand, takes into account other elements of variation, such as the difference between the angle of request, the type of parts, the relationship between the resistance of the parts and the angle where the force acts.

Key-words: Timber structures. Timber connections. Bolted connections. NBR 7190/97. EUROCODE 5:2004.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Ligações em estruturas de madeira | 26 |
| Figura 2 – Anisotropia da madeira, indicando as direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T) | 29 |
| Figura 3 – Comportamento da madeira na compressão..... | 31 |
| Figura 4 – Modos de ruptura na compressão paralela às fibras | 32 |
| Figura 5 – Modos de ruptura na compressão normal às fibras..... | 32 |
| Figura 6 – Modos de ruptura no cisalhamento | 33 |
| Figura 7 – Modos de ruptura na flexão simples..... | 33 |
| Figura 8 – Tipos de prego – (a) prego com cabeça de fuste circular cilíndrico, (b) prego sem cabeça, (c) prego ardox, (d) prego telheiro, (e) prego com cabeça dupla, (f) prego anelado e (g) prego quadrado..... | 36 |
| Figura 9 – Parafuso auto-atarraxante..... | 37 |
| Figura 10 – Tipos de parafusos passantes..... | 37 |
| Figura 11 – Exemplos de ligações em madeiras – vigas e pilares | 39 |
| Figura 12 – Transmissão direta..... | 40 |
| Figura 13 – Transmissão por justaposição..... | 40 |
| Figura 14 – Transmissão indireta..... | 40 |
| Figura 15 – Pinos metálicos: a) prego anelar; b) prego torcido; c) prego redondo liso; d) prego quadrado; e) parafuso..... | 41 |
| Figura 16 – Modo de ruptura para corte simples com pino rígido | 43 |
| Figura 17 – Modo de ruptura para corte simples com pino pouco rígido | 44 |
| Figura 18 – Modo de ruptura para corte duplo em que $m \geq 2l$ | 45 |
| Figura 19 – Modo de ruptura para corte duplo em que $m < 2l$ | 46 |
| Figura 20 – Modo de ruptura 1 para corte duplo com pino sem rigidez | 47 |
| Figura 21 – Modo de ruptura 2 para corte duplo com pino sem rigidez | 48 |
| Figura 22 – Verificação à ruptura por tração normal às fibras | 50 |
| Figura 23 – Determinação da espessura convencional para cortes simples e duplo | 50 |
| Figura 24 – Módulo de treliça invertido para ensaio | 54 |
| Figura 25 – Força combinada solicitando em um ângulo as fibras da madeira | 58 |
| Figura 26 – Modos de ruptura para uma seção de corte | 60 |
| Figura 27 – Modos de ruptura para duas seções de corte | 61 |
| Figura 28 – Fluxograma das atividades..... | 65 |
| Figura 29 – Corte simples | 67 |
| Figura 30 – Corte duplo | 67 |
| Figura 31 - Esquema da ligação I corte simples..... | 75 |
| Figura 32 - Esquema da ligação II corte simples..... | 77 |
| Figura 33 - Esquema da ligação I corte duplo | 79 |
| Figura 34 - Esquema da ligação II corte duplo | 81 |
| Figura 35 - Esquema de ligação III corte duplo | 82 |

| | |
|---|-----|
| Figura 36 - Esquema da ligação IV corte duplo..... | 84 |
| Figura 37 - Esquema da ligação I corte simples..... | 85 |
| Figura 38 - Esquema da ligação II corte simples..... | 87 |
| Figura 39 - Esquema da ligação III corte simples..... | 89 |
| Figura 40 - Esquema da ligação IV corte simples..... | 91 |
| Figura 41 - Esquema da ligação V corte simples..... | 92 |
| Figura 42 - Esquema de ligação VI corte simples..... | 93 |
| Figura 43 - Esquema da ligação I corte duplo..... | 95 |
| Figura 44 - Esquema da ligação II corte duplo..... | 97 |
| Figura 45 - Esquema da ligação III corte duplo..... | 99 |
| Figura 46 - Esquema da ligação IV corte duplo..... | 101 |
| Figura 47 - Esquema da ligação V corte duplo..... | 103 |
| Figura 48 - Esquema da ligação VI corte duplo..... | 105 |
| Figura 49 - Esquema da ligação VII corte duplo..... | 106 |
| Figura 50 - Esquema da ligação VIII corte duplo..... | 108 |
| Figura 51 - Esquema da ligação IX corte duplo..... | 110 |
| Figura 52 - Esquema da ligação X corte duplo..... | 111 |
| Figura 53 - Esquema da ligação XI corte duplo..... | 113 |
| Figura 54 - Esquema da ligação XII corte duplo..... | 114 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores de αe | 35 |
| Tabela 2 – Materiais usados em parafusos e suas resistências | 38 |
| Tabela 3 – Valores de αn | 53 |
| Tabela 4 – Valores de αe | 53 |
| Tabela 5 – Classes de resistência das coníferas | 55 |
| Tabela 6 – Classes de resistência das dicotiledôneas | 55 |
| Tabela 7 – Classes de umidade | 55 |
| Tabela 8 – Valores de k_{mod1} | 56 |
| Tabela 9 – Valores de k_{mod2} | 56 |
| Tabela 10 – Valores de k_{mod} | 59 |
| Tabela 11 - Coeficiente YM recomendado para resistência e propriedades do material..... | 59 |
| Tabela 12 - Comparativo de formulário para corte simples | 63 |
| Tabela 13 - Comparativo de formulário para corte duplo..... | 64 |
| Tabela 14 – Propriedades básicas da madeira | 66 |
| Tabela 15 – Propriedade do pino metálico | 67 |
| Tabela 16 – Variação do ângulo de ligação | 68 |
| Tabela 17 – Ligações avaliadas para corte simples com variação do ângulo..... | 68 |
| Tabela 18 – Ligações avaliadas para corte simples duplo com variação do ângulo . | 69 |
| Tabela 19 – Variação do da espessura das peças | 70 |
| Tabela 20 – Ligações avaliadas para corte simples com variação da espessura | 70 |
| Tabela 21 – Ligações avaliadas para corte duplo com variação da espessura | 71 |
| Tabela 22 – Modos de ruptura para ligação I corte simples com variação do ângulo | 76 |
| Tabela 23 – Modos de ruptura para ligação II corte simples com variação do ângulo | 79 |
| Tabela 24 – Modos de ruptura para ligação II corte duplo com variação do ângulo . | 80 |
| Tabela 25 – Modos de ruptura para ligação II corte duplo com variação do ângulo . | 82 |
| Tabela 26 – Modos de ruptura para ligação III corte duplo com variação do ângulo | 83 |
| Tabela 27 – Modos de ruptura para ligação IV corte duplo com variação do ângulo | 85 |
| Tabela 28 – Modos de ruptura para ligação I corte simples com variação da espessura | 87 |
| Tabela 29 – Modos de ruptura para ligação II corte simples com variação da espessura | 89 |
| Tabela 30 – Modos de ruptura para ligação III corte simples com variação da espessura | 90 |
| Tabela 31 – Modos de ruptura para ligação IV corte simples com variação da espessura | 92 |
| Tabela 32 – Modos de ruptura para ligação V corte simples com variação da espessura | 94 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 33 – Modos de ruptura para ligação VI corte simples com variação da espessura | 95 |
| Tabela 34 – Modos de ruptura para ligação I corte duplo com variação da espessura | 97 |
| Tabela 35 – Modos de ruptura para ligação II corte duplo com variação da espessura | 98 |
| Tabela 36 – Modos de ruptura para ligação III corte duplo com variação da espessura | 100 |
| Tabela 37 – Modos de ruptura para ligação IV corte duplo com variação | 102 |
| Tabela 38 – Modos de ruptura para ligação V corte duplo com variação da espessura | 104 |
| Tabela 39 – Modos de ruptura para ligação VI corte duplo com variação da espessura | 106 |
| Tabela 40 – Modos de ruptura para ligação VII corte duplo com variação da espessura | 107 |
| Tabela 41 – Modos de ruptura para ligação VIII corte duplo com variação da espessura | 109 |
| Tabela 42 – Modos de ruptura para ligação IX corte duplo com variação da espessura | 111 |
| Tabela 43 – Modos de ruptura para ligação X corte duplo com variação da espessura | 112 |
| Tabela 44 – Modos de ruptura para ligação XI corte duplo com variação da espessura | 114 |
| Tabela 45 – Modos de ruptura para ligação XII corte duplo com variação da espessura | 115 |

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA | 25 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 28 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 28 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 29 |
| 2.1 PROPRIEDADES DA MADEIRA..... | 29 |
| 2.1.1 Anisotropia..... | 29 |
| 2.1.2 Higroscopia..... | 29 |
| 2.1.3 Umidade | 30 |
| 2.1.4 Resistência | 31 |
| 2.1.4.1 Resistência à compressão | 31 |
| 2.1.4.2 Resistência ao cisalhamento e à flexão | 33 |
| 2.1.4.3 Resistência ao embutimento | 33 |
| 2.2 PROPRIEDADES DO PINO METÁLICO..... | 35 |
| 2.2.1 Pregos | 35 |
| 2.2.2 Parafusos | 36 |
| 2.3 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA | 38 |
| 2.3.1 Ligações em madeira com pinos metálicos | 41 |
| 2.3.1.1 Modelo de Johansen (1949) | 42 |
| 2.3.2 Resistência das ligações de acordo com a NBR 7190:1997 | 48 |
| 2.3.2.1 Valores de cálculo..... | 49 |
| 2.3.2.2 Classes de resistência e umidade..... | 55 |
| 2.3.2.3 Coeficientes de modificação | 56 |
| 2.3.3 Resistência das ligações de acordo com o EUROCODE 5..... | 57 |
| 2.3.3.1 Valores de cálculo..... | 57 |
| 2.3.3.2 Coeficiente de modificação | 58 |
| 2.3.4 Comparativo NBR 7190/97 e EUROCODE 5:2004 | 63 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 65 |
| 3.1 CONFIGURAÇÕES DAS LIGAÇÕES | 65 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 75 |
| 4.1 LIGAÇÕES COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO | 75 |
| 4.2 LIGAÇÕES COM VARIAÇÃO NA ESPESSURA | 85 |
| 4.3 ANÁLISE DE RESULTADOS..... | 115 |
| 5 CONCLUSÃO | 121 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 122 |

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A madeira é utilizada pela humanidade há muitos anos para inúmeros objetivos, e como material para a construção ela se torna extremamente vantajosa por conta de suas características físicas e químicas. É um material que possui boa resistência mecânica, capacidade de resistir a esforços de compressão e tração, baixa massa específica, bom comportamento em situações de incêndio, bom isolamento térmico, permite ligações e emendas e tem boa resiliência. (XAVIER, 2013)

Atualmente, com as crescentes preocupações mundiais quanto à redução dos impactos ambientais, a sustentabilidade passa a ser um ponto indispensável nas construções e a madeira exerce um papel fundamental, pois diminui a degradação e impacto ambiental da construção civil. (DIAS, 2015). No meio da construção civil a madeira pode ser utilizada em soluções para coberturas e telhados, para armazenamento, para painéis divisórios como wood frame e até mesmo como pilares e vigas.

Mesmo com grandes vantagens como material para construção, a madeira também possui algumas limitações quanto suas dimensões comerciais, uma vez que para a utilização em grandes estruturas é necessário fazer elementos de ligações entre as peças, através de anéis metálicos, cavilhas, parafusos, pregos, entre outros; entretanto, são nessas ligações em que se encontram os pontos de maior fragilidade e deformabilidade da estrutura, de forma que sua resistência é um fator limitante no dimensionamento. Dessa forma, a capacidade de carga das estruturas com ligações em madeira é determinada pela própria resistência de ligação, que deve ser suficiente e bem dimensionada para que a estrutura tenha durabilidade, resistência e segurança. (SILVA JUNIOR, 2017)

Figura 1 - Ligações em estruturas de madeira



Fonte: <https://www.zanchet.com.br/estrutura-madeira-telhado>

A fim de garantir que a estrutura suporte durante toda sua vida útil os esforços mais prejudiciais sem atingir o estado limite, documentos normativos foram criados para guiar o dimensionamento de estruturas de madeira. Tanto a ABNT NBR 7190/97 quanto o EUROCODE 5 foram criados usando como base o modelo apresentado no trabalho de maior notoriedade em ligações com pinos metálicos, desenvolvido por Johansen (1949). De formas similares, tanto a NBR 7190:1997 quanto o EUROCODE 5 mostram que o rompimento da ligação de madeira com pino metálico em corte simples e duplo pode ocorrer pela flexão do pino ou pelo embutimento do pino na madeira. O rompimento da ligação pelo embutimento do pino na madeira está diretamente ligado com quais espécies de madeiras estão sendo utilizadas – influenciando no cálculo da resistência de embutimento da madeira –, nas espessuras das peças utilizadas e também no ângulo de ligação.

Segundo Schwanz (2008) em seu estudo, mesmo a NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 advirem da mesma teoria básica eles apresentam diferenças significativas, principalmente analisando as ligações com duas seções de corte, até mesmo considerando madeiras com as mesmas propriedades mecânicas. Dorigon (2018) demonstra em seu trabalho que os resultados encontrados de forma experimental para resistência de ligações pregadas com duas espécies de madeira foram maiores do que os esperados em todas as situações, observando, no entanto, que o EN 1995-1-1 EUROCODE 5: 2004 possui resultados mais próximos aos experimentais do que a norma nacional NBR 7190/1997.

Ainda a respeito da análise de Dorigon (2018), foi comprovado que os valores de resistência da ligação da espécie *Pinus Taeda* foram 64,82% maiores do que os valores teóricos da NBR 7190:1997 e 28,85% maiores do que os valores do EN 1995-1-1 EUROCODE 5: 2004. Em comparação, para a espécie *Eucalyptus Grandis*, os valores experimentais são 86,50% maiores que os da NBR 7190:1997 e 32,12% maiores que os do EN 1995-1-1 EUROCODE 5: 2004. Assim, foi possível concluir que a norma europeia possui menor discrepância entre valores de resistência de coníferas e dicotiledôneas quando comparado com a norma brasileira, pois a segunda considera que as duas espécies de madeiras são tratadas como iguais no dimensionamento de ligações.

Segundo Baena (2015), os modelos teóricos estudados apresentam formulário diferentes para a resistência de ligações tanto em corte simples quanto em corte duplo, enquanto que a NBR 7190/97 não faz distinção entre esses casos. Ainda segundo Baena (2015), a norma brasileira considera o cálculo da resistência ao embutimento com base na resistência à compressão paralela às fibras, enquanto que a norma europeia usa como critério a densidade aparente da madeira e o diâmetro da madeira e em função disso os valores obtidos pela norma brasileira eram mais baixos em relação à norma europeia.

Logo, existem inúmeras diferenças entre os documentos normativos e fica evidente que a NBR 7190/97 é simplificada, restrita a algumas configurações de ligações e desconsidera efeitos, como o efeito de corda¹ e de atrito entre as peças, no resultado final da resistência da ligação; já o EUROCODE 5 apresenta equações mais robustas e detalhadas, dando atenção para uma maior gama de configurações de ligações.

Dessa forma, é imprescindível um estudo comparativo entre os modelos analíticos dos documentos normativos da ABNT NBR 7190/97 e o EUROCODE 5.

¹ De acordo com Reichert (2009), o efeito de corda é a tensão causada no pino metálico, devido a restrição rotacional ocasionada por uma arruela ou porca, e facilita o desenvolvimento de rótulas plásticas no pino.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar e comparar a variação da resistência de ligação com pino metálico entre a ABNT NBR 7190/97 e o EUROCODE 5 com variação de espessura e ângulo de ligação.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar a resistência das ligações utilizando a NBR 7190/1997.;
- b) Determinar as resistências das ligações pelo EUROCODE 5:2004;
- c) Analisar o comportamento das resistências de ligações pelos documentos normativos com a variação de espessuras;
- d) Analisar o comportamento das resistências de ligações pelos documentos normativos com a variação do ângulo de ligação;
- e) Comparar o comportamento da ligação apresentado pela NBR 7190/1997 e pelo EURODOCE 5:2004.

2 REVISÃO DA LITERATURA

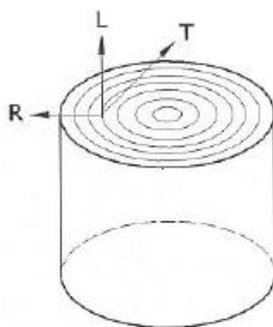
2.1 Propriedades da Madeira

Para que a madeira seja empregada na construção civil é necessário ter conhecimento de suas propriedades, principalmente físicas e mecânicas, para que sua utilização seja assertiva e segura, uma vez que essas propriedades são fatores que influenciam diretamente em seu comportamento. Serão expostas, a seguir, as principais propriedades da madeira.

2.1.1 Anisotropia

A anisotropia é uma propriedade física da madeira em que, devido à orientação das células, suas propriedades variam de acordo com a direção analisada. Na madeira, são consideradas como direções principais, as direções longitudinal, radial e tangencial (Figura 2). As propriedades normalmente são avaliadas de acordo com as variações entre a direção paralela às fibras e perpendicular às fibras, pois há pouca diferença de propriedades entre as direções radial e tangencial. (PFEIL & PFEIL, 2003)

Figura 2 – Anisotropia da madeira, indicando as direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T)



Fonte: PFEIL & PFEIL (2003).

2.1.2 Higroscopia

Segundo PEREIRA (2009):

Designa-se por higroscopicidade a propriedade que os materiais porosos têm para reterem nos seus poros uma certa quantidade de umidade existente no ambiente, até se atingir uma situação de equilíbrio, quando colocados no estado seco e estimula alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, tanto maior quanto menor for o seu conteúdo de água. (PEREIRA, 2009, p.14)

O conhecimento e entendimento da higroscopia da madeira é essencial para um uso eficaz do material, evitando principalmente problemas de retratibilidade, como empenamentos e fendilhamento, pois a variação do teor de umidade influencia na forma das peças e afeta diretamente a resistência mecânica do material. (SILVA; OLIVEIRA, 2003)

2.1.3 Umidade

A umidade pode ser encontrada na madeira no interior das suas fibras ou absorvidas pelas paredes das mesmas, de forma que quando é colocada para secar a água contida no interior das células é a primeira a evaporar, atingindo um grau de umidade aproximado a 30%. Ao dar continuidade com a secagem, o grau de umidade irá alcançar um ponto de equilíbrio com o ar do ambiente em que a madeira se encontra; para a referência em cálculos e avaliação das propriedades é utilizado um grau de umidade padrão, adotado como 12% no Brasil e nos Estados Unidos. (PFEIL & PFEIL, 2003)

Ainda conforme os autores, o teor de água é definido como a relação do peso de água contido na madeira com o peso da madeira totalmente seca, como indicado na Equação 1:

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

Onde:

P_i = peso inicial da madeira

P_s = peso seco da madeira

2.1.4 Resistência

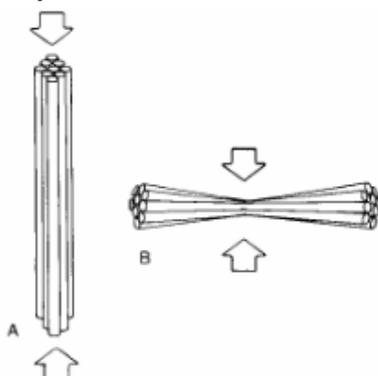
A resistência é uma propriedade mecânica relacionada com a tensão máxima aplicada no material antes de seu rompimento. Sua determinação depende diretamente das propriedades anisotrópicas e higroscópicas da madeira, pois ao mudar a direção e umidade consideradas, a propriedade também sofre alterações em seus valores. (PEREIRA, 2009)

Para se obter os valores de resistência da madeira para sua caracterização são feitos ensaios, descritos na NBR 7190/1997, de onde se obtém as resistências à compressão paralela e normal às fibras, resistências à tração paralela e normal às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e resistências ao embutimento paralelo e normal às fibras. (PFEIL & PFEIL, 2003)

2.1.4.1 Resistência à compressão

Ao avaliar a compressão de uma peça paralela às fibras, as solicitações ocorrem na mesma direção do comprimento das células da madeira, como mostra Figura 3, ou seja, as células serão encurtadas ao longo do eixo longitudinal, assim, o resultado é uma elevada resistência; com a solicitação acontecendo normal às fibras a resistência é menor, pois a célula na direção perpendicular ao seu comprimento tem menos resistência, podendo chegar a valores 75% menores do que a compressão paralela. Na compressão inclinada, a força age tanto de forma paralela quanto perpendicular às fibras. (CALIL JUNIOR et al., 1998)

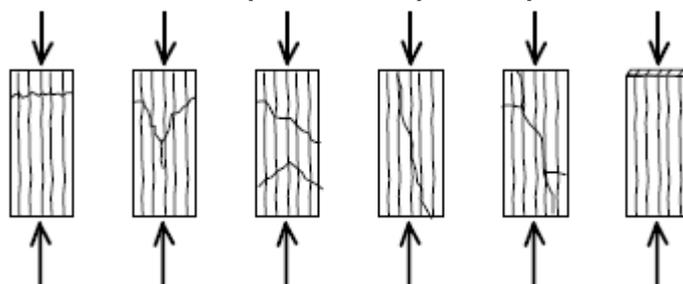
Figura 3 – Comportamento da madeira na compressão



Fonte: RITTER (1990).

De acordo com a NBR 7190, a resistência à compressão paralela às fibras é referente ao valor máximo atuante de tensão de compressão que um corpo de prova com seção transversal quadrada de 5,0cm e 15,0cm de comprimento. Com essas condições, Moreira (2004) apresenta que os modos de ruptura mais comuns ocorrem por esmagamento das fibras, por cisalhamento em cunha com superfícies de ruptura em Y, por cisalhamento com superfície de ruptura inclinada em relação às faces, por fendilhamento, por esmagamento combinado com cisalhamento e por fibrilação ou rolamento terminal das fibras, como mostra Figura 4.

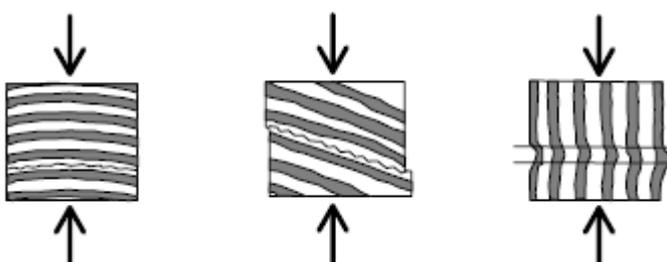
Figura 4 – Modos de ruptura na compressão paralela às fibras



Fonte: BODIG e JAYNE (1982).

A resistência à compressão normal usualmente chega a ter valores 75% menores do que a resistência à compressão paralela. O modo de ruptura da peça de madeira está diretamente relacionado com o carregamento da peça e a orientação dos anéis de crescimento da madeira, podendo ocorrer por esmagamento com a carga normal aos anéis de crescimento, por cisalhamento com a carga inclinada em relação aos anéis e por esmagamento com a carga paralela aos anéis. (MOREIRA, 2004), como mostra Figura 5.

Figura 5 – Modos de ruptura na compressão normal às fibras



Fonte: BODIG e JAYNE (1982).

2.1.4.2 Resistência ao cisalhamento e à flexão

De acordo com Szücs et al. (2016), o cisalhamento da madeira pode ocorrer de três maneiras: com a ação perpendicular às fibras, em que a peça irá romper demonstrando o esmagamento com compressão normal; com a ação aplicada longitudinalmente às fibras, onde o rompimento será por escorregamento horizontal entre as células da madeira ou com a ação aplicada perpendicularmente às linhas dos anéis de crescimento, representado na Figura 6.

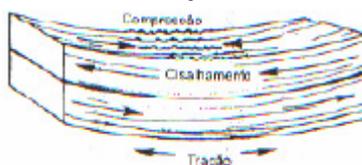
Figura 6 – Modos de ruptura no cisalhamento



Fonte: RITTER (1990).

Já na flexão simples, a ruptura das peças ocorrer a partir da formação de pequenas falhas de compressão e o conseqüente esmagamento macroscópico na região comprimida, representado na Figura 7. Assim, ocorre o aumento da área comprimida e a redução da área tracionada, criando tensões na peça capazes de causar o rompimento por tração. Com a flexão simples a peça sofre esforços de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e compressão normal às fibras. (SZÜCS et al., 2016)

Figura 7 – Modos de ruptura na flexão simples



Fonte: RITTER (1990).

2.1.4.3 Resistência ao embutimento

A resistência das ligações por pinos metálicos depende diretamente da resistência da madeira ao embutimento e da resistência do pino à flexão. As tensões

de embutimento existentes no furo da madeira podem ser causados tanto pela pressão aplicada pelo pino na cravação, que acarreta um estado múltiplo de tensões, quanto por uma ação externa. (ALMEIDA, 1987)

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997 a resistência da madeira ao embutimento é definida pela razão entre a força responsável por causar a deformação específica residual de 2‰ e a área de embutimento do pino, sendo a multiplicação entre a espessura da peça e o diâmetro do pino metálico, como mostra a Equação 2.

$$f_e = \frac{F_{e2\%}}{t \cdot d} \quad (2)$$

Onde:

f_e = resistência de embutimento da madeira;

$F_{e2\%}$ = força causadora da deformação específica residual de 2‰;

t = espessura da peça de madeira;

d = diâmetro do pino metálico.

A norma brasileira estipula também a determinação da resistência ao embutimento paralela e normal às fibras pois a ocorrem variações nos valores de resistência de acordo com a orientação das fibras; essas determinações podem ser feitas a partir de ensaios normatizados ou calculada a partir de relações com a resistência à compressão paralela às fibras, segundo Equações 3 e 4.

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

Onde:

$f_{e0,d}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras;

$f_{c0,d}$ = resistência à compressão paralela às fibras.

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

Onde:

$f_{e90,d}$ = resistência ao embutimento normal às fibras;

$f_{c0,d}$ = resistência à compressão paralela às fibras;

α_e = parâmetro que considera o diâmetro do pino, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de α_e

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| d(cm) | ≤0,62 | 0,95 | 1,25 | 1,60 | 1,90 | 2,20 | 2,50 | 3,10 | 3,80 | 4,40 | 5,00 | ≥7,50 |
| α_e | 2,50 | 1,95 | 1,68 | 1,52 | 1,41 | 1,33 | 1,27 | 1,19 | 1,14 | 1,10 | 1,07 | 1,00 |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

Ainda de acordo com a NBR 7190:1997, para calcular a resistência da madeira ao embutimento em uma direção qualquer inclinada de um ângulo α em relação às fibras deve ser utilizada a equação de Hankinson, conforme mostra Equação 5:

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

Onde:

f_{e0} = resistência ao embutimento paralelo às fibras;

f_{e90} = resistência ao embutimento normal às fibras;

α = ângulo da inclinação;

$f_{e\alpha}$ = resistência ao embutimento em uma direção qualquer.

2.2 Propriedades do pino metálico

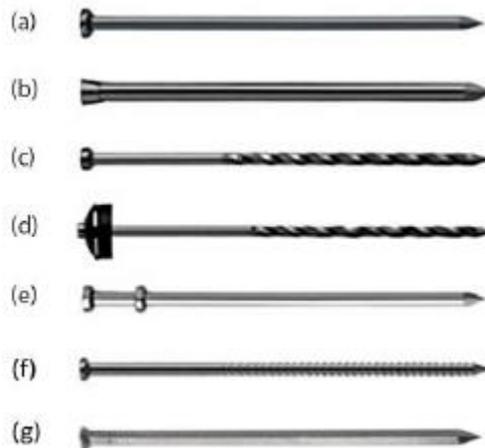
Os pinos metálicos podem ser classificados em pregos, barras de aço lisas, parafusos passantes sextavados com porcas e arruelas ou do tipo francês e parafusos anuto-atarraxantes. Segundo a NBR 7190/97 os pinos metálicos devem atender às especificações de suas respectivas normas: os parafusos devem respeitar a norma NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, especialmente ao Método dos Estados Limites e respeitar diâmetros de 10mm, 12,5mm ou 16mm; já os pregos devem seguir a norma NBR 6627 – Pregos Comuns e Arestas de Aço para Madeiras.

2.2.1 Pregos

Os pregos são peças metálicas cravadas na madeira por meio de impacto, muito comumente utilizados nas construções de madeira (JUNIOR, 2017). Existem inúmeros tipos de pregos, e, de acordo com Dias (2013), os mais usados

nacionalmente são os pregos com cabeça de fuste circular cilíndrico, prego sem cabeça, prego ardox, prego telheiro galvanizado, prego com cabeça dupla, prego anelado e prego quadrado, conforme figura 8 abaixo.

Figura 8 – Tipos de prego – (a) prego com cabeça de fuste circular cilíndrico, (b) prego sem cabeça, (c) prego ardox, (d) prego telheiro, (e) prego com cabeça dupla, (f) prego anelado e (g) prego quadrado.



Fonte: Junior, 2013.

Além disso, a cabeça do prego normalmente é circular e sua seção apresenta diferentes geometrias, podendo ser circular, quadrangular ou triangular. Eles são produzidos a partir de aço e não devem ter resistência à tração menor do que 600MPa, e geralmente são usados quando os esforços a serem transferidos sejam baixas (ALMEIDA, 2012).

2.2.2 Parafusos

Os parafusos, assim como os pregos, são utilizados para a fixação e união de peças e são diferenciados pela forma da rosca, da cabeça, da haste e do tipo de acionamento. De acordo com o STEP 1 (1995) os parafusos podem ser passantes ou auto-atarraxantes, enquanto que segundo Pfeil e Pfeil (2003) os parafusos são divididos entre parafusos rosqueados auto-atarraxantes e parafusos passantes.

Em ligações onde há a necessidade de transmitir esforços elevados e de inserir na ligação uma maior resistência ao arranque a utilização de parafusos auto-atarraxantes é a solução mais adequada, e pode ser usada em ligações madeira-

madeira, madeira-aço e em produtos derivados da madeira (PORTEOUS E KERMANI, 2007).

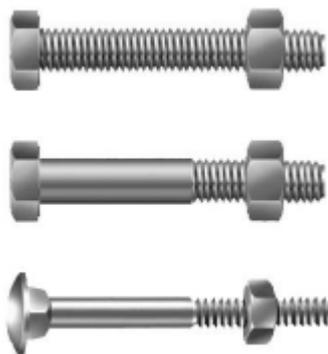
Figura 9 – Parafuso auto-atarraxante



Fonte: Junior, 2013

De acordo com Porteous e Kermani (2007), os parafusos passantes são utilizados em conjunto com porcas, arruelas e contra porcas, dependendo do projeto e as necessidades da estrutura, e são usados em ligações em que as cargas são muito maiores do que as cargas nas estruturas em que são usadas pregos e os parafusos auto-atarraxantes. Os tipos de parafusos passantes utilizados são os parafusos sextavado rosca inteira, parafuso sextavado com rosca parcial e parafuso francês.

Figura 10 – Tipos de parafusos passantes



Fonte: Junior, 2013

Os parafusos são dimensionados e especificados pela sua geometria e pelas características do aço utilizado de acordo com a norma CEN ISSO 4016 (200) e CEN ISSO 898-1 (1999). A NBR 8800/2008 apresenta os valores mínimos de resistência ao escoamento e da resistência a ruptura para diversos parafusos especificados pela norma, conforme mostra tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Materiais usados em parafusos e suas resistências

| Especificação | Tensão de escoamento f_y (MPa) | Tensão Última f_u (MPa) |
|--|-------------------------------------|------------------------------|
| ASTM A307 | - | 415 |
| ISO 4016 Classe 4.6 | 235 | 400 |
| ASTM A325 ^a | 635 | 825 |
| | 560 | 725 |
| ISO 4016 Classe 8.8 | 640 | 800 |
| ASTM A490 | 895 | 1035 |
| ISO 4016 Classe 10.9 | 900 | 1000 |
| ^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588. | | |

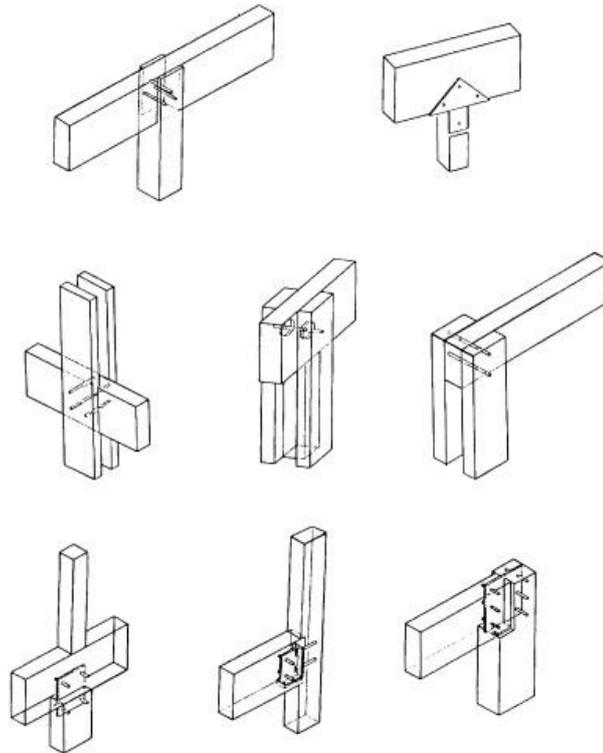
Fonte: Adaptado ABTN NBR 8800/2008

As porcas são especificadas pela norma CEN ISSO 4034 (1999) e as arruelas para parafusos em estruturas de madeira são especificados pela norma DIN 440 (2001), havendo a separação do dimensionamento para arruelas redondas com furo central redondo pela DIN 440R e as arruelas redondas com furo central quadrado pela DIN 440V. Arruelas quadradas são regidas pela norma DIN 436 (1990).

2.3 Ligações em Estruturas de Madeira

A madeira possui limitações quanto ao tamanho das peças comerciais, especialmente quando utilizada na construção civil como elemento estrutural. Para resolver o problema são feitas ligações entre uma ou mais peças de madeira aumentando a capacidade de atingir vãos maiores sem prejuízos na resistência. De acordo com PFEIL & PFEIL (2003) os tipos de ligação empregados são por colagem, entalhes, braçadeiras, pinos, parafusos, pregos ou conectores metálicos.

Figura 11 – Exemplos de ligações em madeiras – vigas e pilares



Fonte: GOVIC, 1995 (Adaptado)

As ligações nas estruturas de madeira são pontos onde há extrema concentração de esforços e, portanto, é preciso dimensioná-las da forma correta para garantir a segurança da estrutura como um todo. 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 encaixas e entalhes ou em que há elementos externos, como pinos metálicos que fazem a função de fixar e transmitir os esforços. (CALIL JUNIOR et al., 2003)

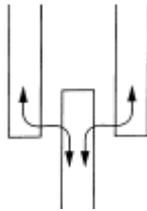
Segundo Le Govic (1995) as ligações em madeira são classificadas em três grupos, dependendo da forma como os esforços serão transmitidos entre as ligações. A transmissão de esforços pode ser de forma direta, onde não existem dispositivos entre as peças de madeira, como ocorre nos entalhes e em que os esforços transmitidos são normais ou cortantes; a transmissão também pode ser por justaposição, onde há uma superfície de transpasse ligando as peças, normalmente feita por adesivos ou conectores, transmitindo esforços normais de tração ou compressão, cortantes ou momentos; por último, a transmissão pode ocorrer de forma indireta, através de elementos intermediários como adesivos ou itens metálicos, onde os esforços podem ser normais de tração ou compressão, cortantes ou momentos.

Figura 12 – Transmissão direta



Fonte: GOVIC, 1995

Figura 13 – Transmissão por justaposição



Fonte: GOVIC, 1995

Figura 14 – Transmissão indireta



Fonte: GOVIC, 1995

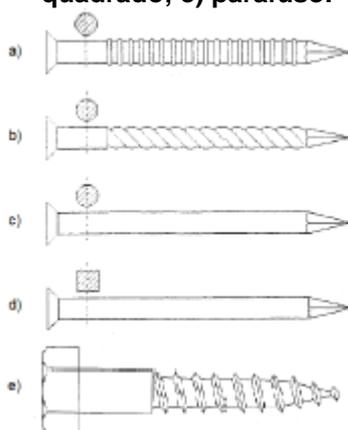
Ainda, segundo o Timber Engineering STEP 1 (1995) existe uma distinção entre ligações de carpintaria, como encaixes ou entalhes, e ligações metálicas, feitas pelos inúmeros tipos de conectores; ainda entre as ligações metálicas há uma divisão, dependendo no modo como as forças são transmitidas entre os membros da ligação, podendo ser, de acordo com STEP 1 (1995):

- *Metal dowel type fasteners*, conexão tipo pino metálico onde o esforço é transmitido através da ação do elemento metálico de ligação. O comportamento da ligação será regido pelos modos de falha estudados por Johansen (1949).
- *Bearing-type connectors*, como chapas de dentes estampados e anéis metálicos, em que o esforço é transmitido através da superfície próxima ao conector. O cálculo é realizado utilizando as tensões de cisalhamento e compressão na madeira.

2.3.1 Ligações em madeira com pinos metálicos

Ligações em madeira com pinos metálicos podem ser feitas por meio de pregos, parafusos ou pinos. Os pregos são utilizados em ligações de montagem ou definitivas, sendo cravados com impacto; os parafusos podem ser auto-atarraxantes ou com porcas e arruelas, sendo o segundo mais utilizado para ligações estruturais e os pinos normalmente são instalados em furos inferiores ao seu diâmetro feitos à máquina, para evitar deformação relativa. (PFEIL & PFEIL, 2003)

Figura 15 – Pinos metálicos: a) prego anelar; b) prego torcido; c) prego redondo liso; d) prego quadrado; e) parafuso.



Fonte: PFEIL, 2003 (adaptado)

Segundo Calil Junior et al (2003) a ligação com pinos metálicos é a mais utilizada por possuir inúmeros modelos de pinos, baixo custo em comparação com outros conectores e por não ter variação de propriedades mecânicas em diferentes condições de uso. Além disso, de acordo com Almeida (1987), é com ligações com pinos metálicos que é possível obter elementos com rigidez elevada, sendo uma idealização mais próxima possível da realidade.

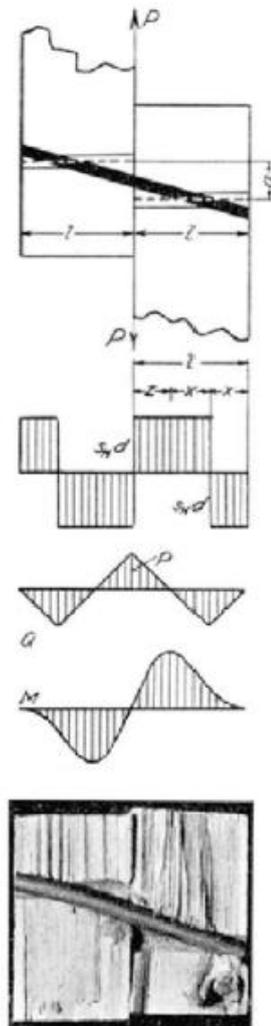
Johansen (1949) realizou estudos sobre a utilização de pinos metálicos em ligações e a partir de seu modelo de cálculo para a resistência das ligações foi determinado que mais de quatro modos de ruptura podem ocorrer numa conexão, variando de acordo com a resistência ao embutimento do pino na madeira e a resistência ao escoamento do conector.

2.3.1.1 Modelo de Johansen (1949)

Assumindo que a madeira e o pino metálico possuem um comportamento perfeitamente plástico, Johansen (1949) elaborou equações para calcular a resistência da ligação para cada modo de ruptura observado através de ensaios realizados onde os esforços solicitados eram paralelos às fibras e, tanto para corte simples quanto para corte duplo, as peças que compunham o corpo de prova possuíam a mesma espessura e mesma espécie de madeira. Ainda segundo o autor, os modos de falhas que podem ocorrer em uma ligação dependem diretamente dos efeitos de embutimento da madeira e da flexão do pino metálico.

Johansen (1949) mostra que para ligações em corte simples com um pino suficientemente rígido a resistência da ligação é determinada pela resistência ao embutimento da madeira, quando a ligação sofre a ação de forças opostas e de mesmo módulo, como mostra Figura 16. Isso ocorre, pois, o esforço solicita as peças de mesma espessura e espécie paralelamente às suas fibras fazendo com o que o pino gire por conta do momento, portanto, é estabelecido que a tensão gerada na superfície de contato do pino com a madeira é constante em toda a extensão, se igualando à tensão de resistência ao embutimento da madeira. (JOHANSEN, 1949)

Figura 16 – Modo de ruptura para corte simples com pino rígido



Fonte: JOHANSEN (1949).

Assim, Johansen (1949) formulou que a força aplicada à ligação com o pino metálica é função da resistência ao embutimento da madeira, do diâmetro do pino e da espessura dos elementos ligados, conforme Equação 6.

$$F_k = 0,414 \cdot f_{e0,k} \cdot l \cdot d \quad (6)$$

Onde:

F_k = força característica;

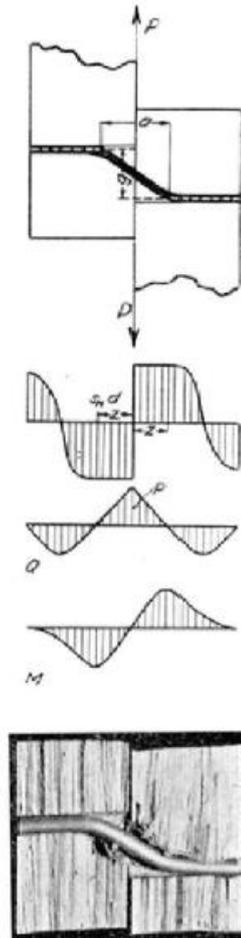
$f_{e0,k}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras;

l = espessura da peça de madeira;

d = diâmetro do pino metálico.

Em ligações em corte simples onde as peças são de mesma espessura e espécie, mas o pino metálico não possui rigidez suficiente, Johansen (1949) mostra que a resistência da ligação é ditada pela resistência à flexão do pino metálico, pois ao solicitar a ligação, o pino também tenderá a girar, entretanto, irá atingir o momento de plastificação, representado na Figura 17.

Figura 17 – Modo de ruptura para corte simples com pino pouco rígido



Fonte: JOHANSEN (1949).

Nos pontos onde ocorre a flexão do pino metálico também é considerado que atingiu a resistência ao embutimento da madeira, pois o esmagamento na região é muito forte. A partir disso, Johansen (1949) formulou que a força aplicada à ligação é função da resistência ao embutimento da madeira, do diâmetro do pino e da resistência característica ao escoamento do aço, conforme Equação 7.

$$F_k = 0,442 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e0,k} \cdot d^2} \quad (7)$$

Onde:

F_k = força característica;

$f_{e0,k}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras;

$f_{y,k}$ = resistência característica ao escoamento do aço;

d = diâmetro do pino metálico.

O rompimento de uma ligação que possui corte duplo e um pino suficientemente rígido acontecerá devido ao embutimento da madeira, podendo ocorrer tanto no elemento central da ligação quanto nos adjacentes. Quando a espessura da peça central for maior ou igual duas vezes a espessura das peças adjacentes, a falha poderá ocorrer nas peças adjacentes, conforme Equação 8 e Figura 18; entretanto, caso a espessura da peça central for menor que o dobro da espessura das peças adjacentes, como mostra Figura 19, a ruptura poderá ocorrer no elemento central, conforme Equação 9. (JOHANSEN, 1949)

$$F_k = f_{e0,k} \cdot d \cdot 2l \quad (8)$$

Onde:

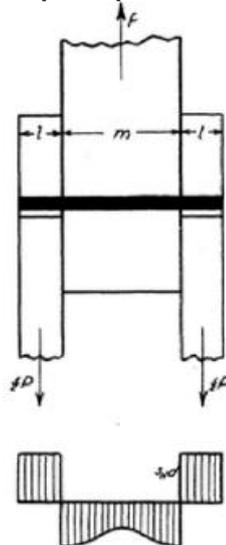
F_k = força característica;

$f_{e0,k}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras;

l = espessura dos elementos adjacentes;

d = diâmetro do pino metálico.

Figura 18 – Modo de ruptura para corte duplo em que $m \geq 2l$



Fonte: JOHANSEN (1949).

$$F_k = f_{e0,k} \cdot d \cdot m \quad (9)$$

Onde:

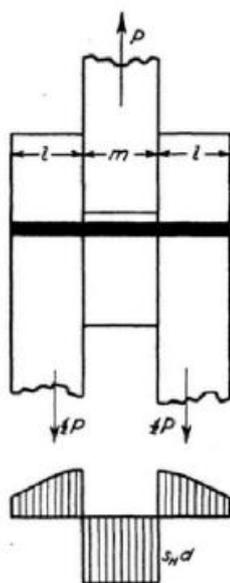
F_k = força característica;

$f_{e0,k}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras;

m = espessura do elemento central;

d = diâmetro do pino metálico.

Figura 19 – Modo de ruptura para corte duplo em que $m < 2l$



Fonte: JOHANSEN (1949).

De forma similar ao modo de ruptura para corte simples onde o pino não possui rigidez suficiente, no caso em que a ligação é submetida à corte duplo com o pino sem rigidez suficiente, a ruptura será de acordo com a resistência à flexão do pino. Nessa situação também ocorrerá a plastificação do pino em dois pontos, exatamente onde a madeira também estará sujeita à tensão limite de resistência ao embutimento pela rotação do pino, conforme Equação 10 e Figura 20. (JOHANSEN, 1949)

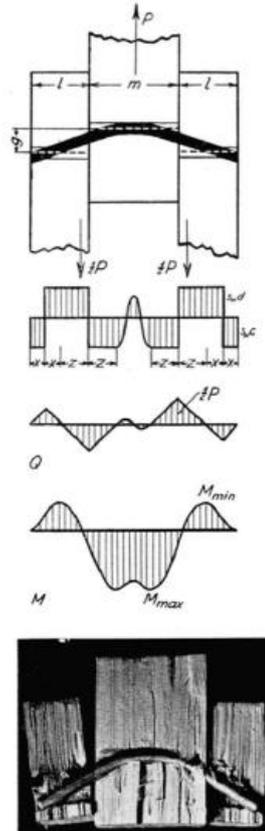
$$F_k = \frac{2}{3} \cdot f_{e0,k} \cdot d \cdot l \cdot \left(\sqrt{4 + \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{f_{y,k}}{f_{e0,k}} \cdot \frac{d^2}{l^2}} - 1 \right) \quad (10)$$

Onde:

F_k = força característica;

$f_{e0,k}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras;
 $f_{y,k}$ = resistência característica ao escoamento do aço;
 l = espessura dos elementos adjacentes;
 d = diâmetro do pino metálico.

Figura 20 – Modo de ruptura 1 para corte duplo com pino sem rigidez



Fonte: JOHANSEN (1949).

Além desse modo de ruptura, para a mesma situação de corte duplo e pino metálico sem rigidez suficiente, Johansen (1949) diz que a falha também pode ocorrer com a plastificação do pino em quatro pontos e, portanto, é considerado que a madeira atinge o limite de resistência ao embutimento na região entre os pontos de plastificação, conforme Equação 11 e Figura 21:

$$F_k = 0,885 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e0,k} \cdot d^2} \quad (11)$$

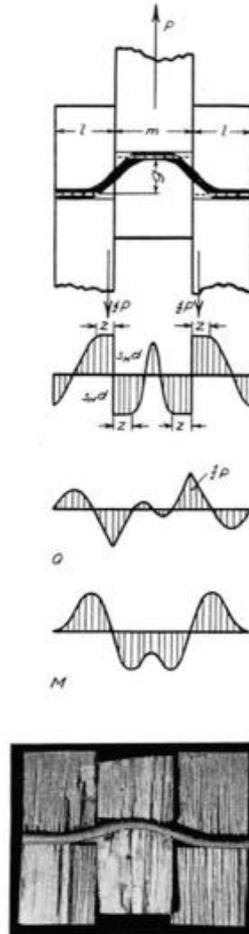
Onde:

F_k = força característica;

$f_{e0,k}$ = resistência ao embutimento paralelo às fibras;

$f_{y,k}$ = resistência característica ao escoamento do aço;
 d = diâmetro do pino metálico.

Figura 21 – Modo de ruptura 2 para corte duplo com pino sem rigidez



Fonte: JOHANSEN (1949).

2.3.2 Resistência das ligações de acordo com a NBR 7190:1997

A NBR 7190:1997 fez a formulação de seus cálculos usando como base o modelo de Johansen (1949), considerando dois modos de ruptura distintos: falha por embutimento do pino na ligação considerando as espessuras das peças e falha por flexão do pino metálico.

Para o cálculo da resistência das ligações a norma brasileira faz algumas considerações prévias, como a quantidade adequada de pinos, diâmetro e resistência ao escoamento mínimo. Não é permitido pela norma ligações com apenas um pino e as que são feitas com dois ou três pinos só podem ser utilizadas em ligações

articuladas por serem consideradas deformáveis; ligações rígidas são aquelas com quatro ou mais pinos e, para tanto, a norma recomenda que haja uma pré-furação e que a mesma seja feita com um diâmetro menor do que o diâmetro do pino acrescido de 0,5mm.

Além disso, os pinos não devem ter diâmetros menores que 10mm e sua resistência ao escoamento deve ser maior ou igual à 240MPa. Para ligações em que existem até oito pinos em linha a resistência total da mesma é a soma das resistências de cada um dos parafusos e, para ligações com mais de oito pinos, os excedentes têm sua resistência minorada em 1/3.

2.3.2.1 Valores de cálculo

Para realizar o cálculo e determinar qual será a ruptura de uma ligação específica, a NBR 7190:1997 recomenda que seja evitada a ruptura localizada por conta da tração normal às fibras, pois pode ocorrer o fendilhamento da peça e a ruptura ocorrer na abertura de fissura nas fibras e para tanto é necessária que a verificação, de forma a limitar essa possibilidade, demonstrada na Equação 13 seja cumprida:

$$V_d \leq \frac{2f_{v,d}b_e t}{3} \quad (13)$$

Sendo:

V_d = Força cortante fictícia determinada por $V_1 + V_2 = F \sin \alpha$, conforme mostra Figura 15;

$f_{v,d}$ = Resistência de cálculo ao cisalhamento;

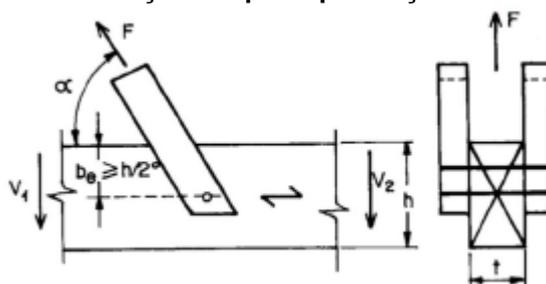
b_e = Distância do eixo do pino mais afastado até a borda do lado da solicitação, sendo

$b_e \geq \frac{h}{2}$, sendo h a altura total da seção transversal da peça principal, conforme mostra

Figura 5;

t = Espessura da peça principal;

Figura 22 – Verificação à ruptura por tração normal às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Para determinar qual será o mecanismo de ruptura da ligação, a norma brasileira usa o parâmetro β , como mostra a Equação 14 a seguir:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (14)$$

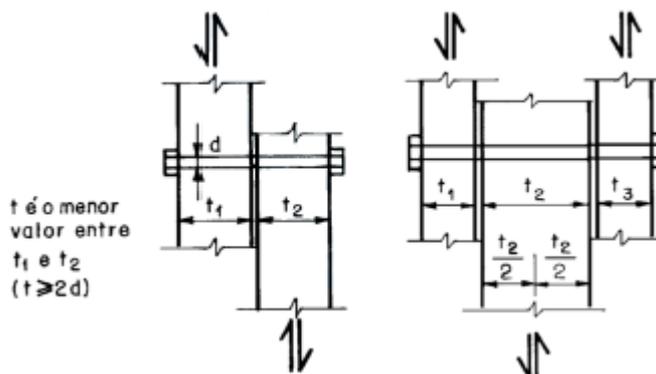
Sendo:

β = Parâmetro de cálculo;

t = Espessura convencional determinada como mostra Figura 16;

d = Diâmetro do pino metálico;

Figura 23 – Determinação da espessura convencional para cortes simples e duplo



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

De acordo com a norma a espessura convencional para corte simples é a menor espessura entre t_1 e t_2 , e o diâmetro do parafuso deve ser menor do que a espessura convencional t dividida por dois; para corte duplo, a espessura t é considerada como o menor valor entre t_1 , t_2 dividido por dois e t_3 .

Além do parâmetro β a norma também propõe um limite para o mesmo parâmetro, conforme Equação 15:

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} \quad (15)$$

Onde:

β_{lim} = Parâmetro de cálculo limite;

$f_{y,d}$ = Resistência do pino à flexão;

$f_{e,d}$ = Resistência da madeira ao embutimento;

A partir da comparação entre β e β_{lim} é determinado o modo de ruptura da ligação.

Quando $\beta \leq \beta_{lim}$ o modo de ruptura da ligação é caracterizado pelo embutimento na madeira e a resistência da ligação de uma seção de corte será, conforme Equação 16:

$$R_{v,d1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{e,d} \quad (16)$$

Sendo:

$R_{v,d1}$ = Resistência da ligação em uma seção de corte;

t = Espessura convencional;

β = Parâmetro de cálculo;

$f_{e,d}$ = Resistência da madeira ao embutimento.

Para o caso de $\beta > \beta_{lim}$ o modo de ruptura da ligação é caracterizado pela flexão do pino e a resistência da ligação de uma seção de corte será, conforme Equação 17:

$$R_{v,d1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,d} \quad (17)$$

Onde:

$R_{v,d1}$ = Resistência da ligação em uma seção de corte;

d = Diâmetro do pino;

β_{lim} = Parâmetro de cálculo limite;

$f_{y,d}$ = Resistência de cálculo do pino ao escoamento, conforme Equação 18:

$$f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_s} \quad (18)$$

Sendo:

$f_{y,k}$ = Resistência característica do pino ao escoamento;

γ_s = Coeficiente de minoração da resistência do aço, $\gamma_s = 1,1$.

Vale ressaltar que a NBR 7190:1997 traz que a determinação das propriedades características de resistência da madeira pode ser feito através de ensaios padronizados, mas também apresenta um cálculo de caracterização simplificado baseado no ensaio de compressão paralela às fibras, como mostram as Equações 19 a 25:

$$f_{t0,k} = 0,77f_{c0,k} \quad (19)$$

$$f_{tM,k} = 0,77f_{c0,k} \quad (20)$$

$$f_{c90,k} = 0,25f_{c0,k}\alpha_n \quad (21)$$

$$f_{e0,k} = f_{c0,k} \quad (22)$$

$$f_{e90,k} = 0,25f_{c0,k}\alpha_e \quad (23)$$

$$f_{v0,k} = 0,15f_{c0,k} \rightarrow \text{para coníferas} \quad (24)$$

$$f_{v0,k} = 0,12f_{c0,k} \rightarrow \text{para dicotiledôneas} \quad (25)$$

Onde:

$f_{t0,k}$ = Resistência característica à tração paralela às fibras;

$f_{tM,k}$ = Resistência característica à tração na flexão;

$f_{c90,k}$ = Resistência característica à compressão normal às fibras;

$f_{e0,k}$ = Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras;

$f_{e90,k}$ = Resistência característica ao embutimento normal às fibras;

$f_{v0,k}$ = Resistência característica ao cisalhamento na presença de tensões tangenciais paralelas às fibras;

α_n = Coeficiente que considera a dispersão de tensões para peças submetidas à compressão normal às fibras, com a carga afastada em pelo menos 7,5cm da extremidade da peça, conforme tabela 3.

α_e = Coeficiente que considera a dispersão das tensões devido ao embutimento normal às fibras, conforme tabela 4.

A norma brasileira traz os seguintes valores para os coeficientes a_n e a_e :

Tabela 3 – Valores de α_n

| Extensão da carga normal às fibras, medida paralelamente a estas (cm) | α_n |
|---|------------|
| 1 | 2,00 |
| 2 | 1,70 |
| 3 | 1,55 |
| 4 | 1,40 |
| 5 | 1,30 |
| 7,5 | 1,15 |
| 10 | 1,10 |
| 15 | 1,00 |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

Tabela 4 – Valores de α_e

| Diâmetro do pino (cm) | α_e |
|-----------------------|------------|
| $\leq 0,62$ | 2,50 |
| 0,95 | 1,95 |
| 1,25 | 1,68 |
| 1,6 | 1,52 |
| 1,9 | 1,41 |
| 2,2 | 1,33 |
| 2,5 | 1,27 |
| 3,1 | 1,19 |
| 3,8 | 1,14 |
| 4,4 | 1,10 |
| 5,0 | 1,07 |
| $\geq 7,5$ | 1,00 |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

Quando a solicitação for inclinada em relação às fibras em um ângulo α menor ou igual a 6° , a norma brasileira permite ignorar sua influência; já para ângulos maiores que 6° a norma considera necessária a redução de resistência através da adoção da Equação 26, fórmula de Hankinson:

$$f_\alpha = \frac{f_0 f_{90}}{f_0 \sin^2 \alpha + f_{90} \cos^2 \alpha} \quad (26)$$

Em que:

f_α = Resistência característica para a inclinação α ;

f_0 = Resistência característica paralela às fibras;

f_{90} = Resistência característica normal às fibras;

α = Ângulo formado entre a força aplicada e as fibras.

A utilização de peças com ângulo variado é muito recorrente em sistemas de treliças e em estruturas de telhados, conforme mostra a Figura 31:

Figura 24 – Módulo de treliça invertido para ensaio



Fonte: Fernández; Junior; Molina, 2011.

Para a determinação das resistências de cálculo a NBR 7190:1997 traz a Equação 27:

$$f_d = k_{mod} \frac{f_k}{\gamma} \quad (27)$$

Onde:

f_d = Resistência de cálculo;

k_{mod} = Coeficiente de modificação;

f_k = Resistência característica;

γ = Coeficiente de ponderação das resistências;

2.3.2.2 Classes de resistência e umidade

A fim de auxiliar a escolha do melhor material para projetos estruturais, a norma brasileira criou um sistema de Classes de Resistência com madeiras com propriedades padronizadas, como mostram as tabelas 5 e 6 a seguir:

Tabela 5 – Classes de resistência das coníferas

| Coníferas (Valores na condição padrão de referência U = 12%) | | | | | |
|---|-------------------------|------------------------|-------------------------|---|--|
| Classes | F _{c,0k} (Mpa) | F _{v,k} (Mpa) | E _{c0,m} (Mpa) | ρ _{bas,m} (Kg/m ³) | ρ _{aparente} (Kg/m ³) |
| C 20 | 20 | 4 | 3500 | 400 | 500 |
| C 25 | 25 | 5 | 8500 | 450 | 550 |
| C 30 | 30 | 6 | 14500 | 500 | 600 |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

Tabela 6 – Classes de resistência das dicotiledôneas

| Dicotiledôneas (Valores na condição padrão de referência U = 12%) | | | | | |
|--|-------------------------|------------------------|-------------------------|---|--|
| Classes | F _{c,0k} (Mpa) | F _{v,k} (Mpa) | E _{c0,m} (Mpa) | ρ _{bas,m} (Kg/m ³) | ρ _{aparente} (Kg/m ³) |
| C 20 | 20 | 4 | 9500 | 500 | 650 |
| C 30 | 30 | 5 | 14500 | 650 | 800 |
| C 40 | 40 | 6 | 19500 | 750 | 950 |
| C 60 | 60 | 8 | 24500 | 800 | 1000 |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

Em relação ao teor de umidade da madeira, a norma brasileira considera que a umidade relativa do ambiente é dividida em quatro classes com suas respectivas umidades de equilíbrio da madeira, de acordo com a tabela 7. Como a madeira é um material higroscópico, a partir desses valores é possível adaptar os resultados das suas propriedades.

Tabela 7 – Classes de umidade

| Classes de umidade | Umidade relativa do ambiente U _{amb} | Umidade de equilíbrio da madeira U _{eq} |
|--------------------|---|--|
| 1 | U _{amb} ≤ 65% | 12% |
| 2 | 65 < U _{amb} ≤ 75% | 15% |
| 3 | 75 < U _{amb} ≤ 85% | 18% |
| 4 | U _{amb} > 85% | 25% |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

2.3.2.3 Coeficientes de modificação

O coeficiente de modificação k_{mod} tem influência direta nos valores de cálculo pois leva em consideração os efeitos de duração de carregamento, a umidade do ambiente e qualidade da madeira. Cada um desses efeitos é determinado por coeficientes parciais tabelados e, o cálculo de k_{mod} é demonstrado na Equação 28, de acordo com a norma brasileira.

$$k_{mod} = k_{mod1}k_{mod2}k_{mod3} \quad (12)$$

Sendo:

k_{mod} = Coeficiente de modificação;

k_{mod1} = Coeficiente de modificação parcial relacionado à classe de carregamento e tipo de madeira, conforme tabela 8;

k_{mod2} = Coeficiente de modificação parcial relacionado à classe de umidade do ambiente e tipo de madeira, conforme tabela 9;

k_{mod3} = Coeficiente de modificação parcial relacionado à qualidade da madeira quanto a presença de nós.

Tabela 8 – Valores de k_{mod1}

| 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: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

Tabela 9 – Valores de k_{mod2}

| Classes de umidade | Madeira Serrada Madeira laminada colada Madeira compensada | Madeira recomposta |
|--------------------|--|--------------------|
| (1) e (2) | 1,0 | 1,0 |
| (3) e (4) | 0,8 | 0,9 |

Fonte: ABNT NBR 7190:1997 (Adaptado)

De acordo com a norma brasileira, o coeficiente parcial k_{mod3} difere se a madeira é de primeira categoria, ou seja, se todas as peças forem classificadas como isentas de defeitos, ou de segunda categoria. Para coníferas, tanto de primeira quanto de segunda categoria, o k_{mod3} será igual a 0,8; para as dicotiledôneas de primeira categoria $k_{mod3} = 1,0$ e as de segunda categoria $k_{mod3} = 0,8$.

Quanto ao coeficiente de ponderação das resistências, a NBR 7190:1997 determina que sejam diferentes para cada uma das solicitações; para compressão paralela às fibras $\gamma_c = 1,4$, para tração paralela às fibras $\gamma_t = 1,8$ e para cisalhamento paralelo às fibras temos que $\gamma_v = 1,8$.

2.3.3 Resistência das ligações de acordo com o EUROCODE 5

O EUROCODE 5 (2004) formulou seus cálculos para a determinação da resistência das ligações usando como base o modelo de Johansen (1949), entretanto, de forma diferente da norma brasileira, foram consideradas equações diferentes para ligações em corte simples e corte duplo, além da consideração de efeitos como o de corda e força de atrito entre as peças.

2.3.3.1 Valores de cálculo

Da mesma forma que a NBR 7190:1997, o EUROCODE 5:2004 também limita a possibilidade de que a ruptura ocorra pela ruptura por tração normal às fibras, ou seja, pelo fendilhamento da peça, e para tanto a norma europeia traz a verificação das condições nas Equação 28 e 29:

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (28)$$

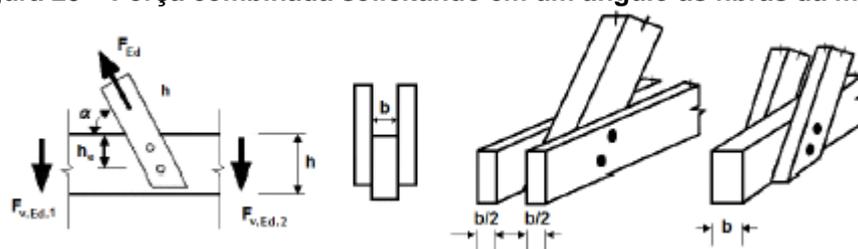
$$F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases} \quad (29)$$

Onde:

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

$F_{v,Ed,1}, F_{v,Ed,2}$ = Resistência de projeto ao cisalhamento de cada lado do conector, mostradas na figura 24.

Figura 25 – Força combinada solicitando em um ângulo as fibras da madeira



Fonte: EUROCODE 5:2004

A resistência de projeto de tração normal às fibras é calculada pela norma europeia da seguinte forma, como mostra Equação 30:

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{Y_M} \quad (30)$$

Onde:

R_d = Resistência característica;

Y_M = Coeficiente que depende da propriedade do material;

k_{mod} = Fator modificador que leva em consideração o efeito de duração da carga e umidade.

2.3.3.2 Coeficiente de modificação

Assim como na norma brasileira, o coeficiente de modificação k_{mod} também influencia diretamente nos valores de cálculo pelo EUROCODE 5:2004, entretanto, o coeficiente é determinado de acordo com o tipo de material, com a classe de serviço e com a duração das ações, como mostra Tabela 10.

De acordo com o EUROCODE 5:2004, as classes de serviço representadas na tabela 9 dependem diretamente da umidade dos materiais e do ambiente. A classe de serviço 1 corresponde a umidade contida no material correspondente à uma temperatura de 20°C e a umidade relativa do ar excedendo 65% somente por algumas semanas no ano; a classe de serviço 2 também corresponde a umidade do material para temperatura de 20°C, mas a umidade relativa do ar deve exceder 85% por algumas semanas no ano; já a classe de serviço 3 é caracterizada por condições climáticas que levam a umidades superiores à da classe de serviço 2.

Tabela 10 – Valores de k_{mod}

| Material | Classe de serviço | Duração das ações | | | | |
|----------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| | | Permanente | Longa duração | Média duração | Curta duração | Instantânea |
| Maciça | 1 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 2 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 3 | 0,5 | 0,55 | 0,65 | 0,7 | 0,9 |
| Laminada colada | 1 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 2 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 3 | 0,5 | 0,55 | 0,65 | 0,7 | 0,9 |
| LVL | 1 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 2 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 3 | 0,5 | 0,55 | 0,65 | 0,7 | 0,9 |
| Compensado | 1 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 2 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 |
| | 3 | 0,5 | 0,55 | 0,65 | 0,7 | 0,9 |
| OSB | 1 | 0,3 | 0,45 | 0,65 | 0,85 | 1,1 |
| | 1 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| | 2 | 0,3 | 0,4 | 0,55 | 0,7 | 0,9 |
| Aglomerado de partículas | 1 | 0,3 | 0,45 | 0,65 | 0,85 | 1,1 |
| | 2 | 0,2 | 0,3 | 0,45 | 0,6 | 0,8 |
| | 1 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| | 2 | 0,3 | 0,4 | 0,55 | 0,7 | 0,9 |
| Aglomerado de fibras duro | 1 | 0,3 | 0,45 | 0,65 | 0,85 | 1,1 |
| | 2 | 0,2 | 0,3 | 0,45 | 0,6 | 0,8 |
| Aglomerado de fibras médio | 1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,1 |
| | 1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,1 |
| | 2 | - | - | - | 0,45 | 0,8 |
| MDF | 1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,1 |
| | 2 | - | - | - | 0,45 | 0,8 |

Fonte: EUROCODE 5:2004 (Adaptado)

Além do coeficiente de modificação k_{mod} , há também outro coeficiente Y_M que influencia diretamente no cálculo da resistência da ligação de acordo com a norma europeia. Esse coeficiente varia de acordo com a propriedade do material utilizado, conforme mostra a tabela 11.

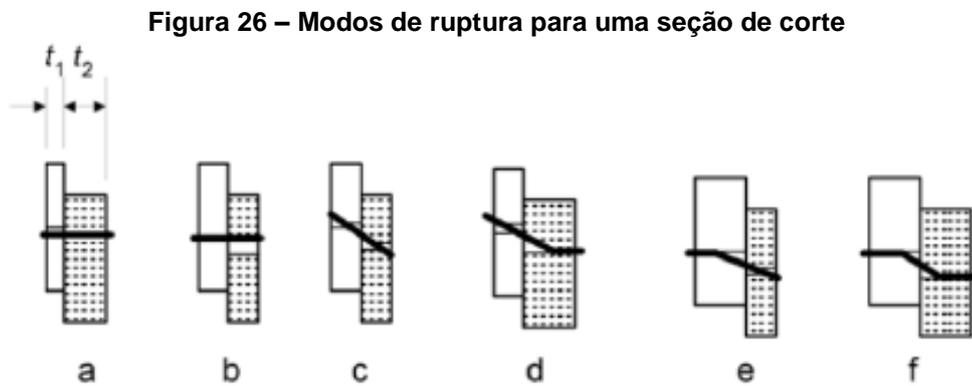
Tabela 11 - Coeficiente Y_M recomendado para resistência e propriedades do material

| Combinações fundamentais | Y_M |
|--------------------------|-------|
| Madeira maciça | 1,3 |
| Madeira laminada colada | 1,25 |
| LVL, Compensado, OSB | 1,2 |

| | |
|--|------|
| Aglomerado de partículas de madeira | 1,3 |
| Aglomerado de partículas de madeira duro | 1,3 |
| Aglomerado de partículas de madeira semi-duro | 1,3 |
| Aglomerado de partículas de madeira de média densidade (MDF) | 1,3 |
| Aglomerado de partículas de madeira brando | 1,3 |
| Ligações | 1,3 |
| Ligações em placas metálicas perfuradas | 1,25 |
| Combinações acidentais | 1,0 |

Fonte: EUROCODE 5:2004 (Adaptado)

Para o cálculo da resistência das ligações por pinos metálicos por plano de corte, o EUROCODE 5:2004 traz os seguintes modelos de falha, demonstrados na Figura 25:



Fonte: EUROCODE 5:2004

Para cada um dos modos de ruptura apresentados a norma europeia elaborou relações e o valor característico da resistência ($F_{V,Rk}$) será o menor valor entre os resultados das Equações 31 a 36:

$$(a) f_{h,1,k} t_1 d \quad (31)$$

$$(b) f_{h,2,k} t_2 d \quad (32)$$

$$(c) \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (33)$$

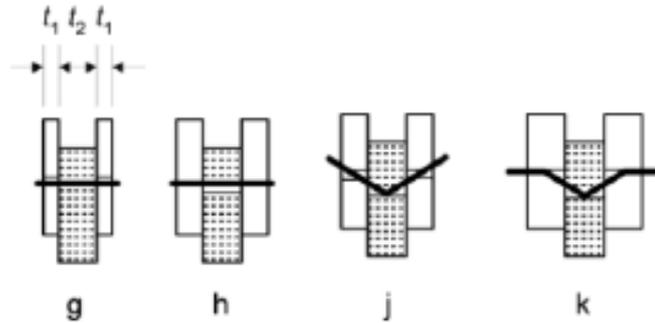
$$(d) 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (34)$$

$$(e) 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_2^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (35)$$

$$(f) 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (36)$$

Para as ligações com corte duplo a norma europeia traz os quatro modelos de ruptura mostrados na figura 26 e suas respectivas fórmulas representadas nas Equações 37 a 40:

Figura 27 – Modos de ruptura para duas seções de corte



Fonte: EUROCODE 5:2004

$$(g) f_{h,1,k} t_1 d \quad (37)$$

$$(h) 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \beta \quad (38)$$

$$(j) 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (39)$$

$$(k) 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (40)$$

Onde:

$F_{v,Rk}$ = Resistência característica referente à um plano de corte;

t_1 = Espessura da peça 1;

t_2 = Espessura da peça 2;

$f_{h,1,k}$ = Resistência característica ao embutimento da peça 1;

$f_{h,2,k}$ = Resistência característica ao embutimento da peça 2;

d = Diâmetro do parafuso;

$M_{y,Rk}$ = Momento de plastificação do parafuso;

β = Relação entre as resistências de embutimento, sendo conforme Equação 41:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (41)$$

$F_{ax,Rk}$ = Resistência característica de ancoragem.

De acordo com o EUROCODE 5:2004 o cálculo da capacidade ao embutimento paralelo às fibras para ligações pré-furadas é definida pela Equação 42:

$$f_{h0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (42)$$

Sendo:

$f_{h0,k}$ = Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras;

d = Diâmetro do pino;

ρ_k = Densidade característica da madeira.

Caso o embutimento seja feito com algum ângulo em relação às fibras a norma europeia utiliza uma variação da fórmula de Hankinson, como mostram Equações 43 e 44:

$$f_{h\alpha,k} = \frac{f_{h0,k}}{k_{90} \sin^2\alpha + \cos^2\alpha} \quad (43)$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d \rightarrow \text{para coníferas} \\ 0,90 + 0,015d \rightarrow \text{para dicotiledôneas} \end{cases} \quad (44)$$

Sendo:

$f_{h\alpha,k}$ = Resistência característica ao embutimento em um ângulo α em relação às fibras;

$f_{h0,k}$ = Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras;

α = Ângulo da solicitação em relação às fibras;

d = Diâmetro do pino.

Por fim, o momento de plastificação de conectores ocorre quando acontece a flexão do pino e a norma europeia determina seu cálculo a partir da Equação 45:

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (45)$$

Onde:

$M_{y,Rk}$ = Momento de plastificação do parafuso;

$f_{u,k}$ = Resistência última do parafuso;

d = Diâmetro do parafuso.

2.3.4 Comparativo NBR 7190/97 e EUROCODE 5:2004

De forma geral, podemos verificar que existem diferenças entre os formulários apresentados pela NBR 7190/97 e pelo EUROCODE 5:2004. A norma brasileira apresenta duas fórmulas para o cálculo da resistência de ligação, ambas utilizadas para corte simples e corte duplo; já a norma europeia apresenta seis fórmulas para o cálculo da resistência de ligação em corte simples e outras quatro fórmulas para o mesmo cálculo em corte duplo.

Tabela 12 - Comparativo de formulário para corte simples

| CORTE SIMPLES | |
|--|--|
| NBR 7190/97 | EUROCODE 5:2004 |
| | $f_{h,1,k} t_1 d$ |
| | $f_{h,2,k} t_2 d$ |
| $R_{v,d1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{e,d}$ | $\frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ |
| $R_{v,d1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,d}$ | $1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ |
| | $1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_2^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ |
| | $1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ |

Fonte: Autora

Tabela 13 - Comparativo de formulário para corte duplo

| CORTE DUPLO | |
|--|--|
| NBR 7190/97 | EUROCODE 5:2004 |
| $R_{v,d1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{\epsilon,d}$ | $f_{h,1,k} t_1 d$ |
| $R_{v,d1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,d}$ | $0,5 f_{h,2,k} t_2 d \beta$ |
| | $1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ |
| | $1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}$ |

Fonte: Autora

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho será desenvolvido em duas etapas principais: o cálculo das resistências teóricas pela NBR 7190/97 e EUROCODE 5:2004 para as ligações escolhidas e a comparação dos resultados por ambos os documentos normativos, como mostra Figura 27.

Figura 28 – Fluxograma das atividades



Fonte: do autor.

Para a realização das comparações foi determinado que as características dos materiais envolvidos sejam sempre determinadas pela NBR 7190, como as propriedades básicas da madeira e resistência do pino metálico. As propriedades básicas da madeira foram retiradas a partir do Anexo E da NBR 7190/97, como a resistência à compressão paralela às fibras e a massa específica aparente a 12% de umidade. A resistência e diâmetro do pino metálico foi definido a partir da consideração da NBR 7190/97 de que os parafusos estruturais não tenham diâmetros menores que 10mm e que sua resistência característica ao escoamento seja de, pelo menos, 240MPa.

Para a avaliação das resistências por cada um dos documentos normativos será utilizado o software Excel®, onde será desenvolvida uma planilha de cálculo. Afim de realizar a comparação foram determinados parâmetros variáveis e fixos para as ligações.

3.1 Configurações das ligações

Para a determinação das ligações foi necessário definir quais madeiras serão utilizadas, qual o tipo de corte, qual o ângulo de solicitação, qual pino metálico será utilizado e quais serão as espessuras das peças de madeira.

Primeiramente foi definido que irão ter em sua composição duas espécies diferentes de madeiras, sendo elas *Pinus Elliottii* e *Eucalyptus Citriodora*, por serem madeiras normalmente utilizadas em projetos de estruturas de madeira e por possuírem resistências e classificações diferentes de acordo com a NBR 7190/97.

De acordo com o Anexo E da NBR 7190/97 a espécie *Pinus Elliottii* é uma madeira conífera com massa específica aparente a 12% de umidade de 645 kg/m³ e resistência à compressão paralela às fibras de 44,44 MPa; já a *Eucalyptus Citriodora* é uma espécie de madeira dicotiledônea com massa específica aparente a 12% de umidade de 999 kg/m³ e resistência à compressão paralela às fibras de 62,0 MPa.

A partir dos cálculos de caracterização simplificado da NBR 7190/97 e do valor retirado do Anexo E da norma brasileira de resistência à compressão paralela às fibras foi determinado os seguintes valores de resistência:

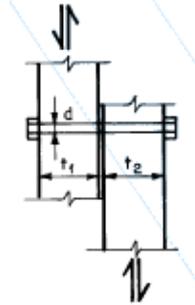
Tabela 14 – Propriedades básicas da madeira

| Propriedades básicas da madeira | | |
|--|----------------------------|---------------------------------|
| (MPa) | Pinus Elliottii (1) | Eucalipto Citriodora (2) |
| fc0 (12%) | 40,40 | 62,00 |
| fc90 | 10,10 | 15,50 |
| fc45 | 12,74 | 19,55 |
| fe0 | 40,40 | 62,00 |
| fe45 | 23,90 | 36,68 |
| fe90 | 16,97 | 26,04 |
| fc0,k | 28,28 | 43,40 |
| fc45,k | 8,92 | 13,68 |
| fc90,k | 7,07 | 10,85 |
| fe0,k | 28,28 | 43,40 |
| fe45,k | 16,73 | 25,67 |
| fe90,k | 11,88 | 18,23 |

Fonte: Autora

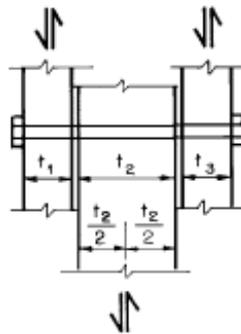
Para o tipo de corte foi definido que as ligações seriam submetidas tanto à corte duplo quanto à corte simples, como mostram figuras 28 e 29.

Figura 29 – Corte simples



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Figura 30 – Corte duplo



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Para o pino metálico foi determinado a utilização de apenas um tipo de pino, sendo este um pino liso de aço CA-25 com diâmetro de 12,5mm e resistência característica ao escoamento de 250MPa. Serão utilizadas arruelas lisas de 1/2" para travamento do pino metálico, pois será considerada a influência do efeito de corda no valor da resistência de ligação.

Tabela 15 – Propriedade do pino metálico

| Propriedades básicas do pino | |
|------------------------------|--------|
| d (mm) | 12,5 |
| Fyk (MPa) | 250 |
| Fyd (MPa) | 227,27 |

Fonte: Autora

Os parâmetros variáveis das ligações projetadas serão o ângulo de ligação e as espessuras das peças de madeira. Para o ângulo de ligação será feita a variação de 0° à 90°, de acordo com tabela 14.

Tabela 16 – Variação do ângulo de ligação

| Ângulo de ligação |
|-------------------|
| 0º |
| 5º |
| 10º |
| 15º |
| 20º |
| 25º |
| 30º |
| 35º |
| 40º |
| 45º |
| 50º |
| 55º |
| 60º |
| 65º |
| 70º |
| 75º |
| 80º |
| 85º |
| 90º |

Fonte: do autor.

Ainda referente à variação do ângulo de ligação, foi determinado que a espessura das peças, tanto para corte simples quanto para corte duplo, será fixada em valores coerentes com os mais utilizados e comprados no mercado da construção civil. Assim, temos os seguintes tipos de ligações para corte simples e corte duplo com a variação do ângulo, mostrados na Tabela 15 e Tabela 16:

Tabela 17 – Ligações avaliadas para corte simples com variação do ângulo

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO - LIGAÇÃO I | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Fixo em 20mm | Fixo em 15mm | Fixo em 0° | Varia de 0° a 90° |

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO - LIGAÇÃO II | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Fixo em 45mm | Fixo em 50mm | Fixo em 0° | Varia de 0° a 90° |

Fonte: Autora

Tabela 18 – Ligações avaliadas para corte simples duplo com variação do ângulo

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO - LIGAÇÃO I | | | |
|---|---|---------------------------|---------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citroedora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citroedora (°) |
| Fixo em 20mm | Fixo em 45mm | Varia de 0° a 90° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO - LIGAÇÃO II | | | |
|--|---|---------------------------|---------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citroedora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citroedora (°) |
| Fixo em 20mm | Fixo em 50mm | Varia de 0° a 90° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO - LIGAÇÃO III | | | |
|---|---|---------------------------|---------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citroedora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citroedora (°) |
| Fixo em 45mm | Fixo em 20mm | Varia de 0° a 90° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO - LIGAÇÃO IV | | | |
|--|---|---------------------------|---------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citroedora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citroedora (°) |
| Fixo em 50mm | Fixo em 20mm | Varia de 0° a 90° | Fixo em 0° |

Fonte: Autora

Para a espessura das peças de madeira, tanto nas ligações com corte simples quanto com corte duplo, terá a variação da espessura das peças de 20mm à 80mm, demonstrado pela tabela 17.

Tabela 19 – Variação do da espessura das peças

| Espessura (mm) |
|----------------|
| 20 |
| 25 |
| 30 |
| 35 |
| 40 |
| 45 |
| 50 |
| 55 |
| 60 |
| 65 |
| 70 |
| 75 |
| 80 |

Fonte: do autor.

A variação de espessura ocorrerá em apenas uma das peças enquanto que a outra irá ser fixa em valores padrões encontrados no mercado, como 15mm, 20mm e 45mm. Além disso, o ângulo da ligação será sempre fixo em 0°, 45° e 90°. Assim, temos os seguintes tipos de ligações para corte simples e corte duplo com a variação da espessura de ligação, mostrados na tabela 18 e 19:

Tabela 20 – Ligações avaliadas para corte simples com variação da espessura

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO I | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 20mm | Fixo em 0° | Fixo em 0° |

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO II | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 15mm | Fixo em 0° | Fixo em 0° |

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO III | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 20mm | Fixo em 0° | Fixo em 90° |

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO IV | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 15mm | Fixo em 0° | Fixo em 90° |

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO V | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 20mm | Fixo em 0° | Fixo em 45° |

| CORTE SIMPLES COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO VI | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 15mm | Fixo em 0° | Fixo em 45° |

Fonte: Autora

Tabela 21 – Ligações avaliadas para corte duplo com variação da espessura

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO I | | | |
|--|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixa em 45mm | Fixo em 0° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO II | | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixa em 20mm | Fixo em 0° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO III | | | |
|--|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Fixa em 45mm | Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 0° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO IV | | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Fixa em 20mm | Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 0° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO V | | | |
|--|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixa em 45mm | Fixo em 90° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO VI | | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixa em 20mm | Fixo em 90° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO VII | | | |
|--|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Fixa em 45mm | Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 90° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO VIII | | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Fixo em 20mm | Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 90° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO IX | | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 45mm | Fixo em 45° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO X | | | |
|--|--|---------------------------|--------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citrodora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citrodora (°) |
| Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 20mm | Fixo em 45° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO XI | | | |
|---|---|---------------------------|---------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citroedora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citroedora (°) |
| Fixo em 45mm | Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 45° | Fixo em 0° |

| CORTE DUPLO COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA - LIGAÇÃO XII | | | |
|--|---|---------------------------|---------------------------------|
| Espessura Pinus Elliotti - Externo (mm) | Espessura Eucalipto Citroedora - Central (mm) | Ângulo Pinus Elliotti (°) | Ângulo Eucalipto Citroedora (°) |
| Fixo em 20mm | Varia de 20mm a 80mm | Fixo em 45° | Fixo em 0° |

Fonte: Autora

Serão calculados os resultados de resistência da ligação e local de rompimento de acordo com a NBR 7190/1997, de acordo com o EUROCODE 5:2004 e também será feito o cálculo da Resistência Crítica, de acordo com a NBR 7190/1997. A resistência crítica foi incluída no cálculo para fazer uma avaliação da própria norma brasileira, pois em seu dimensionamento é sempre considerado a menor espessura, conforme foi apresentado anteriormente. A resistência crítica será o menor valor entre três resistências de ligação: a resistência de ligação pela NBR 7190/97, a resistência de ligação considerando a espessura e resistência do elemento de pinus e a resistência de ligação considerando a espessura e resistência do elemento de eucalipto.

As duas resistências de ligações extras calculadas Rvd1 e Rvd2 serão, caso a verificação de rompimento seja de embutimento, regidas pela Equação 46 e a espessura t será considerada tanto a do pinus quanto a do Eucalipto, assim como suas respectivas resistências de embutimento. Caso o rompimento seja verificado como flexão do pino, as resistências Rvd1 e Rvd2 serão regidas pela Equação 47. No caso da flexão do pino não há diferenças quanto ao cálculo, pois não é considerado a espessura da peça ou sua resistência ao embutimento.

$$R_{v,d1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{e,d} \quad \text{Equação (46)}$$

$$R_{v,d1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,d} \quad \text{Equação (47)}$$

A avaliação da resistência crítica será apenas para comparação direta com os resultados obtidos da resistência de ligação de acordo com a NBR 7190/97.

Além disso, no cálculo da resistência de ligação pelo EUROCODE 5:2004 também será verificado os resultados considerando e desconsiderando o efeito de corda.

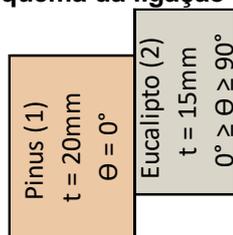
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos de valores de resistência de ligação e local de ruptura para os tipos de ligações apresentados no item anterior, tanto pela NBR 7190:1997 quanto pelo EUROCODE 5:2004.

4.1 Ligações com variação do ângulo

Para a ligação tipo I com corte simples, o EUROCODE 5:2004 apresenta valores de resistência que decrescem à medida que se aumenta o ângulo de ligação e o modo de ruptura é considerado, até 30° , como rotação do pino com embutimento em ambas as peças e de 35° a 90° há a mudança para embutimento na peça 2, de eucalipto.

Figura 31 - Esquema da ligação I corte simples

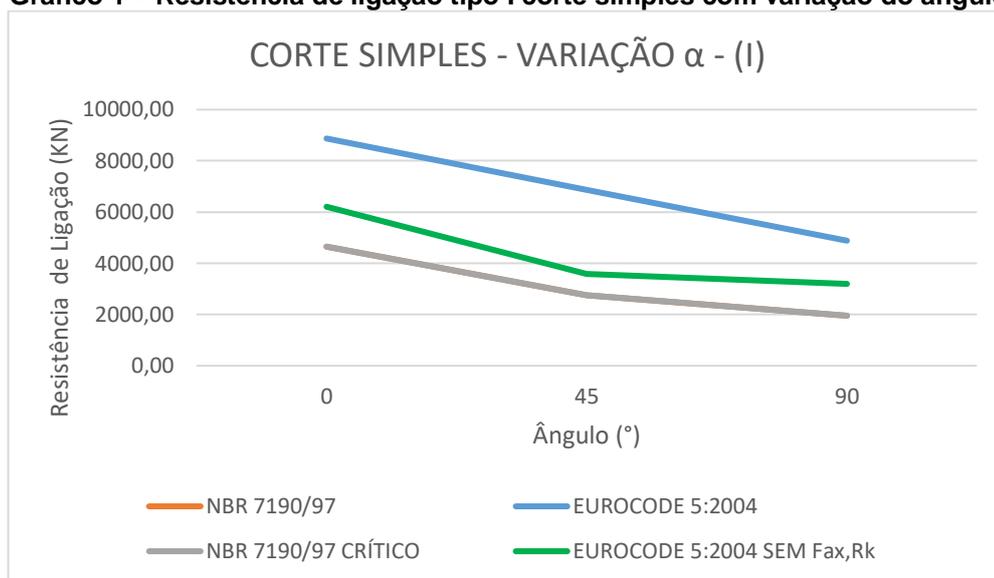


Fonte: Autora

A norma brasileira também apresenta o decréscimo da resistência conforme o ângulo de ligação aumenta, mas com valores significativamente menores e o modo de ruptura sempre é considerado como embutimento na peça de eucalipto. Nesse caso a resistência crítica acompanhou os resultados da norma brasileira, tanto em valores quanto em local de ruptura.

No mesmo tipo de ligação, mas desconsiderando o acréscimo do efeito de corda no cálculo pelo EUROCODE 5:2004, para ambas as normas manteve o decréscimo da resistência conforme o ângulo aumentava, mas o local de ruptura pela norma europeia sofreu alterações previsíveis: em 0° o rompimento era por rotação do pino com embutimento na peça de pinus e formação de uma rótula plástica e de 5° a 90° ocorria a rotação do pino com embutimento em ambas as peças.

Gráfico 1 – Resistência de ligação tipo I corte simples com variação do ângulo



Fonte: Autora

Tabela 22 – Modos de ruptura para ligação I corte simples com variação do ângulo

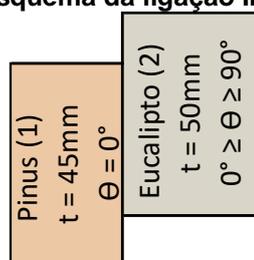
| LIGAÇÃO I | | | |
|---------------|-------------------|--|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento na peça 1 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |

Fonte: Autora

Para a ligação tipo II ainda em corte simples a norma europeia continuou a apresentar o decréscimo, mais leve, da resistência com o aumento do ângulo e todo o rompimento ocorreu devido a rotação do pino com embutimento em ambas as peças; entretanto, a norma brasileira apresentou um acréscimo da resistência, com

valores acima até da norma europeia, conforme o ângulo variava de 0° a 40° e se manteve constante entre 45° a 90° . Isso ocorreu pois de 0° a 40° o rompimento da ligação estava ocorrendo pela flexão do pino na madeira, já que a resistência ao embutimento nessas angulações da peça de pinus era grande o suficiente para que β fosse maior do que β_{lim} ; a partir de 45° começou a ocorrer o embutimento da peça de menor espessura, o pinus.

Figura 32 - Esquema da ligação II corte simples



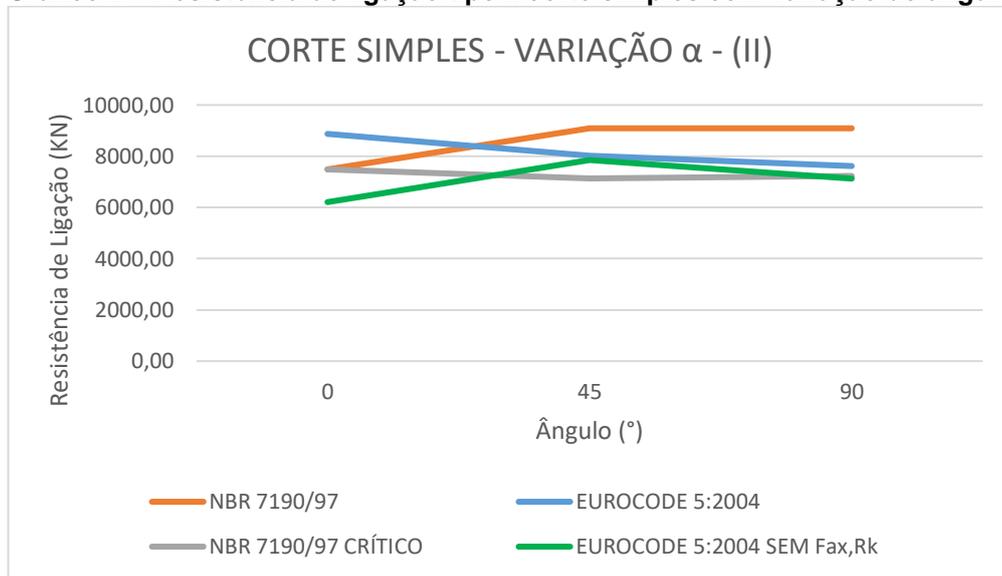
Fonte: Autora

Além da divergência de modo de ruptura com a norma europeia, a norma brasileira também apresenta diferenças quanto à resistência crítica. Como a resistência crítica é o menor valor entre três resistências calculadas pela interpretação da norma brasileira, entre 0° a 35° a peça de pinus é responsável pelos menores valores de resistência por conta de seu β_{lim} no cálculo da resistência à flexão do pino; entretanto, entre 40° e 70° a resistência crítica demonstra que a resistência da ligação ainda será dependente da flexão do pino, pois a verificação do β_{lim} utilizando a resistência da peça de eucalipto apresenta valores menores que β e, conseqüentemente, o cálculo da flexão do pino apresenta valores menores do que os considerados para embutimento na peça de pinus. Ainda, entre 75° e 90° a resistência crítica aponta que o modo de ruptura muda mais uma vez, para embutimento da peça de eucalipto, pois, mesmo que β_{lim} passe a ser maior que β , a resistência ao embutimento da peça de eucalipto apresenta valores menores do que a resistência ao embutimento da peça de pinus. Isso também ocorre pois nesse tipo de ligação a peça de pinus foi determinada a estar em 0° , enquanto que a de eucalipto era a responsável por fazer a variação da angulação entre 0° e 90° .

Para a mesma ligação tipo II, mas desconsiderando o efeito de corda no cálculo do EUROCODE 5:2004 vemos que a NBR 7190/97 chega em valores de resistência maiores do que a norma europeia em toda a variação do ângulo. Além disso, de forma

esperada, o modo de ruptura pela norma europeia modifica de rotação do pino com embutimento em ambas as peças para, em 0°, rotação do pino com embutimento na peça de pinus e formação de uma rótula plástica e de 5° a 90° sendo rotação do pino sem embutimento e com formação de duas rótulas plásticas.

Gráfico 2 – Resistência de ligação tipo II corte simples com variação do ângulo



Fonte: Autora

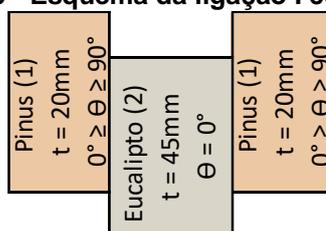
Tabela 23 – Modos de ruptura para ligação II corte simples com variação do ângulo

| LIGAÇÃO II | | | |
|----------------|-------------------|--|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax, Rk |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento na peça 1 e formação de 1 rótula plástica |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Flexão do Pino | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 1 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino sem embutimento e com formação de 2 rótulas plásticas |

Fonte: Autora

Entrando nas ligações de corte duplo, para o tipo I de ligação temos novamente o decréscimo da resistência conforme o ângulo de ligação aumenta, tanto para a norma europeia quanto para a brasileira. Além disso, ambas as normas chegam no resultado de que a ruptura irá ocorrer por embutimento nas peças externas de pinus. Não houveram diferenças recorrentes da resistência crítica.

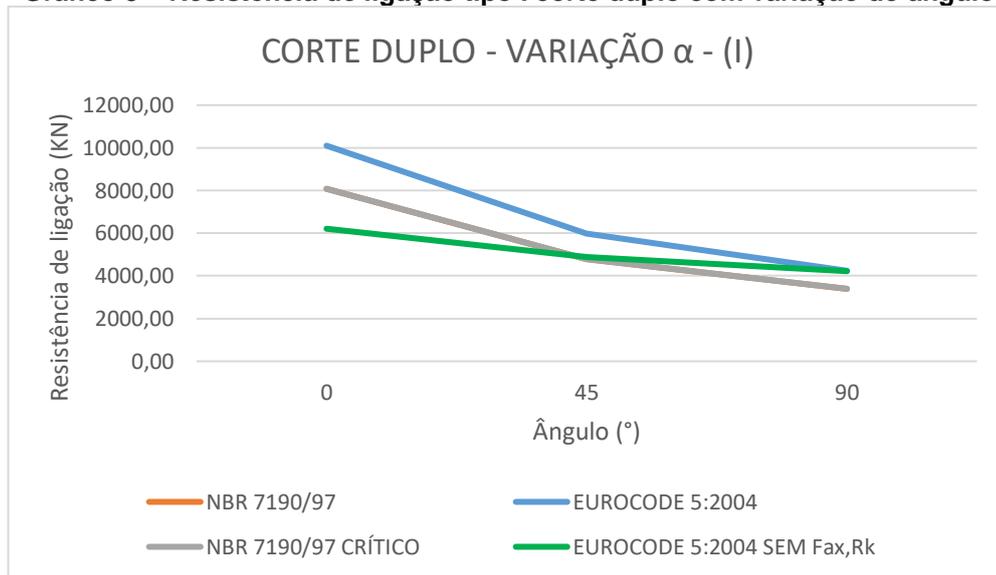
Figura 33 - Esquema da ligação I corte duplo



Fonte: Autora

Para o mesmo tipo de ligação I, mas desconsiderando o efeito de corda, temos que os valores do EUROCODE5 5:2004 se tornam menores do que os da NBR 7190/97 entre os ângulos de 0° a 40° e se tornam maiores a partir de 45° adiante. Além disso, há a mudança esperada no modo de ruptura considerado pela norma europeia, antes embutimento das peças externas e agora flexão do pino com a formação de uma rótula plástica.

Gráfico 3 – Resistência de ligação tipo I corte duplo com variação do ângulo



Fonte: Autora

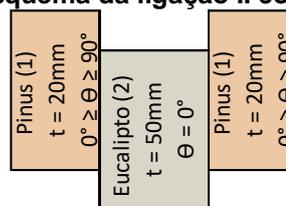
Tabela 24 – Modos de ruptura para ligação II corte duplo com variação do ângulo

| LIGAÇÃO I | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

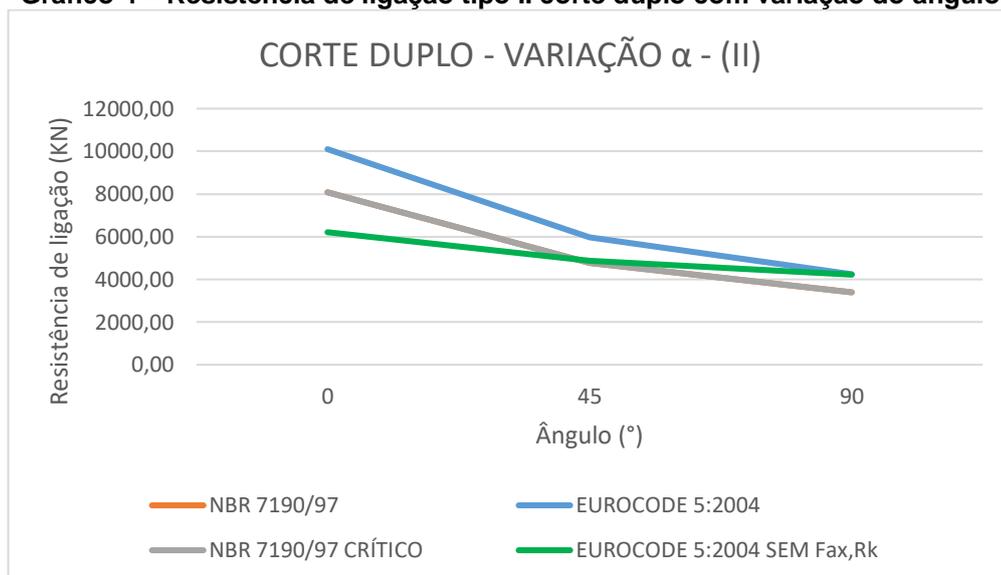
Na ligação tipo II com corte duplo mais uma vez a norma brasileira e a europeia se aproximam na determinação do rompimento ocorrer através da peça de pinus externa, pois é a peça com menor resistência ao embutimento e menor espessura em comparação com a peça de central de eucalipto. Além disso a variação entre as ligações I e II ocorre apenas no aumento da espessura da peça central de eucalipto e, nesse caso, tanto para a norma europeia quanto para a norma brasileira os valores de resistência de ligação não se alteraram. O mesmo ocorre para a avaliação da ligação sem considerar o efeito de corda.

Figura 34 - Esquema da ligação II corte duplo



Fonte: Autora

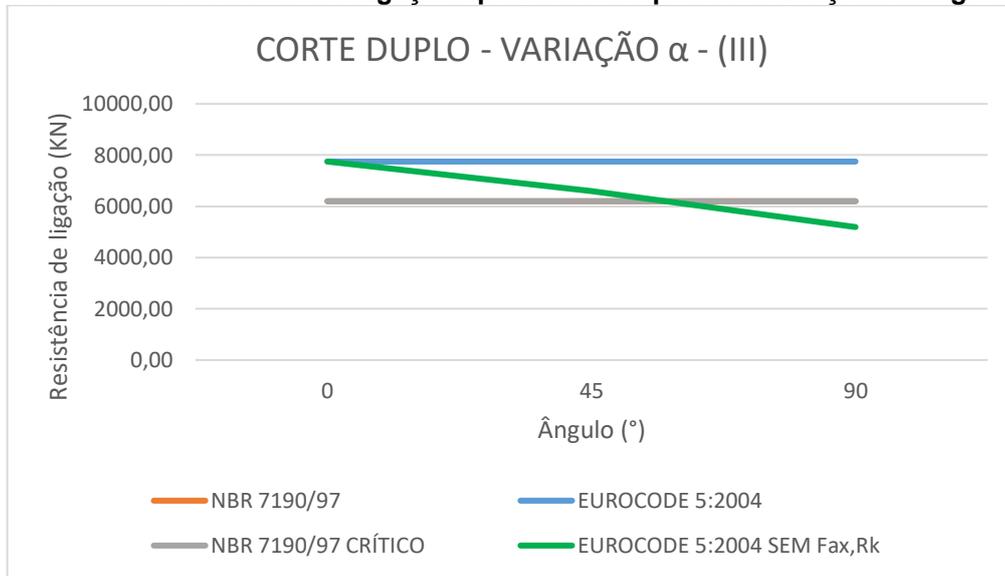
Gráfico 4 – Resistência de ligação tipo II corte duplo com variação do ângulo



Fonte: Autora

só é considerado nos modos de ruptura (j) e (k) de acordo com o EUROCODE 5:2004 e, retirando a sua contribuição, os menores valores passam a ser, entre 35° a 90°, de flexão do pino.

Gráfico 5 – Resistência de ligação tipo III corte duplo com variação do ângulo



Fonte: Autora

Tabela 26 – Modos de ruptura para ligação III corte duplo com variação do ângulo

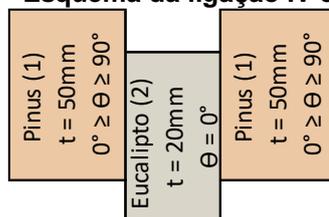
| LIGAÇÃO III | | | |
|---------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Na ligação tipo IV ocorre a mesma situação que na ligação tipo III, ambas as normas mostram que o rompimento ocorrerá na peça de menor espessura, nesse

caso, a peça central. Assim, os valores continuam constantes e mostram que essa ligação terá sua resistência regida única e exclusivamente pela peça central de eucalipto, independentemente de quais ângulos as peças externas de pinus se encontrem.

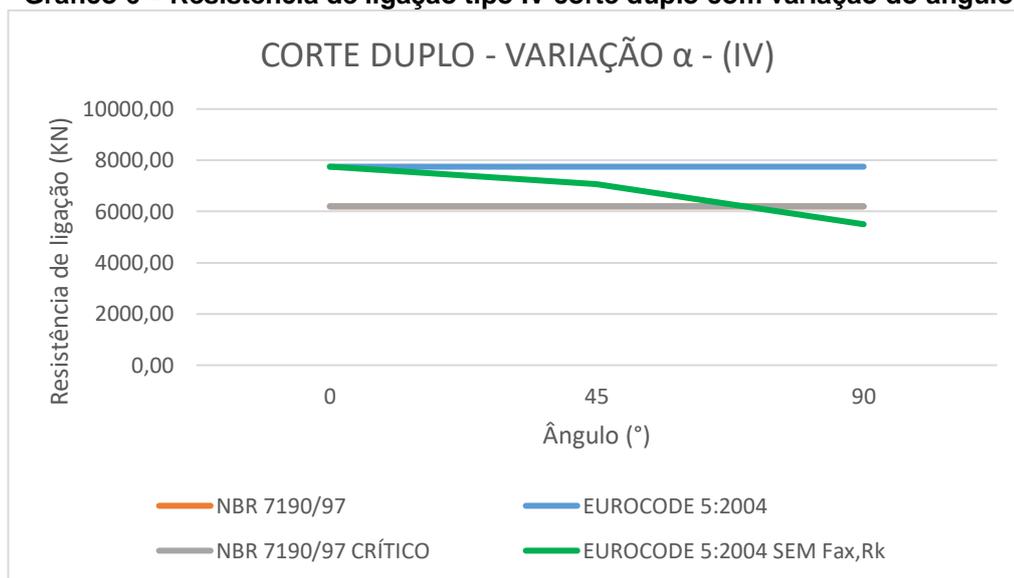
Figura 36 - Esquema da ligação IV corte duplo



Fonte: Autora

O mesmo ocorre para a avaliação da ligação sem o efeito de corda., mas nesse caso o embutimento da peça central ocorre até 35° e começa a ocorrer a flexão do pino entre 40° e 90°.

Gráfico 6 – Resistência de ligação tipo IV corte duplo com variação do ângulo



Fonte: Autora

Tabela 27 – Modos de ruptura para ligação IV corte duplo com variação do ângulo

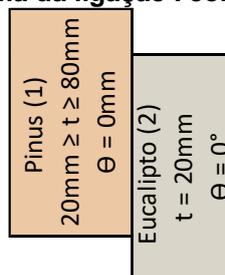
| LIGAÇÃO IV | | | |
|---------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

4.2 Ligações com variação na espessura

Para ligação tipo I de corte simples, o EUROCODE 5:2004 apresenta um crescimento inicial da resistência para depois atingir um patamar e se manter constante a partir de 30mm de espessura da peça de pinus em diante; isso ocorre pois, com ambas as peças em 20mm de espessura, a norma europeia considera que a ruptura ocorrerá no embutimento da peça de pinus, por ser a madeira menos resistente entre as duas e, em sequência, a ruptura muda para rotação do pino com embutimento na peça de pinus e formação de uma rótula plástica e depois se mantém constante em rotação do pino com embutimento na peça de eucalipto e formação de uma rótula plástica.

Figura 37 - Esquema da ligação I corte simples

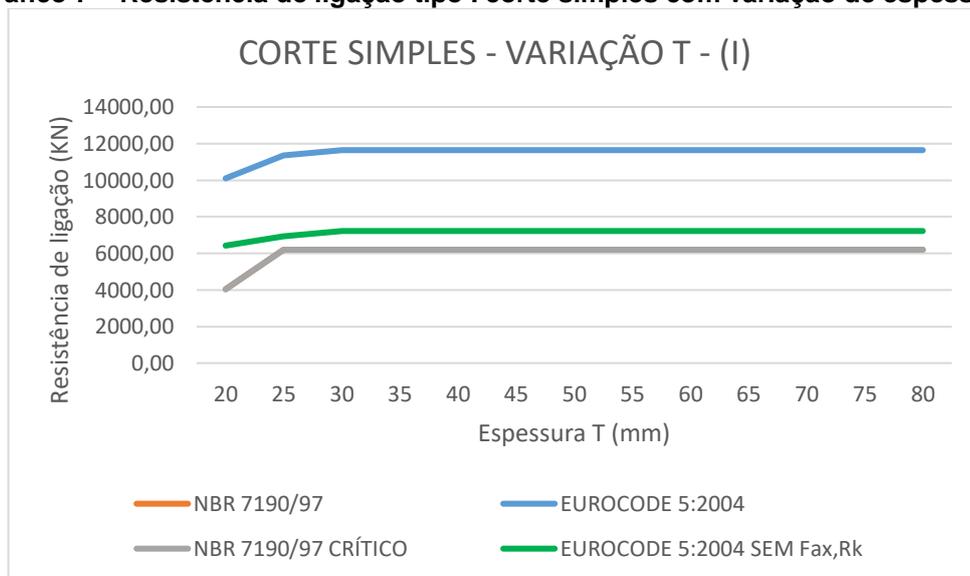


Fonte: Autora

Já a NBR 7190/97 também apresenta um crescimento da resistência para depois atingir um patamar entre 25mm e 80mm de espessura. Isso ocorre pelo mesmo motivo da norma europeia, como no primeiro ponto de análise ambas as peças possuem a mesma espessura de 20mm, o rompimento irá ocorrer na peça de menor espessura, ou seja, a peça de pinus. A partir de 25mm a norma brasileira aponta que o rompimento irá ocorrer pelo embutimento da peça de eucalipto, por apresentar a menor espessura entre ambas as peças. A resistência crítica apresentou valores coerentes com o cálculo da norma brasileira, ambas com valores abaixo dos obtidos pela norma europeia.

Com a desconsideração do efeito de corda no cálculo da resistência pela norma europeia, vemos que os valores se aproximam bastante dos obtidos pela norma brasileira. Entretanto, mesmo com a diferença de valores, o modo de ruptura teve poucas alterações: em 20mm e 25mm o rompimento ocorre pela rotação do pino com embutimento na peça de pinus e formação de uma rótula plástica e de 30mm a 80mm o rompimento se mantém com a rotação do pino com embutimento na peça de eucalipto e formação de uma rótula plástica.

Gráfico 7 – Resistência de ligação tipo I corte simples com variação de espessura



Fonte: Autora

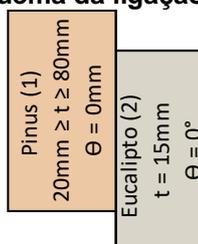
Tabela 28 – Modos de ruptura para ligação I corte simples com variação da espessura

| LIGAÇÃO I | | | |
|---------------|-------------------|---|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento 1 | Rotação do pino com embutimento na peça 1 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 1 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 1 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Na ligação tipo II com corte simples o EUROCODE 5:2004 apresenta um crescimento da resistência de ligação quando a peça de pinus está em 20 e 25mm pois o modo de ruptura passa de embutimento na peça de pinus, por ser a peça de menor resistência ao embutimento, para rotação do pino com embutimento na peça de eucalipto e formação de uma rótula plástica pois a peça de menor espessura permanece a de eucalipto, com 15mm.

Figura 38 - Esquema da ligação II corte simples



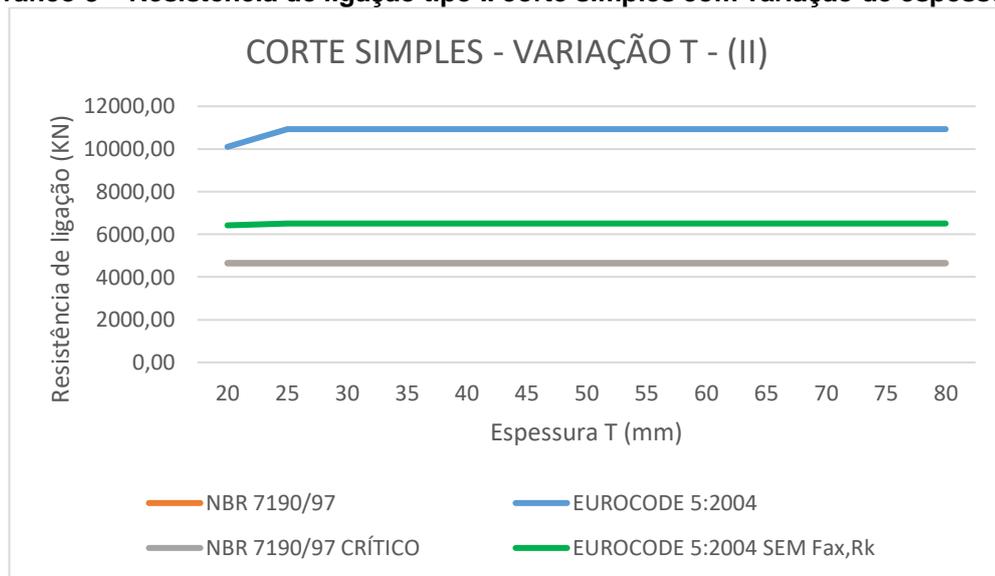
Fonte: Autora

Já a NBR 7190/97 obteve valores constantes para a resistência de ligação e para o modo de ruptura, sendo ele o embutimento na peça de eucalipto. Isso se deve ao fato de que a peça de eucalipto possui espessura menor do que a de pinus durante

toda a variação de espessura, sendo o ponto de ruptura também para a resistência crítica.

Com o descarte do efeito de corda vemos que o valor da resistência pelo EUROCODE 5:2004 se aproxima cada vez mais dos obtidos pela norma brasileira, mas não apresenta muita diferença no modo de ruptura; em 20mm ocorre a rotação do pino com embutimento na peça de pinus e formação de uma rótula plástica enquanto entre 25 e 80mm a ruptura ocorre pela rotação do pino, mas com embutimento na peça de eucalipto e formação de uma rótula plástica.

Gráfico 8 – Resistência de ligação tipo II corte simples com variação de espessura



Fonte: Autora

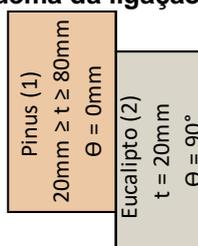
Tabela 29 – Modos de ruptura para ligação II corte simples com variação da espessura

| LIGAÇÃO II | | | |
|---------------|-------------------|---|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 1 | Rotação do pino com embutimento na peça 1 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Ainda no corte simples, na ligação tipo III vemos que a norma europeia apresenta valores constantes de resistência de ligação e de modo de ruptura, sendo este no embutimento da peça de eucalipto. Isso ocorre pois nesse tipo III de ligação a peça de eucalipto é a de menor espessura e está sendo solicitada em um ângulo de 90°, o que diminui sua resistência ao embutimento. A norma brasileira também apresenta constância nos resultados de resistência e modo de ruptura, sendo este também o embutimento na peça de eucalipto.

Figura 39 - Esquema da ligação III corte simples

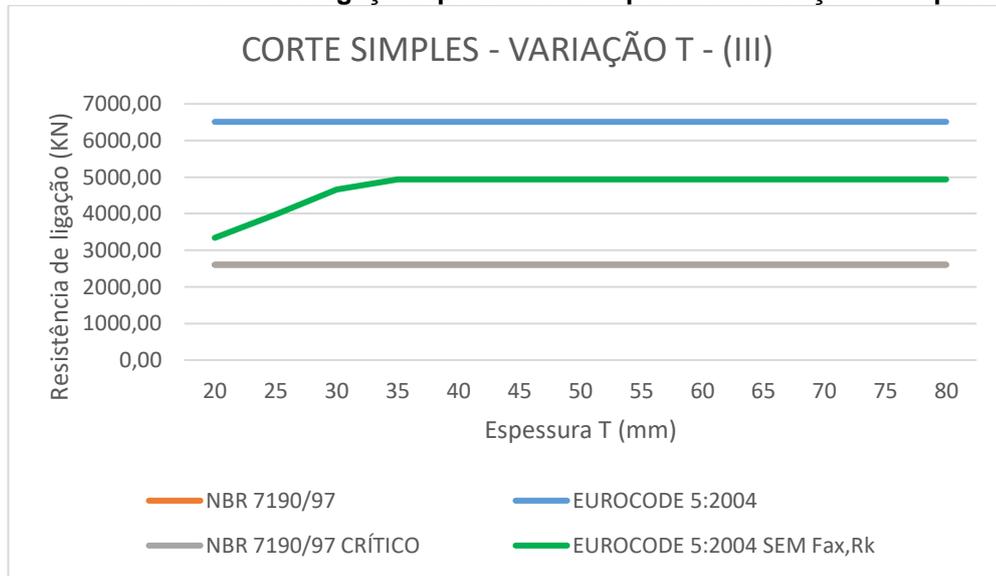


Fonte: Autora

Quanto à ligação pela norma europeia sem considerar o efeito de corda, vemos que os valores se aproximam dos valores da norma brasileira e também que ocorre a mudança do modo de ruptura: há o crescimento da resistência num primeiro momento,

com a ruptura ocorrendo por rotação do pino com embutimento nas duas peças e, ao se tornar constante, a ruptura ocorre com a rotação do pino com embutimento na peça de eucalipto e formação de uma rótula plástica.

Gráfico 9 – Resistência de ligação tipo III corte simples com variação de espessura



Fonte: Autora

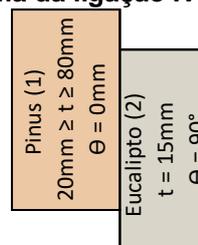
Tabela 30 – Modos de ruptura para ligação III corte simples com variação da espessura

| LIGAÇÃO III | | | |
|---------------|-------------------|----------------|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

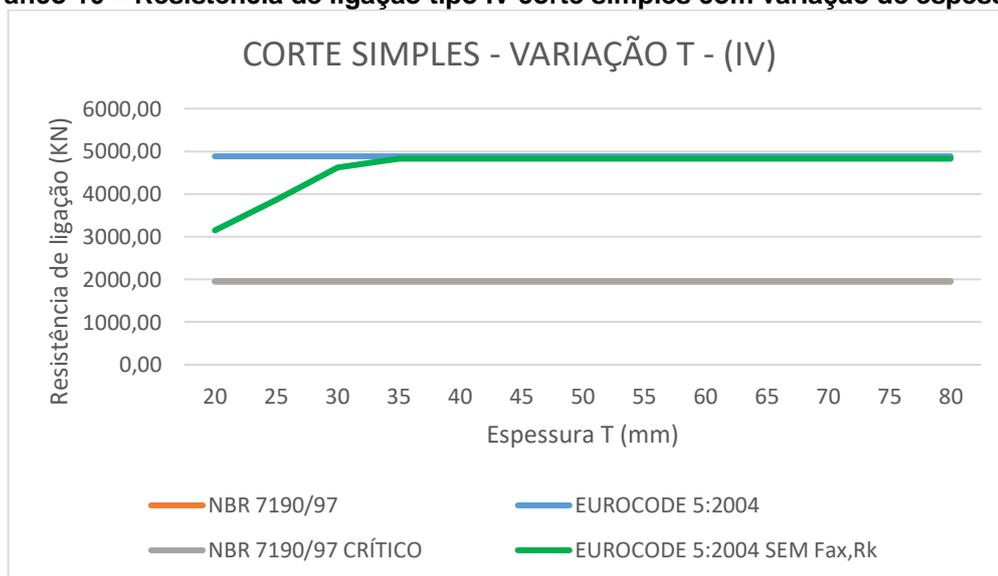
De forma similar com a ligação III, a ligação IV também apresenta valores constantes de resistência para a norma brasileira e para a norma europeia, assim como em ambos a ruptura ocorre sempre pelo embutimento da peça de eucalipto. Entretanto, os valores pela norma europeia quando não é considerado o efeito de corda deram próximos aos valores do EUROCODE 5:2004 com o efeito de corda, mesmo que os modos de ruptura tenham sido diferentes; sem o efeito de corda o modo de ruptura se igual aos apresentados na ligação III.

Figura 40 - Esquema da ligação IV corte simples



Fonte: Autora

Gráfico 10 – Resistência de ligação tipo IV corte simples com variação de espessura



Fonte: Autora

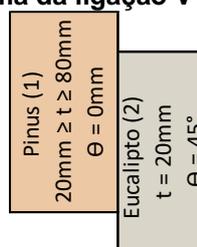
Tabela 31 – Modos de ruptura para ligação IV corte simples com variação da espessura

| LIGAÇÃO IV | | | |
|---------------|-------------------|----------------|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax, Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Para as ligações tipo V e VI os resultados foram similares aos apresentados entre a ligação III e IV. O EUROCODE 5:2004 na ligação V apresentou um pequeno crescimento da resistência com ruptura ocorrendo pela rotação do pino com embutimento nas duas peças e logo após se manteve constante com a ocorrência do embutimento na peça de menor espessura, o eucalipto. A NBR 7190/97 apresentou valores constantes de resistência, com sua ruptura sendo localizada sempre pelo embutimento na peça de eucalipto, mesmo que a angulação da peça de menor espessura tenha passado de 90° a 45°.

Figura 41 - Esquema da ligação V corte simples

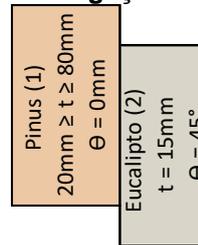


Fonte: Autora

Na ligação VI ocorre de forma similar à anterior, a norma brasileira continua apresentando valores constantes de resistência e ruptura localizada no embutimento da peça de eucalipto e a norma europeia apresenta uma pequena diferenciação à

ligação anterior, pois se mantém constante do início ao fim da variação da espessura, com rompimento também ocorrendo pelo embutimento da peça de eucalipto.

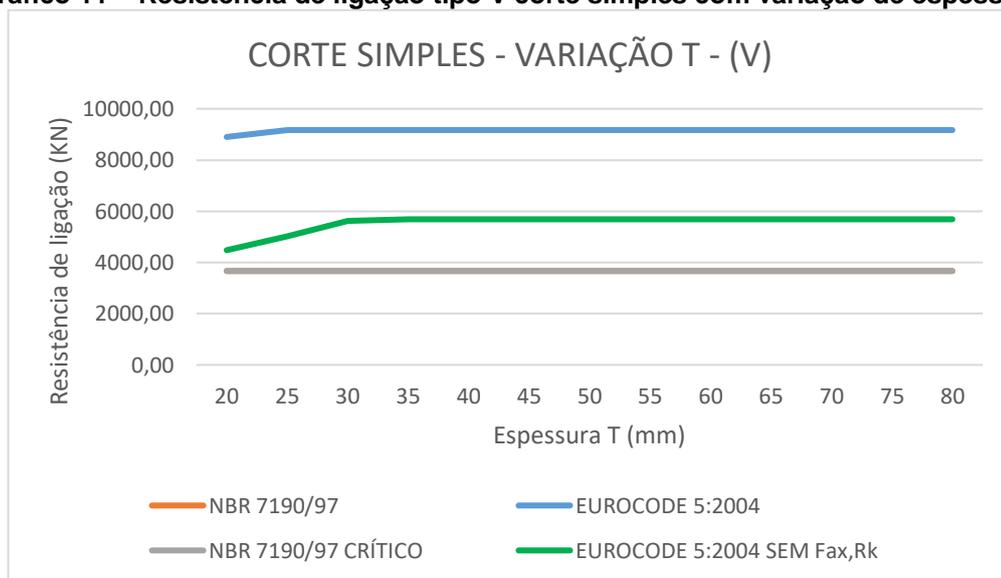
Figura 42 - Esquema de ligação VI corte simples



Fonte: Autora

De forma similar com a ligação tipo III e IV, a condição da norma europeia sem considerar o efeito de corda não se modifica no modo de ruptura para as ligações tipo V e VI. Ambas começam com um crescimento ligada ao rompimento pela rotação do pino com embutimento nas duas peças e permanecem contínuas até o fim da variação, com a ruptura ocorrendo pela rotação do pino com embutimento na peça de eucalipto e formação de uma rótula plástica.

Gráfico 11 – Resistência de ligação tipo V corte simples com variação de espessura



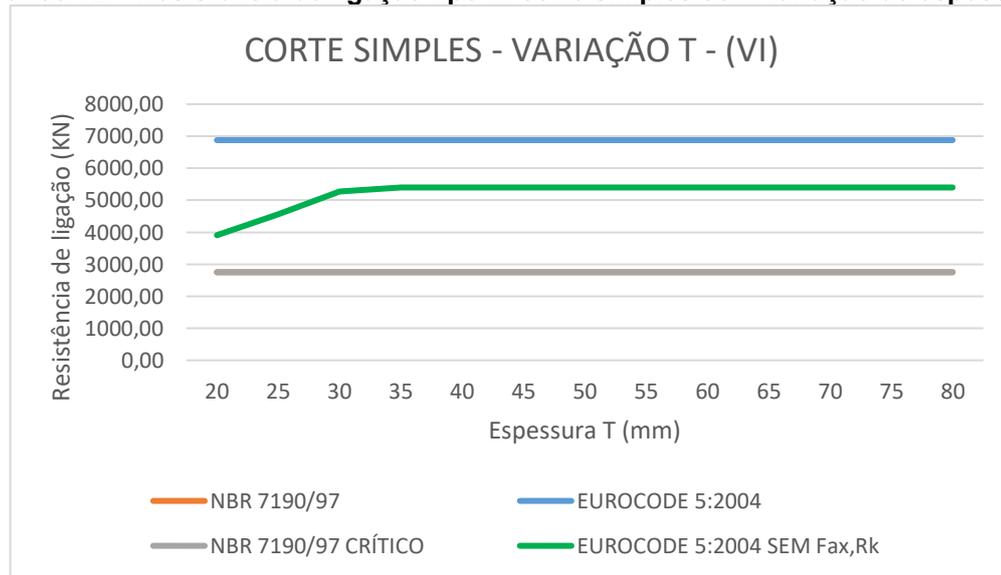
Fonte: Autora

Tabela 32 – Modos de ruptura para ligação V corte simples com variação da espessura

| LIGAÇÃO V | | | |
|---------------|-------------------|--|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Gráfico 12 – Resistência de ligação tipo VI corte simples com variação de espessura



Fonte: Autora

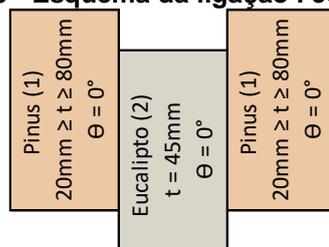
Tabela 33 – Modos de ruptura para ligação VI corte simples com variação da espessura

| LIGAÇÃO VI | | | |
|---------------|-------------------|----------------|---|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento nas duas peças |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento 2 | Rotação do pino com embutimento na peça 2 e formação de 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Fazendo a avaliação das ligações com corte duplo e variação da espessura, temos a ligação I, em que o EUROCODE 5:2004 apresenta valores crescentes entre 20mm e 40mm e permanece constante entre 45mm e 80mm; há também variação nos modos de ruptura, sendo em 20mm caracterizado pelo embutimento das peças externas de pinus, entre 25mm e 35mm caracterizado pela flexão do pino com apenas uma rótula plástica e entre 40mm e 80mm ocorre a flexão do pino, mas com formação de duas rótulas plásticas.

Figura 43 - Esquema da ligação I corte duplo



Fonte: Autora

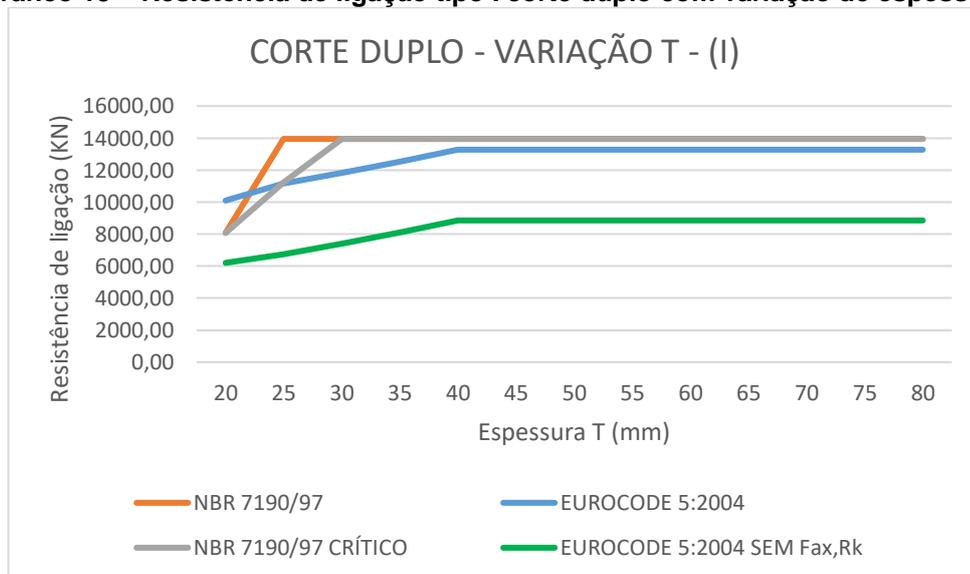
Através do cálculo pela NBR 7190/97 vemos também um crescimento da resistência entre 20mm e 25mm, iniciando em valores menores do que o EUROCODE 5:2004 e o ultrapassando no segundo ponto de avaliação, permanecendo constante

entre 30mm e 80mm. O crescimento inicial da resistência se dá pelo modo de ruptura ocorrer na peça externa de pinus, a 20mm, e em seguida, em 25mm, alterar para a ruptura na peça central de eucalipto. Isso ocorre pois nesse tipo de ligação I a peça central de eucalipto se encontra com sua espessura fixada sempre em 45mm, então quando a peças externas de pinus se encontram com 20mm a espessura t será referente à peça de pinus, enquanto conforme as peças externas aumentam de tamanho, a espessura t passa sempre a ser referente à peça central.

Mesmo que a partir dos 25mm das peças externas a espessura t seja referente à peça central de eucalipto pelo cálculo da norma brasileira, pela resistência crítica isso só passa a ocorrer a partir de 30mm, pois ainda na espessura de 25mm das peças externas o menor valor de resistência encontrado é referente às próprias peças externas de pinus, fazendo com que a curva de crescimento da resistência nos pontos iniciais do gráfico seja mais inclinada.

Além disso, a consideração do cálculo do EUROCODE 5:2004 sem contabilizar o efeito de corda traz mudanças consideráveis apenas nos valores de resistência, pois o modo de ruptura quase não sofre alteração. Em comparação, a ruptura sem o efeito de corda inicia entre 20mm e 35mm com a flexão do pino com uma rótula plástica e se mantém com flexão do pino, mas duas rótulas plásticas, entre 40mm e 80mm.

Gráfico 13 – Resistência de ligação tipo I corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

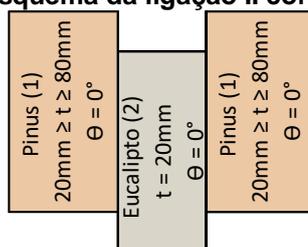
Tabela 34 – Modos de ruptura para ligação I corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO I | | | |
|---------------|-------------------|--|--|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |

Fonte: Autora

Para o tipo de ligação II temos uma maior semelhança entre as normas. O EUROCODE 5:2004 e a NBR 7190/97 apresentam valores constantes pois nesse caso a peça central de eucalipto tem a espessura de 20mm enquanto as peças externas de pinus aumentam sua espessura. Por isso, o menor valor de resistência sempre será referente ao embutimento na peça central de eucalipto, tanto na norma brasileira quanto na norma europeia.

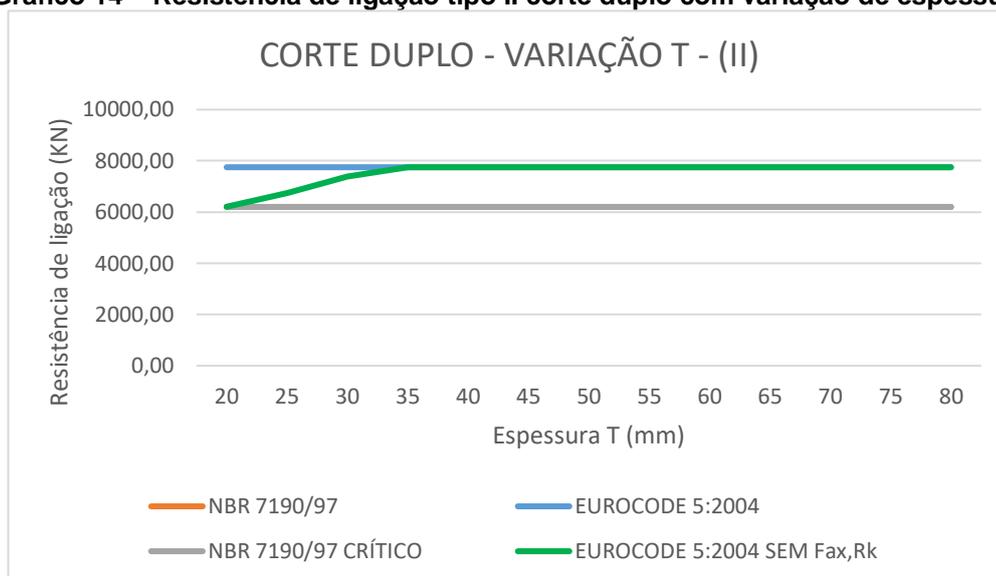
Figura 44 - Esquema da ligação II corte duplo



Fonte: Autora

Para o cálculo da norma europeia desconsiderando o efeito de corda tem uma alteração em que, antes de atingir valores constantes, o gráfico se mostra crescente nas espessuras iniciais. Isso ocorre pois nas espessuras de 20, 25 e 30mm a ruptura ocorre pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica, para assim se estabilizar com a ruptura no embutimento da peça central de eucalipto.

Gráfico 14 – Resistência de ligação tipo II corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

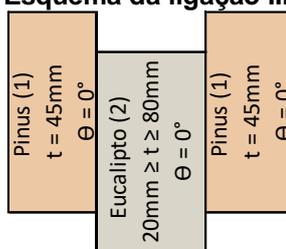
Tabela 35 – Modos de ruptura para ligação II corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO II | | | |
|---------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |

Fonte: Autora

Na ligação tipo III, em que a peça a varia a espessura é a peça central de eucalipto e em que as peças externas de pinus estão sempre fixadas em 45mm, temos algumas variações no gráfico. Vemos que o EUROCODE 5:2004 apresentou um crescimento da resistência entre 20mm e 35mm, de onde muda a ruptura por embutimento na peça central para flexão do pino com a formação de duas rótulas plásticas.

Figura 45 - Esquema da ligação III corte duplo

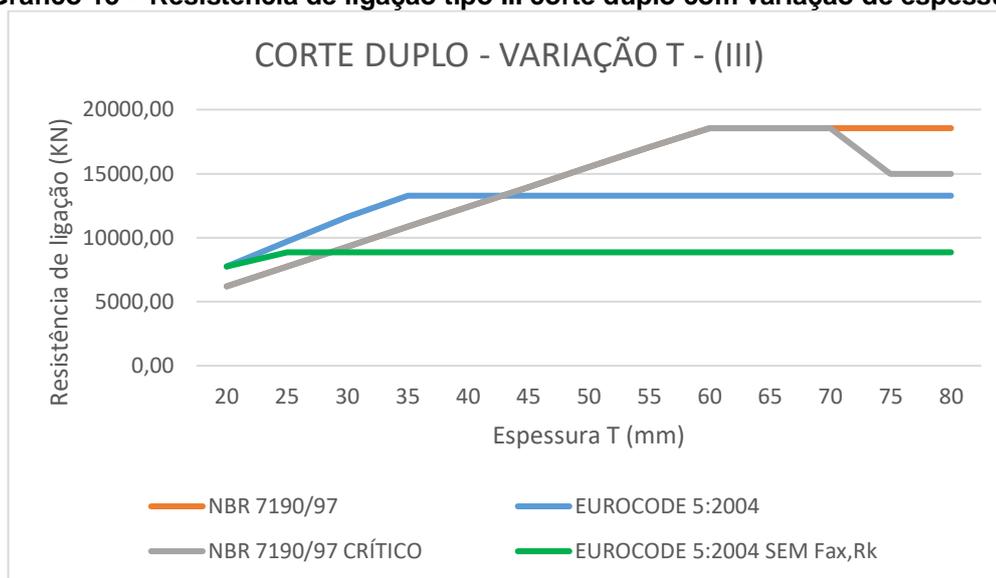


Fonte: Autora

Podemos observar que a NBR 7190/97 apresenta valores crescentes de resistência, e que ultrapassam os da norma europeia, conforme a espessura da peça interna aumenta, entre 20mm e 55mm, mantendo-se constante de 60mm a 80mm. Isso ocorre devido aos valores elevados de espessura das peças externas, fazendo com que a espessura t seja sempre referente à peça central de eucalipto, mesmo quando ela atinge a espessura de 80mm; assim, a ruptura é determinada pelo embutimento da peça central entre 20mm e 55mm, mudando para flexão do pino entre 60mm e 80mm pela espessura elevada das peças. A resistência crítica se mantém igual em valores e em modo de ruptura ao cálculo tradicional da NBR 7190/97 até a espessura de 70mm, e após 75mm há a variação de valores de resistência, pois mesmo a ruptura ocorrendo pela flexão do pino, o menor valor da resistência a flexão do pino é quando utilizamos as resistências das peças de pinus.

Quanto aos valores obtidos sem o efeito de corda, ainda há um crescimento da resistência, porém mais rápido, onde ocorre a transição da ruptura ocorrendo pelo embutimento da peça central para flexão do pino com a formação de duas rótulas plásticas.

Gráfico 15 – Resistência de ligação tipo III corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

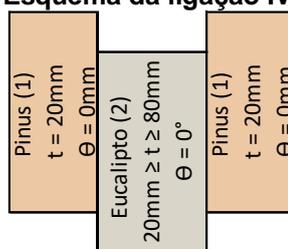
Tabela 36 – Modos de ruptura para ligação III corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO III | | | |
|----------------|-------------------|--|--|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Embutimento peça central |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |

Fonte: Autora

Na ligação tipo IV o EUROCODE 5:2004 apresenta um crescimento na resistência entre as espessuras de 20 a 30mm, e isso ocorre pois em 20mm e 25mm o modo de ruptura apresentado é referente ao embutimento da peça central de eucalipto, que está variando a espessura, e, a partir de 35mm a norma europeia aponta que o rompimento passa a ocorrer pelo embutimento das peças externas, que se mantém sempre à 20mm de espessura.

Figura 46 - Esquema da ligação IV corte duplo

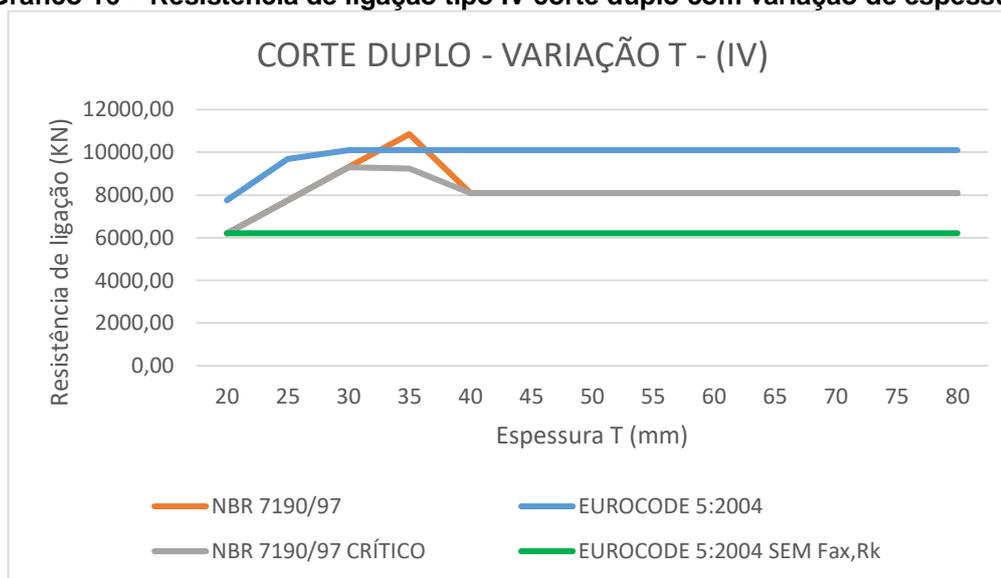


Fonte: Autora

Já a norma brasileira apresenta um crescimento da resistência entre as espessuras de 20 a 35mm, em que o modo de ruptura também é o embutimento da peça central de eucalipto. Ao atingir o pico de resistência, que apresenta valor maior dos que obtidos pela norma europeia, onde a peça central passa a ter o dobro da espessura das peças laterais, há o decaimento da resistência e alteração do modo de ruptura para embutimento das peças externas de pinus. A resistência crítica apresenta um padrão mais parecido com a norma europeia, visto que há o crescimento da resistência entre as espessuras de 20 a 30mm com o modo de ruptura ocorrendo pelo embutimento da peça central de eucalipto e, a partir de 35mm o rompimento passa a ocorrer pelo embutimento das peças externas.

Para o cálculo desconsiderando o efeito de corda na norma europeia, os valores obtidos são menores dos que apresentados pela norma brasileira e são constantes durante toda a variação da espessura da peça central. Além disso, o modo de ruptura passa a ser a flexão do pino com a formação de uma rótula plástica, ao invés do embutimento apresentado pela norma europeia com o efeito de corda.

Gráfico 16 – Resistência de ligação tipo IV corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

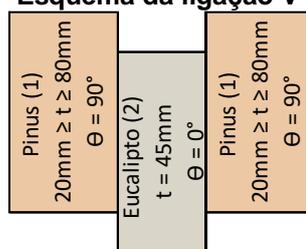
Tabela 37 – Modos de ruptura para ligação IV corte duplo com variação

| LIGAÇÃO IV | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Para a ligação tipo V, em que as peças externas de pinus têm a espessura variada e a peça central de eucalipto se mantém a 45mm de espessura, a norma europeia apresenta um crescimento da resistência entre 20 a 65mm de espessura, tendo o modo de ruptura iniciado em embutimento das peças externas entre 20 e 45mm, alterado para flexão do pino com a formação de uma rótula plástica entre 50 e 65mm para depois se manter constante em valores e ruptura na flexão do pino, mas com formação de duas rótulas plásticas. O embutimento das peças externas ocorre até o momento em que as três peças possuem a mesma espessura e a partir desse ponto as espessuras são consideradas muito grandes para que a ruptura ocorra na madeira, passando assim a ocorrer pela flexão do pino.

Figura 47 - Esquema da ligação V corte duplo



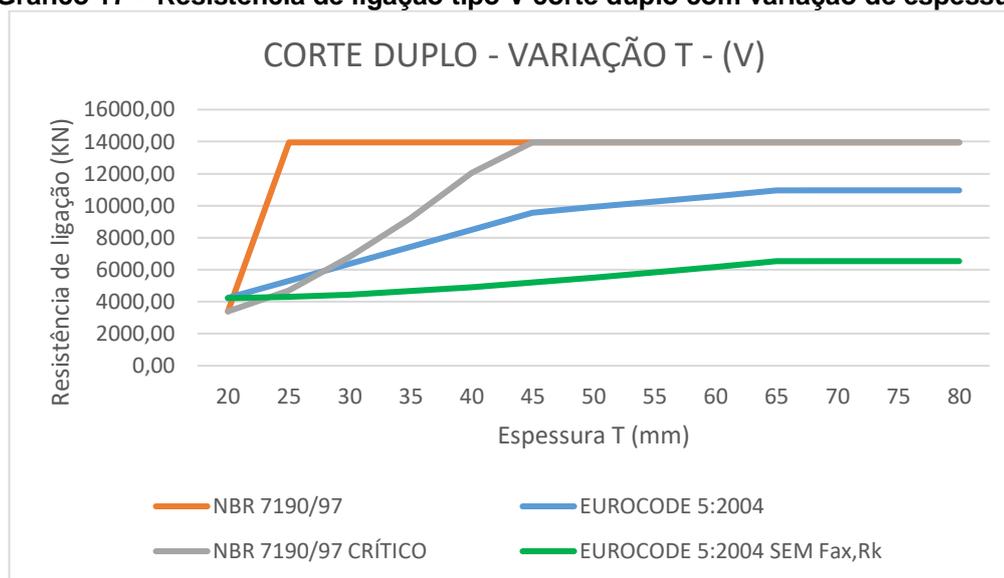
Fonte: Autora

Já a norma brasileira apresenta um crescimento acentuado da resistência entre as espessuras de 20 e 25mm, pois a ruptura em 20mm ocorre pelo embutimento das peças externas, já que o elemento central de eucalipto possui uma espessura de 45mm e está com 0°, ou seja, possui mais resistência do que as peças de pinus solicitadas a 90°; entretanto, a partir de 25mm até 80mm a NBR 7190/97 passa a apresentar um patamar na resistência de ligação, sendo a ruptura localizada pelo embutimento da peça central de eucalipto. Isso ocorre pois, mesmo que a resistência do eucalipto seja maior por ser uma madeira mais resistente e estar sendo solicitada à 0°, a menor espessura t acaba sendo sempre referente à peça central, principalmente devido ao aumento da espessura das peças externas.

Já a resistência crítica apresenta um crescimento de resistência diferente do cálculo padrão da NBR 7190/97, mesmo que atinja um resultado igual a partir da espessura de 45mm. A resistência considerada utilizando a espessura e resistência das peças externas de pinus apresentam valores de embutimento consideravelmente menores do que os calculados considerando a espessura e resistência da peça central de eucalipto, e, como a resistência crítica é o menor valor entre essas duas resistências e a resistência do cálculo padrão da NBR 7190/97, temos que entre 20 e 40mm ocorrerá o embutimento das peças externas de pinus e só a partir de 45mm que a ruptura ocorre pelo embutimento da peça central. No geral, tanto a resistência da NBR 7190/97 e a resistência crítica apresentam valores maiores dos que os calculados pela norma europeia.

A evolução da resistência pelo EUROCODE 5:2004 sem o efeito de corda é de crescimento entre 20 e 65mm, sendo o modo de ruptura a flexão do pino com a formação de uma rótula plástica. Acima de 65mm foi observado um patamar de valores e o modo de ruptura se alterou para flexão do pino com a formação de duas rótulas plásticas.

Gráfico 17 – Resistência de ligação tipo V corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

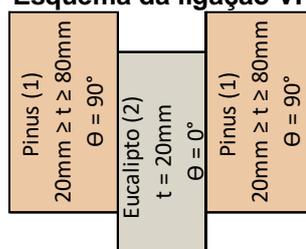
Tabela 38 – Modos de ruptura para ligação V corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO V | | | |
|---------------|-------------------|--|--|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |

Fonte: Autora

Na ligação tipo VI vemos novamente um comportamento de crescimento da resistência pelo EUROCODE 5:2004, em que o modo de ruptura ocorre pelo embutimento das peças externas de pinus entre 20 e 35mm devido a sua resistência à 90° ser muito menor do que a resistência da peça central de eucalipto a 0°; a partir de 40mm não há mais o crescimento da resistência, ela se mantém constante até os 80mm, com modo de ruptura ocorrendo pelo embutimento da peça central, pois mesmo sendo a de maior resistência, a espessura da peça passou a ser determinante, visto que as peças externas passaram a ter espessuras muito mais elevadas do que a central.

Figura 48 - Esquema da ligação VI corte duplo

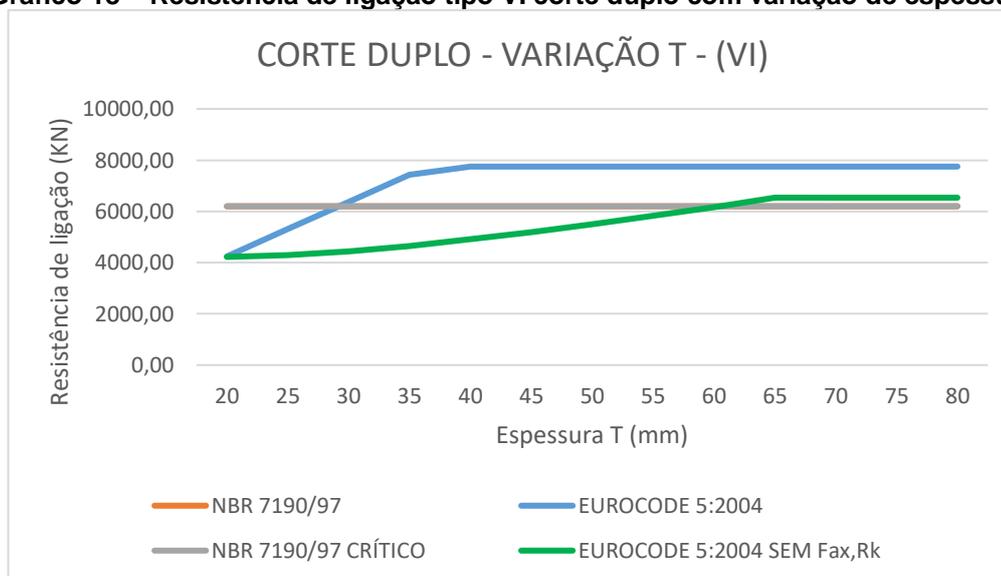


Fonte: Autora

A NBR 7190/97 e a resistência crítica não apontam essa distinção inicial entre os modos de ruptura, apresentando apenas valores constantes durante toda a variação da espessura e modo de ruptura ocorrendo sempre pelo embutimento da peça central. Isso mais uma vez ocorre pois, independente da resistência das peças, a espessura t será sempre relacionada com a peça central, visto que as externas que estão sofrendo a variação de espessura.

Para a avaliação da retirada do efeito de corda, vamos que o gráfico se mantém similar ao ocorrido na mesma situação na ligação V, há um crescimento entre 20 e 65mm em que a ruptura está ocorrendo pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica e, entre 70 e 80mm temos valores constantes e a ruptura ocorrendo pela flexão do pino com formação de duas rótulas plásticas.

Gráfico 18 – Resistência de ligação tipo VI corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

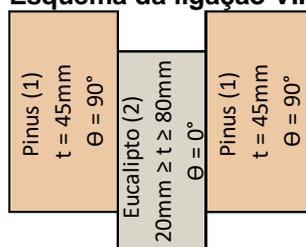
Tabela 39 – Modos de ruptura para ligação VI corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO VI | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|--|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |

Fonte: Autora

Para a ligação tipo VII a norma europeia apresenta um pequeno crescimento na espessura inicial de 20mm, com ruptura ocorrendo pelo embutimento na peça central para depois se manter constante de 25 a 80mm com o embutimento nas peças externas sendo o responsável pelo rompimento da ligação. Isso ocorre, pois, a resistência das peças externas é muito menor do que a da peça central, pois está sendo solicitada a 90°.

Figura 49 - Esquema da ligação VII corte duplo



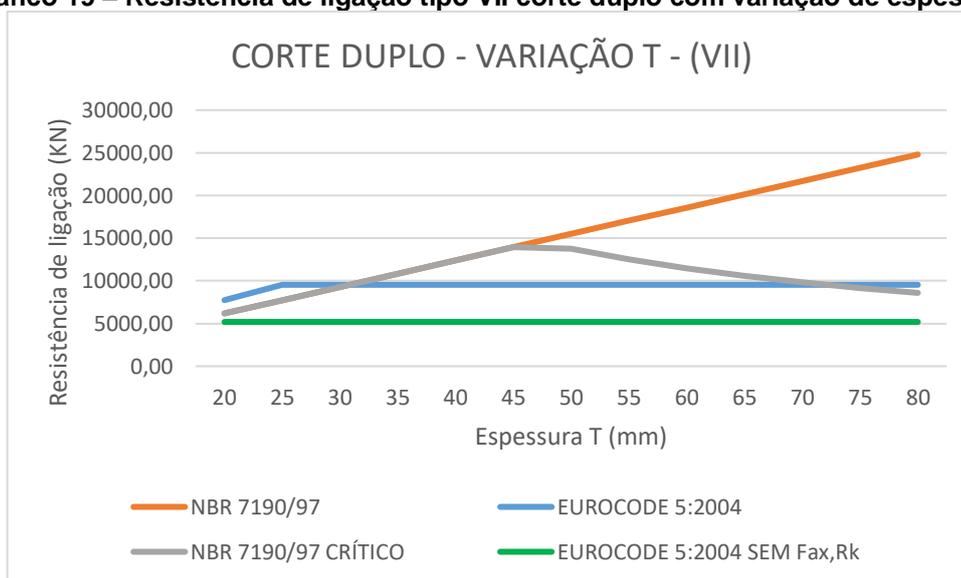
Fonte: Autora

Já a norma brasileira apresenta valores crescentes de resistência do início ao fim da variação da espessura, com rompimento ocorrendo pelo embutimento da peça central. Isso ocorre pois, mais uma vez, a espessura t é referente sempre à peça central de eucalipto, mesmo sendo ela a peça a sofrer a variação da espessura, já que as peças externas de pinus possuem espessura muito elevada na avaliação da menor espessura t . Então, independente da resistência da peça, o embutimento ocorrerá sempre na peça de eucalipto.

A resistência crítica segue os resultados do cálculo padrão da NBR 7190/97 até 45mm, onde inicia-se uma mudança da ruptura para embutimento nas peças externas e conseqüente decréscimo nos valores de resistência.

Na avaliação da norma europeia sem o efeito de corda temos valores constantes do início ao fim da variação da espessura, com o modo de ruptura ocorrendo sempre pela flexão do pino com uma rótula plástica.

Gráfico 19 – Resistência de ligação tipo VII corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

Tabela 40 – Modos de ruptura para ligação VII corte duplo com variação da espessura

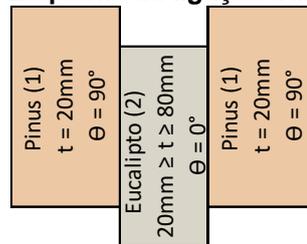
| LIGAÇÃO VII | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Na ligação tipo VIII em que as peças externas se mantêm constantes em 20mm e a peça central é a que sofre a variação da espessura, o EUROCODE 5:2004 apresenta valores constantes de resistência do início ao fim da variação da espessura,

além de apontar a causa da ruptura no embutimento nas peças externas de pinus. Isso acontece pela baixa espessura e baixa resistência das peças externas. A avaliação do cálculo da norma europeia sem o efeito de corda apresentou valores muito próximos do cálculo com o efeito de corda, entretanto a ruptura ocorre pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica.

Figura 50 - Esquema da ligação VIII corte duplo

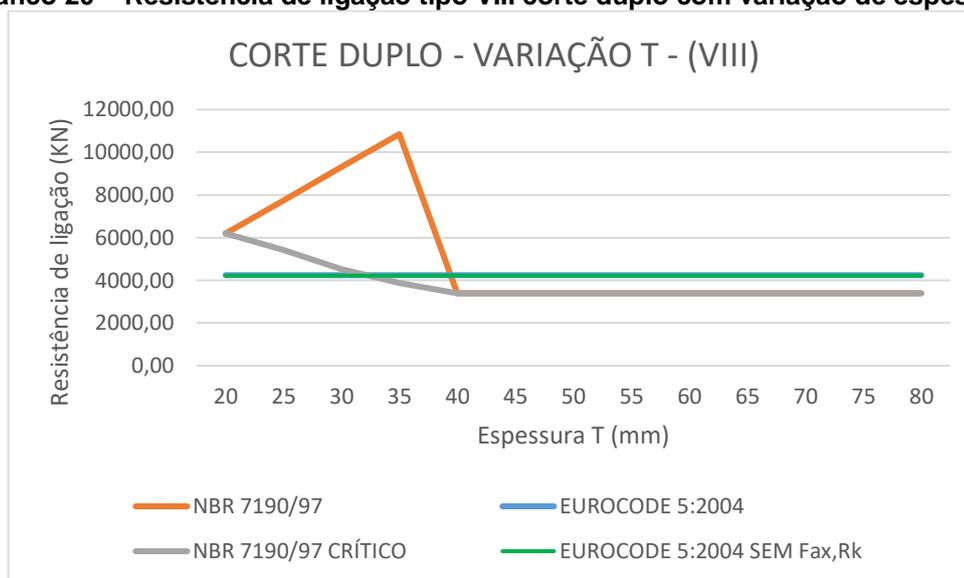


Fonte: Autora

Na análise pela NBR 7190/97 temos um súbito crescimento da resistência entre 20 e 35mm, em que o embutimento da peça central é responsável pela ruptura da ligação. Isso ocorre pois nessas quatro primeiras espessuras a espessura t é referente à peça central de eucalipto. A partir de 40mm a espessura t passa a ser referente às peças externas de pinus, pois estas se mantêm a 20mm de espessura enquanto a peça central só tende a aumentar. Assim, ao ocorrer a mudança de modo de ruptura os valores de resistência passam a ser constantes e muito menores.

Para a resistência crítica apenas na espessura de 20mm ocorre o embutimento da peça central de eucalipto e há a diminuição da resistência entre 20 e 40mm, para se tornar constante com a ruptura ocorrendo pelo embutimento das peças externas de pinus.

Gráfico 20 – Resistência de ligação tipo VIII corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

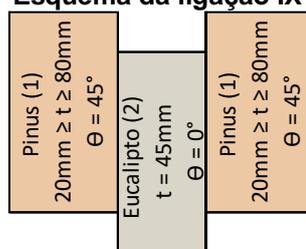
Tabela 41 – Modos de ruptura para ligação VIII corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO VIII | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Para a ligação tipo IX a norma europeia apresenta um crescimento da resistência de ligação entre 20 e 55mm, sendo a ruptura causada pelo embutimento das peças externas de pinus em 20, 25 e 30mm e pela flexão do pino com formação de uma rótula plástica entre 35 e 50mm; a partir de 55mm os valores de resistência são constantes e apontam a ruptura por flexão do pino com formação de duas rótulas plásticas. A avaliação retirando o efeito de corda apresenta valores menores, porém o padrão de crescimento da resistência também ocorre entre 20 e 55mm, sendo a ruptura pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica e entre 60 e 80mm pela flexão do pino com a formação de duas rótulas plásticas.

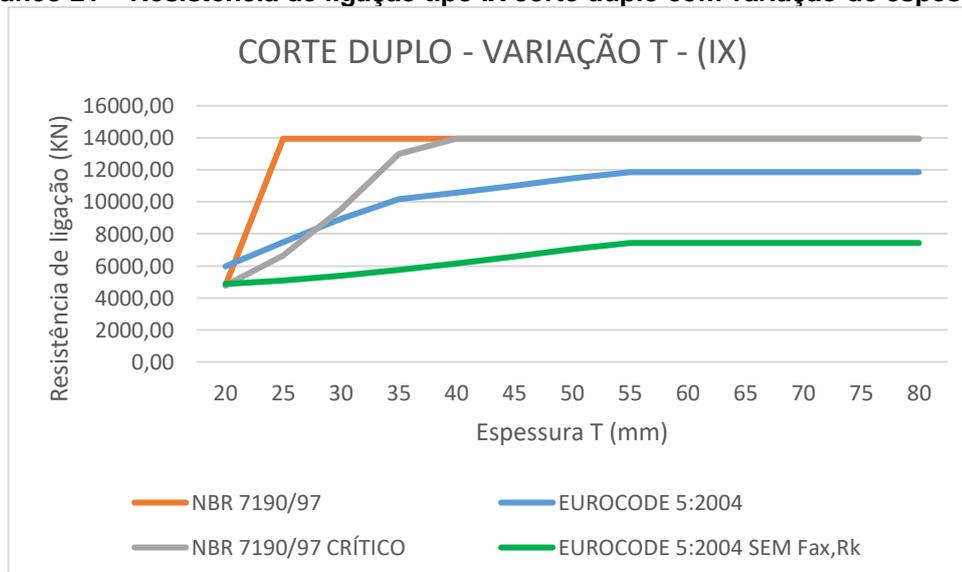
Figura 51 - Esquema da ligação IX corte duplo



Fonte: Autora

Já a norma brasileira apresenta um crescimento acentuado da resistência entre 20 e 25mm, onde ocorre a transição da ruptura pelo embutimento da peça externa de pinus para o embutimento da peça central de eucalipto, se mantendo assim até o final da variação da espessura. Isso ocorre novamente pela espessura t ser referente à peça central de eucalipto entre as espessuras de 25 e 80mm, mas pela avaliação da resistência crítica isso só deveria ocorrer a partir da espessura de 35mm, onde os valores de resistência de ligação considerando a espessura e resistência ao embutimento da peça externa de pinus passam a ser maiores do que os valores apresentados de resistência de ligação considerando a espessura e resistência ao embutimento das peças externas de pinus.

Gráfico 21 – Resistência de ligação tipo IX corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

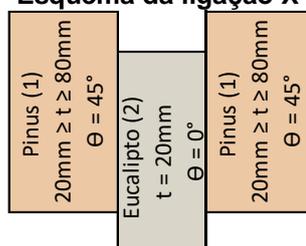
Tabela 42 – Modos de ruptura para ligação IX corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO IX | | | |
|---------------|-------------------|--|--|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax, Rk |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |

Fonte: Autora

Na ligação tipo X o EUROCODE 5:2004 apresenta um crescimento da resistência entre 20 e 25mm de espessura das peças externas, com ruptura ocorrendo pelo embutimento nas peças externas. A partir de 30mm até 80mm a resistência apresenta valores constantes e a ruptura sempre ocorre pelo embutimento da peça central. Na avaliação do cálculo da norma europeia sem o efeito de corda vemos um crescimento mais longo da resistência de ligação, ocorrendo entre as espessuras de 20 e 55mm, com ruptura pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica; entre 60 e 80mm a resistência de ligação atinge valores constantes muito próximos aos obtidos com a consideração do efeito de corda, entretanto, o modo de ruptura é a flexão do pino com a formação de duas rótulas plásticas.

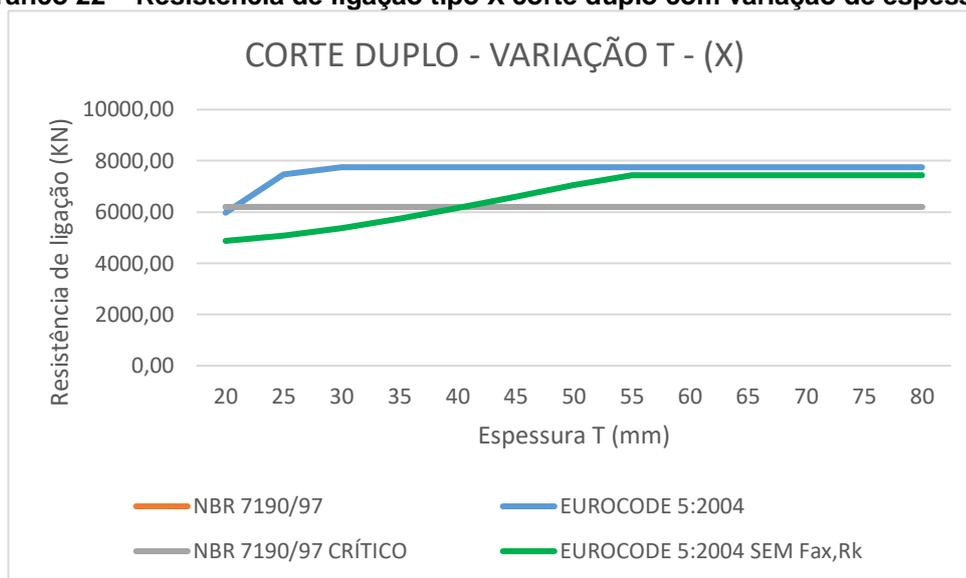
Figura 52 - Esquema da ligação X corte duplo



Fonte: Autora

Já pela norma brasileira e pela resistência crítica temos resultados constantes de resistência de ligação do início ao fim da variação da espessura, com a ruptura ocorrendo sempre pelo embutimento da peça central de eucalipto.

Gráfico 22 – Resistência de ligação tipo X corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

Tabela 43 – Modos de ruptura para ligação X corte duplo com variação da espessura

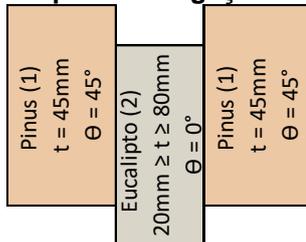
| LIGAÇÃO X | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|--|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 2 rótulas plásticas |

Fonte: Autora

Para a ligação tipo XI pelo EUROCODE 5:2004 temos um crescimento da resistência de ligação entre 20 e 30mm, se mantendo constante a partir de 30mm até 80mm de espessura. Nas primeiras duas espessuras a ruptura ocorre pelo embutimento na peça central de eucalipto devido a sua espessura ser menor do que as das peças externas de pinus e, a partir do momento em que as espessuras de ambas as peças passam a ser grandes o suficiente para que não ocorra a falha pela madeira, a ruptura passa a ser localizada pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica. Na avaliação do cálculo da norma europeia sem considerar o efeito de corda temos resultados constantes de resistência de ligação e o modo de ruptura se

aproxima do cálculo original: ruptura pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica.

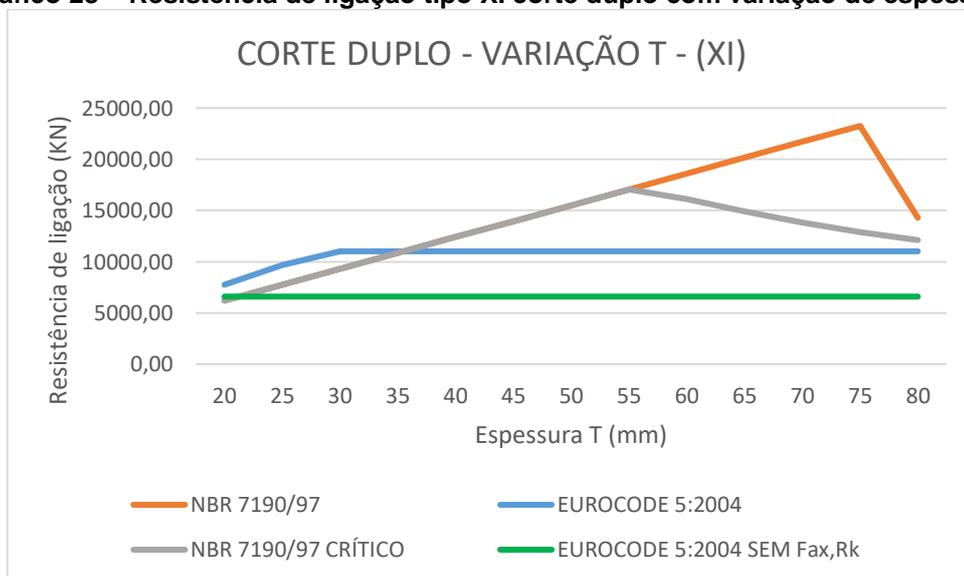
Figura 53 - Esquema da ligação XI corte duplo



Fonte: Autora

Já a norma brasileira apresenta um crescimento bem mais acentuado da resistência entre as espessuras de 20 e 75mm, havendo a diminuição dos valores apenas em 80mm, quando a ruptura passa de embutimento da peça central de eucalipto para flexão do pino. Na avaliação da resistência crítica vemos que começa a divergir do cálculo original da NBR 7190/97 na espessura de 60mm, onde já começa a apresentar a diminuição da resistência de ligação e a transição do modo de ruptura do embutimento da peça central de eucalipto para o embutimento das peças externas de pinus até 75mm; com 80mm de espessura a resistência crítica também apresenta a ruptura ocorrendo pela flexão do pino.

Gráfico 23 – Resistência de ligação tipo XI corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

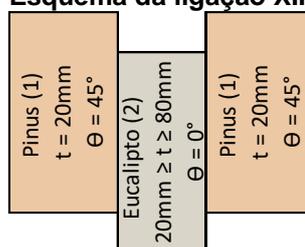
Tabela 44 – Modos de ruptura para ligação XI corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO XI | | | |
|----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peça central | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Flexão do Pino | Flexão do Pino | Flexão do pino com 1 rótula plástica | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

Na última ligação, tipo XII, temos que o EUROCODE 5:2004 apresenta valores constantes de resistência de ligação durante toda a variação da espessura da peça central de eucalipto. Como as peças externas estão em espessura menor de 20mm e estão sendo solicitadas a 45°, a ruptura ocorre durante toda a variação pelo embutimento das peças externas de pinus. Na avaliação sem o efeito de corda, vemos que os valores são menores, mas constantes, com a ruptura ocorrendo pela flexão do pino com a formação de uma rótula plástica.

Figura 54 - Esquema da ligação XII corte duplo

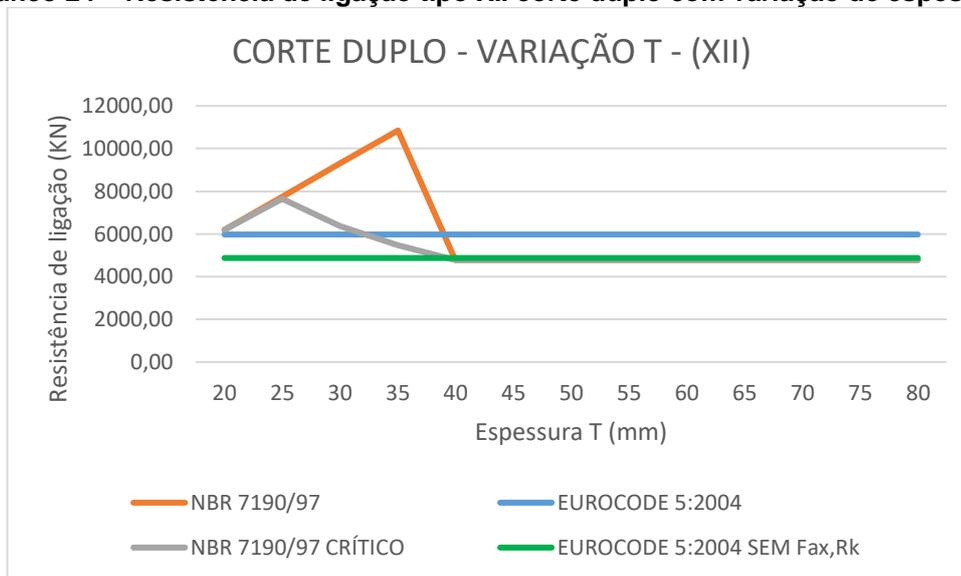


Fonte: Autora

Pela NBR 7190/97 temos um crescimento da resistência entre 20 e 35mm com ruptura ocorrendo pelo embutimento na peça central de eucalipto devido à espessura t ser referente à peça central; a partir de 40mm vemos que a espessura t passa a ser referente às peças externas de pinus e então a resistência atinge valores constantes, pois as peças de pinus estão sempre a 20mm e a ruptura passa a ocorrer somente pelo embutimento das peças externas. A resistência crítica apresenta divergências, pois apenas a 20mm que o menor valor de resistência de ligação é referente à

espessura e resistência ao embutimento da peça central de eucalipto, enquanto que de 25 a 80mm o menor valor é a partir do uso dos dados das peças externas de pinus, com ruptura ocorrendo pelo embutimento nessas peças.

Gráfico 24 – Resistência de ligação tipo XII corte duplo com variação de espessura



Fonte: Autora

Tabela 45 – Modos de ruptura para ligação XII corte duplo com variação da espessura

| LIGAÇÃO XII | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Local NBR | Local NBR crítico | Local EUROCODE | Local EUROCODE sem Fax,Rk |
| Embutimento 2 | Embutimento 2 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 2 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |
| Embutimento 1 | Embutimento 1 | Embutimento peças externas | Flexão do pino com 1 rótula plástica |

Fonte: Autora

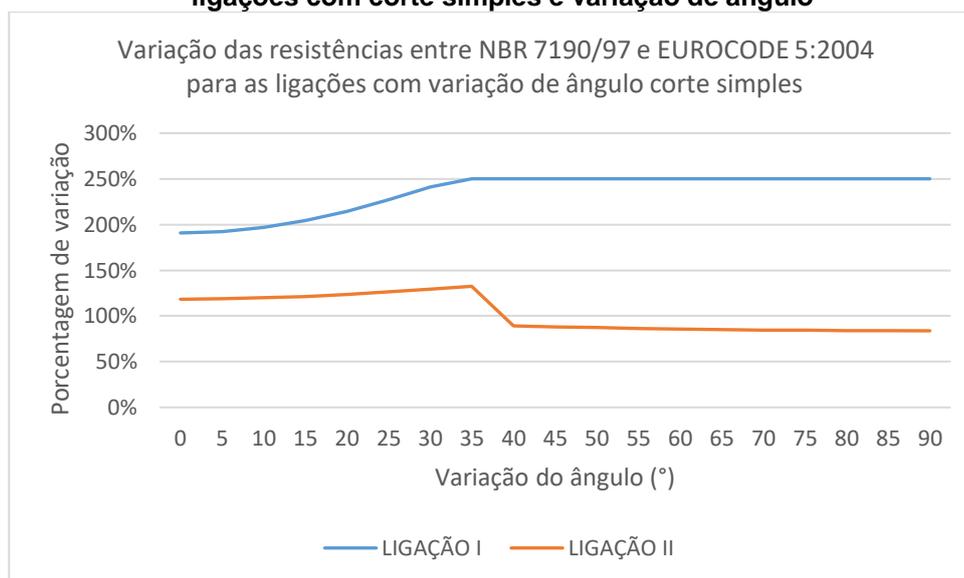
4.3 Análise de resultados

Para os resultados obtidos em corte simples com variação do ângulo, vemos que com espessuras pequenas entre as peças da ligação a resistência tende a diminuir de acordo com o aumento do ângulo e que os valores do EUROCODE 5:2004

são maiores do que os da NBR 7190/97 durante toda a variação da angulação, seja com ou sem efeito de corda. Já quando a espessura de ambas as peças é mais elevada o EUROCODE 5:2004 manteve a diminuição da resistência com o aumento do ângulo, porém a NBR 7190/97 se alterou e a resistência passou a aumentar para depois manter constante devido a alteração do modo de ruptura de flexão do pino para embutimento na peça de menor espessura. Nesse caso, o EUROCODE 5:2004 sem o efeito de corda se aproxima da curva apresentada pela norma brasileira, mas com valores inferiores.

Conforme mostra o gráfico 25, vemos que para a ligação I os valores do EUROCODE 5:2004 chegam a ultrapassar em 150% os valores obtidos pela norma brasileira, sendo maior que a NBR 7190/97 durante toda a variação do ângulo. Já na ligação II vemos que o EUROCODE 5:2004 inicia seus valores maiores do que a norma brasileira em aproximadamente 25%, para decair e se tornar menor em aproximadamente 15% quando o ângulo começa a ser de 40°.

Gráfico 25 – Variação da resistência entre NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 para as ligações com corte simples e variação de ângulo



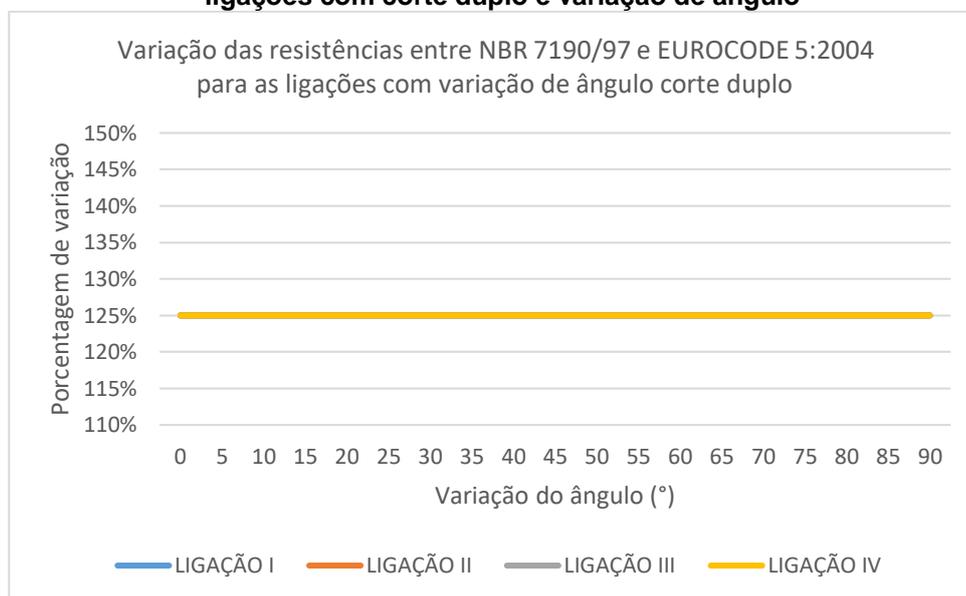
Fonte: Autora

No corte duplo com variação de ângulo, com as espessuras das peças externas menores do que a peça central vemos que com o aumento do ângulo a resistência de ligação tende a diminuir tanto para a norma europeia quanto para a norma brasileira. Os valores do EUROCODE 5:2004 são maiores do que os da NBR 7190/97, mas em contrapartida os resultados sem o efeito de corda se aproximam

mais dos valores da norma brasileira. Nesse caso, em ambas as normas, como a espessura das peças externas é menor do que a espessura da peça central, o rompimento ocorre pelo embutimento nas peças externas. Já para o caso em que as espessuras das peças externas são maiores do que a peça central temos que para ambas as normas os resultados de resistência são constantes, com a norma europeia mais uma vez superando os resultados da norma brasileira. Isso ocorre, pois, pela peça central ser de menor espessura, o rompimento para ambas as normas ocorre pelo embutimento da peça central, independente da peça externa estar sofrendo a variação do ângulo.

Como pode ser verificado no gráfico 26, independentemente do tipo de ligação para corte duplo os valores do EUROCODE 5:2004 foram sempre 25% superiores aos valores encontrados para a NBR 7190/97.

Gráfico 26 – Variação da resistência entre NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 para as ligações com corte duplo e variação de ângulo



Fonte: Autora

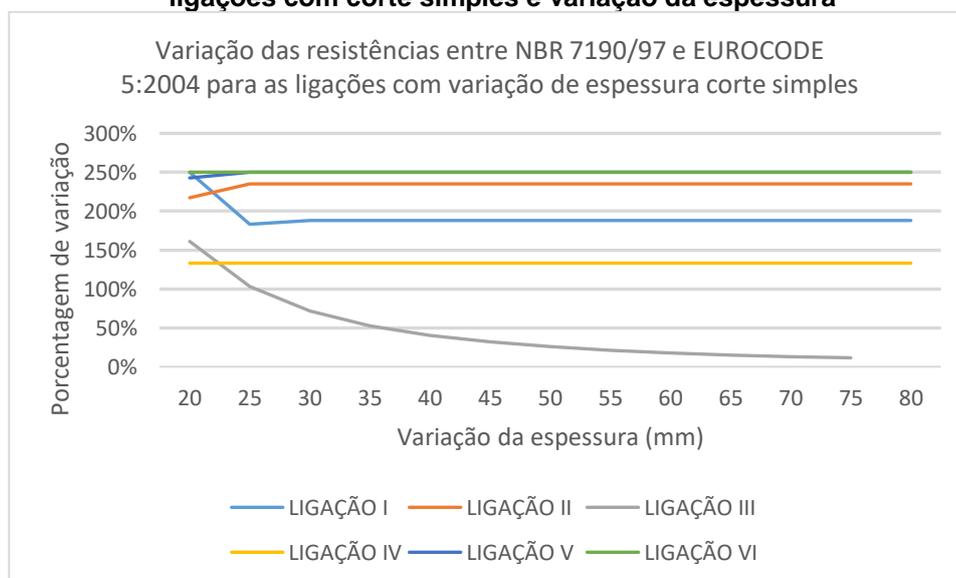
Para as ligações propostas com variação de espessura e corte simples vemos que a NBR 7190/97 mantém um padrão em que a resistência de ligação em grande parte das situações se mantém constante do início ao fim da variação de espessura da peça de pinus, ocorrendo em detrimento da espessura da peça de eucalipto estar fixa entre 15 e 20mm e essa ser a peça que irá ter mudança no ângulo de solicitação conforme os tipos de ligação. Assim, a norma brasileira apresenta valores constantes

e, exceto quando ambas as peças estão solicitadas a 0° juntas, o rompimento sempre se mantém constante no embutimento da peça de eucalipto.

Já o EUROCODE 5:2004 apresenta valores maiores e algumas variações em relação aos resultados da norma brasileira, principalmente na situação em que ambas as peças estão solicitadas a 0°, pois a norma europeia detecta que a ruptura ocorre quando ambas as peças têm espessuras similares, pelo embutimento da peça de menor resistência (a peça de pinus) e depois ocorre a rotação do pino com embutimento na peça de eucalipto e formação de uma rótula plástica. Quando as peças estão sendo solicitadas à ângulos diferentes, fazendo com que a peça de eucalipto tenha a menor resistência e espessura, o EUROCODE 5:2004 também apresenta resultados similares com os da norma brasileira, mostrando que o rompimento ocorre pelo embutimento na peça de eucalipto.

Avaliando a diferença de valores entre as resistências obtidas pela norma europeia e pela norma brasileira nas ligações propostas para corte simples pode-se verificar que em todas as ligações, exceto a ligação III, o EUROCODE 5:2004 apresenta valores acima do que a NBR 7190/97 propõe, com variação de até 150% entre as resistências.

Gráfico 27 – Variação da resistência entre NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 para as ligações com corte simples e variação da espessura



Fonte: Autora

Para as ligações propostas com corte duplo a NBR 7190/97 apresenta resultados constantes dependendo principalmente da espessura das peças fixas ao

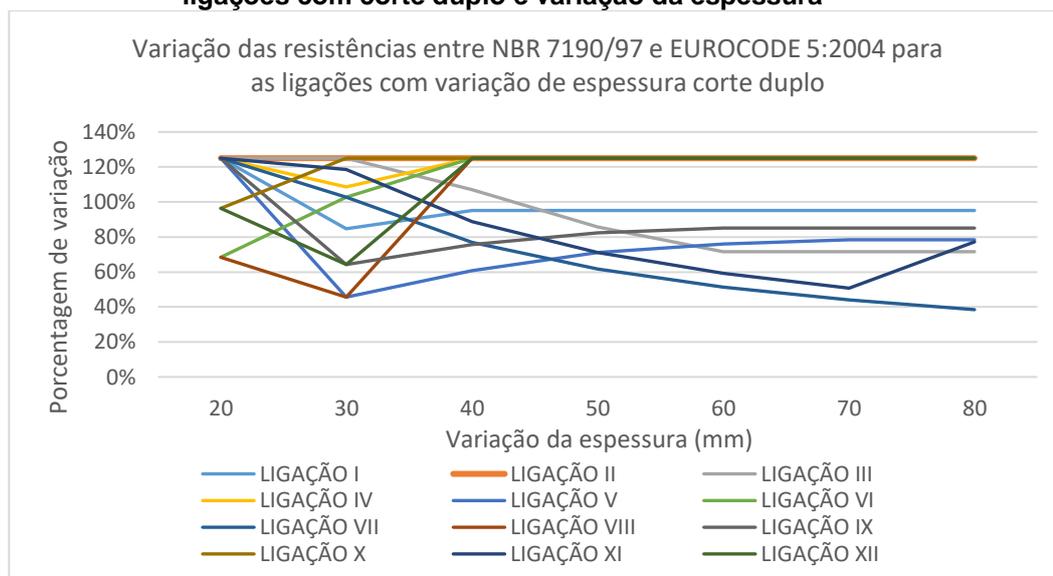
longo dos tipos de ligação, pois é a espessura das peças que determinará o valor da espessura “t” e, na grande maioria dos casos, independente da resistência da peça ou do ângulo em que está sendo solicitado, o formulário da norma brasileira mostrava que o rompimento iria ocorrer pelo embutimento na peça central de eucalipto, justamente pela forma como é determinado a espessura “t” para o cálculo da resistência de ligação.

Com o propósito de avaliar resultados críticos considerando não apenas a espessura das peças, mas como também a sua resistência e o ângulo de solicitação, vemos que houveram algumas diferenças entre a resistência crítica e o cálculo padrão da NBR 7190/97, principalmente nessas ligações tipo corte duplo, pois as resistências calculadas para determinar a resistência crítica não eram calculadas utilizando apenas a menor espessura, mas sim a espessura da peça, sua resistência e o seu ângulo de solicitação. Assim, em muitos casos foi possível detectar que o menor valor de resistência não era o apresentado pela norma brasileira, havendo mudanças no modo de ruptura.

Diferente da norma brasileira, o EUROCODE 5:2004 faz a avaliação da resistência de ligação e do rompimento levando em consideração não somente a espessura das peças, mas também a sua resistência e o ângulo em que está sendo solicitada. Dessa forma, o formulário da norma europeia apresenta resultados mais coerentes em relação aos dados de entrada: quando a espessura da peça central era menor, o rompimento ocorria pelo embutimento na peça central; quando os valores de espessura de ambas as peças eram grandes e estavam solicitados a 0° a norma apresentava que iria ocorrer a flexão do pino com formação de rótulas plásticas. Ainda assim, em algumas ligações de corte duplo vemos que a norma brasileira supera os valores apresentados pela norma europeia, e isso ocorre geralmente nos momentos em que está havendo mudança no modo de ruptura em ambas as normas. Assim, nesses casos a norma brasileira deixa de ser conservadora.

De todos os casos avaliados, os de corte duplo foram os que apresentaram valores de resistência pela NBR 7190/97 maiores do que para o EUROCODE 5:2004. Apenas na ligação II que os valores da norma europeia se apresentam maiores do que a norma brasileira durante toda a variação da espessura, enquanto que nas demais ligações os valores obtidos são menores na maioria das variações da espessura de ligação.

Gráfico 28 – Variação da resistência entre NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004 para as ligações com corte duplo e variação da espessura



Fonte: Autora

De modo geral, as diferenças entre as normas apareceram principalmente devido à diferença de formulário para o cálculo das ligações, visto que a NBR 7190/97 apresenta duas fórmulas para o cálculo das ligações, sendo uma fórmula para o embutimento na madeira e outra para a flexão do pino, ambas definindo a peça de ruptura pela espessura, enquanto que a norma europeia apresenta seis fórmulas para corte simples e outras quatro para corte duplo, sendo capaz de levar em consideração a diferença de espessura entre as peças, a diferença de espécie entre as peças e a variação do ângulo de solicitação da ligação. O fato de que a norma brasileira determina os valores de ruptura e o modo de ruptura apenas pela avaliação da espessura das peças leva à um cálculo menos crítico e menos cuidadoso de uma ligação, visto que em alguns casos apresentados vemos uma peça com maior espessura e menor resistência ao embutimento, devido o ângulo em que está solicitado e a espécie da madeira. Além disso, a NBR 7190/97 não considera o efeito de corda em seu cálculo, e isso é possível verificar pelas figuras apresentadas para os tipos de rupturas na norma, onde pode-se ver a rotação de corpo livre; em muitos casos o acréscimo do efeito de corda na norma europeia era o responsável pela diferença de valores entre ambas as normas, de forma que a norma brasileira sempre tenha uma segurança muito maior para a resistência de ligação.

5 CONCLUSÃO

As análises feitas nas diversas ligações propostas para o estudo deixam claro que há sim inúmeras divergências entre a NBR 7190/97 e o EUROCODE 5:2004, principalmente quanto aos modelos de cálculo de ligações parafusadas apresentados por ambas as normas. É possível verificar com o estudo que a norma brasileira apresenta critérios simplificados para a determinação da resistência de ligação, podendo assim causar dúvidas por parte do projetista, necessitando de uma avaliação mais cuidadosa e criteriosa para o dimensionamento de uma ligação, considerando noções de segurança e economia. A norma brasileira, por apresentar apenas dois tipos de modos de ruptura e apenas o critério de espessura mínima, deixa uma lacuna na avaliação de ligações com diversos elementos de variação, como a diferença entre ângulo de solicitação, espécie das peças, relação entre resistência das peças ligadas com a consideração do ângulo de atuação da força.

Em comparação com a norma brasileira, o EUROCODE 5:2004 apresenta diversos modos de ruptura para corte simples e corte duplo, sendo capaz de estender a avaliação da resistência considerando ângulo de solicitação e também a diferença entre espécie das peças. Ou seja, a norma europeia traz um maior auxílio na visualização de possíveis situações de ligações em estruturas de madeira, tendo uma gama maior de modos de rupturas e conseqüentemente de considerações mais próximas da situação real.

Como sugestão para trabalhos futuros, avaliar a comprovação teórica experimentalmente por meio de ensaios em corpos de provas de ligação; além disso, também avaliar o dimensionamento das ligações utilizando outra norma além da europeia e da brasileira, como a norma LRFD:1996.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. A. O. **Unções Pregadas de Madeira**. 174 f. São Paulo, 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paul, São Paulo, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 880: Projeto estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/97: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.

BAENA, Juliano Silveira. **Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira**. 2015. 115 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

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 COM BARRAS DE AÇO COLADAS COM EPÓXI EM MADEIRAS DE ALTA DENSIDADE: influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica**. Influência dos defeitos da madeira e dos erros de produção na resistência mecânica. 2015. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

DORIGON, Giovanna. **COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES PREGADAS FEITAS DE ACORDO COM A ABNT NBR 7190:1997 E O EN 1995-1-1 EUROCODE 5: 2004**. 2018. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5 - Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. Bruxelas: CEN, 2004.

FERNÁNDEZ, Bianca Oliveira; CALIL JUNIOR, Carlito; MOLINA, Julio Cesar. ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE TRELIÇAS MODULARES PARA PONTES EM MADEIRA. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 58, n. 13, p. 33-50, mar. 2011.

Johansen, K. W. **THEORY OF TIMBER CONNECTIONS. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING**. Zurich. Vol. 9. 1949.

LE GOVIC, Claude. **Les assemblages dans la construction em bois.** CTBA, 1995.

MENDES, Paulo Miguel Ferreira de Castro. **Ligações em estruturas de madeira: tecnologia e dimensionamento de acordo com o EUROCÓDIGO 5.** Tecnologia e dimensionamento de acordo com o EUROCÓDIGO 5. 1994. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 1994.

MOREIRA, Márcio Sampaio Sarmet. **LIGAÇÕES ESTRUTURAIS DE PEÇAS DE MADEIRA POR MEIO DE ADESIVO EM ÁREAS REDUZIDAS ASSOCIADO A ELEMENTOS DE PINOS.** 2004. 462 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

NBR 8800 - PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO E DE ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE EDIFÍCIOS. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

OLIVEIRA, Marcos Antônio Melo e. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira.** 2001. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PEREIRA, Samuel Soares Camarinha. **Avaliação Experimental Das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga.** 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira.** 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2003. 241 p.

PORTEOUS, Jack; KERMANI, Abdy. **Structural timber design to Eurocode 5.** Blackwell Publishing, 2007.

SCHWANZ, Marcos Vinicius. **ELABORAÇÃO DE SOFTWARE EDUCACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES EM MADEIRA COM PINOS METÁLICOS SEGUNDO EUROCODE 5.** 2008. 132 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2008.

SILVA JUNIOR, Josué da. **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES EM CORTE DUPLO EM MADEIRA COM PARAFUSOS PASSANTES.** 2017. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

SILVA, José de Castro; OLIVEIRA, José Tarcísio da Silva. **Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de Eucalyptus saligna Sm., em**

diferentes condições de umidade relativa do ar. R. Árvore, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 233-239, 19 fev. 2003.

TIMBER ENGINEERING STEP 1. Basis of design, material properties, structural components and joints. Holanda: Centrum Hout. 1995.

TOMAZ, Daniel Ferreira. **FENÔMENOS DE SEGUNDA ORDEM EM LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM MADEIRA.** 2015. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015., Curitiba, 2018.

XAVIER, Carolina Nogueira. **LIGAÇÕES ESTRUTURAIS COM PARAFUSO E BARRA ROSQUEADA UTILIZANDO MADEIRA DE *Eucalyptus pellita* e *Corymbia citriodora*.** 2013. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Florestal, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013