

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

MARCOS VINICIUS SCHWANZ

**ELABORAÇÃO DE *SOFTWARE* EDUCACIONAL PARA  
DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES EM MADEIRA COM PINOS  
METÁLICOS SEGUNDO EUROCODE 5 (2008)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO  
2014

MARCOS VINICIUS SCHWANZ

**ELABORAÇÃO DE SOFTWARE EDUCACIONAL PARA  
DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES EM MADEIRA COM PINOS  
METÁLICOS SEGUNDO EUROCODE 5 (2008)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

Co-orientador: Prof. Msc. Lucio Geronimo Valentin

CAMPO MOURÃO  
2014



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### Trabalho de Conclusão de Curso

#### ELABORAÇÃO DE *SOFTWARE* EDUCACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES EM MADEIRA COM PINOS METÁLICOS SEGUNDO EUROCODE 5 (2008)

por

**Marcos Vinicius Schwanz**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 08h20min do dia 05 de fevereiro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof<sup>a</sup>. Me. Lucio Geronimo Valentin**

( UTFPR )

Co-orientador

**Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira**

( UTFPR )

**Prof<sup>a</sup>. Me. Jeferson Rafael Bueno**

( UTFPR )

**Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes**

(UTFPR)

**Orientador**

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dr. Marcelo Guelbert**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

Aos meus pais Oscar e Varcilia.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por estar sempre junto comigo, me guiando, fortalecendo e encorajando a enfrentar os desafios vividos a cada dia.

Agradeço imensamente aos meus pais, Oscar e Varcilia, por serem tão carinhosos comigo e pelo suporte durante toda a minha vida e especialmente durante a graduação, vocês são meu porto seguro! O amor incondicional, o apoio, o incentivo, as broncas, as comemorações, me fizeram chegar até aqui e me tornaram uma pessoa melhor, que ama muito vocês e tem muito orgulho de vocês. Agradeço minha irmã, Aline, que com seu jeito simples e cativante, sempre me ajudou a ver as dificuldades com outros olhos, olhos de esperança e de alegria, amo você “Zé mané”!

Tia Beta e Dani, muito obrigado por me acolherem em Campo Mourão durante os meus primeiros anos de faculdade, o apoio de vocês, sem dúvida, foi essencial para que eu conseguisse cumprir esta etapa de minha vida.

Ao meu orientador e amigo Jorge Góes, agradeço por todos esses anos de conselhos, lições e ensinamentos que auxiliaram em meu crescimento pessoal e profissional, e pela paciência e dedicação durante sua orientação para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador Lucio Valentin, que se prontificou a ajudar sem ao menos me conhecer e sempre esteve a disposição me auxiliando durante o desenvolvimento deste software.

Aos meus companheiros da REP 100, Luana, Fernando e Chapisco (“Um cachorro não se importa se você é rico ou pobre, apenas dê seu coração a ele, e ele lhe dará o dele.” – Marley e Eu), obrigado pelas risadas, pelas histórias, pelas comidas e pela parceria de vocês, que já vem desde antes de morarmos juntos!

As pessoas que ocupam um lugar especial em minha vida, Paulo, Brayan, Othon, Carol, Vanessa, Lilian, Aléxia, Ana, Fernanda, Letícia, Paty, muito obrigado pelas viagens, festas, risadas, gordices e momentos de reflexão e incentivo. Cada um marcou e marca minha vida com seu jeito de ser e suas características.

A família PET, vocês são incríveis, o comprometimento de cada um, a vontade de ajudar os outros, marcou minha vida. Todas as atividades desenvolvidas, os churrascos, as reuniões vão ser para sempre lembradas.

A equipe Pórticos, desde o início foi um sonho e uma honra trabalhar com pessoas focadas e dedicadas como essas que passaram e permanecem na empresa e em minha memória.

A todos os meus amigos de Lugo, onde juntos vivemos esta experiência incrível e agora permanecem as boas lembranças e as grandes amizades que continuam além das fronteiras.

A todos os professores e servidores que participaram de minha formação acadêmica.

E por fim, a todas as pessoas que passaram e tocaram minha vida.

## RESUMO

SCHWANZ, Marcos V. (2014). **Elaboração de *software* educacional para dimensionamento de ligações em madeira com pinos metálicos segundo EUROCODE 5 (2008)**. Campo Mourão, 2014. 100p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

A tarefa de projetar ligações em estruturas de madeira continua sendo um dos grandes desafios de engenheiros e arquitetos. Estima-se que calcular e detalhar ligações em madeira pode consumir de 50% a 80% do tempo de projeto e ainda, a execução das ligações pode consumir mais de metade do tempo de execução de uma obra. Quando realizado manualmente, os cálculos tornam-se complexos e extensos, porém com o avanço da informática, é possível desenvolver *softwares* que auxiliam nessa tarefa, possibilitando ao profissional somente validar os resultados dos cálculos e se concentrar na análise dos mesmos. As ligações parafusadas em madeira constituem-se um dos modos mais práticos e difundidos no Brasil, sendo que, os parafusos metálicos são responsáveis por transmitir os esforços por cisalhamento entre os planos de corte. Os documentos normativos europeu (EUROCODE 5) e brasileiro (NBR 7190) apresentam modelos de cálculo semelhantes, desenvolvidos a partir da mesma teoria, entretanto, o modelo brasileiro é mais simplificado, solucionando com precisão apenas casos particulares. Considerando essas particularidades surge a necessidade de desenvolvimento de um *software* para o dimensionamento de ligações parafusadas, considerando o modelo de cálculo da norma européia, devidamente adaptado às condições nacionais de espécies, coeficientes de minoração e modificação das resistências. O software TCD (*Timber Connections Design*) constitui-se em uma importante ferramenta didática e de disseminação do modelo de cálculo de ligações parafusadas, contribuindo para o desenvolvimento da área de construções de madeira no país.

**Palavras-chave:** Ligações em madeira, *software*, pinos metálicos, estruturas de madeira.

## ABSTRACT

SCHWANZ, Marcos V. (2014). **Elaboration of educational software for timber connections design with metal pins according to EUROCODE 5 (2008)**. Campo Mourão, 2014, 100p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

Timber connections design remain one of the great challenges for engineers and architects. Detailing and designing timber connections can consume 50% until 80% of the time, even the connections execution can consume more than a half of the total building execution time. When performed manually, the calculation becomes complex and extensive, however, with the advance of computer science, it is possible to develop software to support this task, enabling the professional only validate the calculation results and concentrate on their analysis. The timber bolted connections constitutes one of the most useful and widespread joints in Brazil, considering that the steel bolts are responsible to transmit shear forces between the shear planes. The European Standard (EUROCODE 5) and Brazilian Standard (NBR 7190) show similar design procedure, developed through the same theory, although, the Brazilian design is more simplified, solving with precision only particular cases. Considering these particularities, emerged the aim of the development of a software for bolted connections design considering the European Standard Design Method, correctly adapted for the national conditionals of species, partial factors and strength modification factors. The TCD (Timber Connections Design) software constitutes an important didactical tool and a dissemination way of the bolted connections design method, contributing for the development of timber construction field in the country.

**Keywords:** Timber connections; Software; Steel Bolts; Timber structures.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formas de transmissão de esforços nas ligações de estruturas de madeira .....	18
Figura 2 - Tipos de entalhes estruturais .....	19
Figura 3 - Tipos de chapas com dentes estampados .....	20
Figura 4 – Ligações com anéis metálicos .....	21
Figura 5 - Cavilhas .....	22
Figura 6 - Tipos de emendas coladas .....	23
Figura 7 - Tipos de parafusos auto-atarrachantes.....	26
Figura 8 - Arruela definida segundo DIN 440R.....	28
Figura 9 - Arruela definida segundo DIN 440V.....	28
Figura 10 - Arruelas definidas segundo DIN 436.....	29
Figura 11 - Inclinação das fibras de uma peça de madeira.....	37
Figura 12 - Posicionamento dos nós em uma peça de madeira.....	38
Figura 13 - Nós individuais.....	38
Figura 14 - Conjunto de nós.....	39
Figura 15 - Nó na borda de uma peça.....	39
Figura 16 - Medição do diâmetro dos nós em tábuas .....	40
Figura 17 - Formas de medir uma racha .....	42
Figura 18 - Fenda superficial.....	42
Figura 19 - Fenda que atravessa a peça em espessura .....	42
Figura 20 - Medição do encurvamento.....	43
Figura 21 - Medição do encanoamento.....	44
Figura 22 - Medição do arqueamento .....	45
Figura 23 - Medição do torcimento.....	46
Figura 24 - Linha radial representativa em peças contendo medula.....	47
Figura 25 - Linha radial representativa em peças sem medula.....	47
Figura 26 - (a) Comportamento mecânico da resistência ao embutimento da madeira e (b) comportamento mecânico de resistência à flexão de pino de aço.....	58
Figura 27 - Grafico dos modos de falha segundo norma do EC5.....	62
Figura 28 - Tensões normais da arruela com a madeira.....	63
Figura 29 – (a) Comparação entre o comportamento real e idealizado da madeira; (b) Comparação entre o comportamento real e idealizado do aço.....	64
Figura 30 – Definição do espaçamento e distância para ligações.....	69
Figura 31 – Ligações com tração normal às fibras.....	71
Figura 32 – Pinos metálicos em corte simples .....	72
Figura 33 – Pinos metálicos em corte duplo.....	73
Figura 34 – Espaçamento em ligações com pinos .....	75
Figura 35 - Modo de falha II do modelo de Johansen para duas seções de corte ....	76
Figura 36 - Modo de falha I do modelo de Johansen para uma seção de corte.....	76
Figura 37 - Escolha inicial para começar o cálculo .....	80
Figura 38 - Fluxograma para 1 seção de corte.....	81
Figura 39 - Fluxograma para 2 seções de corte.....	82
Figura 40 - Tela inicial do programa.....	86
Figura 41 – Aba "Seções de Corte".....	86
Figura 42 – Aba "Direção" .....	87
Figura 43 - Aba "Elementos de Madeira" .....	87

Figura 44 - Aba "Elementos Metálicos" .....	89
Figura 45 - Aba "Resultado" .....	90
Figura 46 - Aba "Relatório" .....	91
Figura 47 - Menu "Arquivo" .....	91
Figura 48 - Menu "Ajuda" .....	92
Figura 49 - Tela "Ajuda" .....	92
Figura 50 - Tela "Sobre" .....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de resistência das Coníferas .....	30
Tabela 2 - Classe de resistência das Folhosas .....	30
Tabela 3 - Classe de umidade.....	31
Tabela 4 - Valores do $k_{mod2}$ .....	34
Tabela 5 - Valores de $k_{mod3}$ para Coníferas.....	35
Tabela 6 - Valores de $k_{mod3}$ para Folhosas.....	35
Tabela 7 - Limitações nos defeitos dos nós para peças de seção transversal de 3,5 cm x 12,5 cm e comprimento de 2,60 m. ....	40
Tabela 8 - Ações permanentes diretas consideradas separadamente.....	55
Tabela 9 - Ações permanentes diretas consideradas agrupadas.....	55
Tabela 10 - Ações variáveis consideradas separadamente .....	56
Tabela 11 - Ações variáveis consideradas conjuntamente1) .....	56
Tabela 12 – Valores dos fatores de combinação ( $\psi_0$ ) e de redução ( $\psi_1$ e $\psi_2$ ) para as ações variáveis.....	57
Tabela 13 – Valores de resistência variando a espessura dos elementos.....	77
Tabela 14 – Resultado da simulação para uma seção de corte.....	93
Tabela 15 – Resultado da simulação para duas seções de corte .....	95

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Conversão de JP para milímetros .....	24
Quadro 2 - Tipos de pregos.....	24
Quadro 3 - Materiais usados em parafusos .....	27
Quadro 4 - Dimensões dos parafusos segundo ISO 4016 .....	27
Quadro 5 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440R .....	28
Quadro 6 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440V .....	28
Quadro 7 - Dimensões da norma DIN 436 .....	29
Quadro 8 - Coeficiente $\alpha_e$ .....	32
Quadro 9 - Definição de classes de carregamento e valores de $k_{mod1}$ .....	33
Quadro 10 – Exemplos práticos das classes de carregamento.....	34
Quadro 11 - Máxima inclinação das fibras em cada classe .....	37
Quadro 12 - Máxima proporção permissível para os nós na face estreita .....	41
Quadro 13 - Limitações para rachas e fendas.....	41
Quadro 14 - Encurvamento permissível para peças com espessura de 38 mm .....	43
Quadro 15 - Encanoamento máximo admitido em cada classe .....	44
Quadro 16 - Arqueamento permissível em cada classe .....	45
Quadro 17 - Torcimento permissível em cada classe .....	47
Quadro 18 - Classes de densidade definidas na ASTM D245-93 .....	48
Quadro 19 - Equações de Johansen e modos de falha para uma seção de corte ....	60
Quadro 20 - Equações de Johansen e modos de falhas para duas ou mais seções de corte .....	61
Quadro 21 - Equações da norma Eurocode 5 e modos de falha para uma seção de corte .....	65
Quadro 22 - Equações da norma Eurocode 5 e modos de falha para duas seções de corte .....	66
Quadro 23 - Espaçamento e distâncias mínimas para parafusos .....	69
Quadro 24 - Valor de $\alpha_e$ .....	80

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
3.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA .....	17
3.1.1 <i>Tipos de Ligações</i> .....	17
3.1.1.1 Transmissão direta – Entalhes ou Encaixes.....	19
3.1.1.2 Transmissões de esforços através de elementos externos.....	19
3.2 LIGAÇÕES COM PINOS METÁLICOS.....	23
3.2.1 <i>Pregos</i> .....	23
3.2.2 <i>Parafusos</i> .....	25
3.2.2.1 Parafusos Auto-atarrachantes.....	25
3.2.2.2 Parafusos com porcas e arruelas.....	26
3.3.1 <i>Classes das madeiras</i> .....	29
3.3.2 <i>Coefficientes de minoração</i> .....	32
3.3.3 <i>Coefficientes de modificação</i> .....	33
3.3.3.1 Coeficiente de modificação <i>kmod1</i> .....	33
3.3.3.2 Coeficiente de modificação <i>kmod2</i> .....	34
3.3.3.3 Coeficiente de modificação <i>kmod3</i> .....	35
3.4 COMBINAÇÃO DE AÇÕES E/OU ESFORÇOS .....	48
3.4.1 <i>Estados Limites</i> .....	48
3.4.1.1 Estados Limites de Serviço .....	49
3.4.1.2 Estados Limites Últimos.....	49
3.4.2 <i>Ações</i> .....	49
3.4.2.1 Ações Permanentes .....	49
3.4.2.2 Ações Variáveis.....	50
3.4.2.3 Ações Excepcionais.....	50
3.4.3 <i>Combinações de Serviço</i> .....	50
3.4.3.1 Combinações quase permanentes de serviço.....	50
3.4.3.2 Combinações frequentes de serviço .....	51
3.4.3.3 Combinações raras de serviço .....	52
3.4.4 <i>Combinações Últimas</i> .....	52
3.4.4.1 Combinações Últimas Normais .....	52
3.4.4.2 Combinações Últimas Especiais ou de Construção.....	53
3.4.4.3 Combinações Últimas Excepcionais .....	54
3.4.5 <i>Coefficientes de combinação ou redução e de ponderação</i> .....	54
3.4.5.1 Coeficientes de ponderação.....	54
3.4.5.2 Coeficientes de combinação e redução .....	57
3.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS .....	58
3.6 MODELO DE CÁLCULO EUROCODE 5.....	64
3.6.1 <i>Momento devido à flexão do pino</i> .....	68
3.6.2 <i>Espaçamento</i> .....	69

3.6.3 Número efetivo de parafusos .....	70
3.7 MODELO BRASILEIRO DE CÁLCULO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS .....	70
3.7.1 Pré-furação .....	71
3.7.2 Resistência da ligação com pinos metálicos.....	72
3.7.3 Espaçamento .....	74
3.8 DISCUSSÕES SOBRE O MODELO BRASILEIRO .....	75
3.9 MODELO UTILIZADO NO SOFTWARE .....	78
3.10 LIGUAGEM UTILIZADA NO SOFTWARE.....	79
<b>4 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>80</b>
4.1 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO .....	80
4.2 CRIAÇÃO DA INTERFACE E COMPONENTES .....	83
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS ROTEIROS NA LINGUAGEM UTILIZADA .....	83
4.4 REALIZAÇÃO DE TESTES PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE .....	84
4.5 SIMULAÇÃO DE COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS.....	84
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>85</b>
5.1 SOFTWARE TCD – TIMBER CONNECTIONS DESIGN .....	85
5.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS .....	93
5.2.1 Simulação para uma seção de corte.....	93
5.2.2 Simulação para duas seções de corte.....	94
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE JOHANSEN .....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE B – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DA NORMA BRASILEIRA ATRAVÉS DO MODELO DE JOHANSEN.....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE C – EXEMPLOS PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE D – SOFTWARE TCD – TIMBER CONNECTIONS DESIGN .....</b>	<b>131</b>

## 1 INTRODUÇÃO

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

A madeira é considerada um material higroscópico, o que faz com que as suas propriedades sejam influenciadas pelo teor de umidade do meio, sendo importante levar em conta nos cálculos esta variação. Sua natureza biológica, faz com que ocorra deterioração destes elementos, e em determinados casos é suscetível ao fogo. Entretanto, através de tecnologias disponíveis, estes empecilhos podem ser minimizados ou até eliminados.

Encontram-se no mercado, peças de madeira roliças e serradas, que podem ser aplicadas desde vigas residenciais e industriais até como longarinas de pontes, porém estas peças estão limitadas ao tamanho das árvores encontradas na natureza, fazendo com que para vencer grandes vãos ou suportar grandes esforços, se faça necessário realizar a união de mais de uma peça. Esta união, pode ser realizada através de ligações diretas ou através de elementos externos, formando assim a estrutura de madeira.

Por unirem elementos distintos, as ligações têm a função de transmitir os esforços solicitantes entre as peças, tornando-se assim, um ponto crítico de uma estrutura, onde o seu cálculo deve ser realizado da forma mais precisa possível.

O dimensionamento da estrutura é de responsabilidade do engenheiro estrutural, que deve garantir que esta suporte as solicitações mecânicas. Quando realizado manualmente, os cálculos são complexos e extensos, porém com o avanço da informática, é possível desenvolver *softwares* que auxiliam nessa tarefa, possibilitando ao profissional somente validar os resultados dos cálculos e focar na análise dos mesmos.

Além das empresas de engenharia, estudantes também podem ser auxiliados pela informática e seus *softwares*. É notável que os atuais estudantes possuem grande familiaridade com computadores e suas tecnologias, os quais proporcionam

benefícios na compreensão e aprendizado. Portanto é importante o desenvolvimento de um recurso que auxilie didaticamente o estudante.

A norma brasileira de projeto de estruturas de madeira NBR 7190 apresenta um modelo simplificado de cálculo de resistência de ligações e que, comparada com outras normas, pode apresentar em alguns casos valores contra a segurança. O modelo de cálculo da norma brasileira e da norma europeia foram derivados do modelo de Johansen. Entretanto, o modelo europeu possibilita o cálculo mais preciso, pois atende a diferentes materiais, dimensões e modos de ruptura.

O desenvolvimento de um *software* com a intenção de auxiliar os alunos no aprendizado do modelo de cálculo da norma europeia, vem de encontro com as necessidades atuais de se ter um cálculo mais preciso das estruturas. Além disso, o *software* também pode servir para agilizar na tarefa do dimensionamento de ligações por parafusos metálicos, reduzindo o tempo de projeto.

Visando o auxílio no cálculo dos mais variados problemas encontrados no dia a dia das ligações com pinos metálicos, o programa foi desenvolvido baseado no método de cálculo do EUROCODE 5, com algumas adaptações, considerando as madeiras utilizadas no país e também os coeficientes de minoração já utilizado nas normas brasileiras.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um *software* para dimensionamento de ligações em madeira com pinos metálicos, conforme método do documento normativo da comunidade europeia EUROCODE 5 (2008), adaptado à realidade brasileira.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar o modelo de cálculo proposto pela norma europeia e brasileira;
- Escrever um código computacional para realizar o dimensionamento de ligações em madeira com pinos metálicos em atendimento a norma europeia, adaptada segundo coeficientes da norma brasileira;
- Desenvolver interface gráfica entre usuário e código;
- Desenvolver manual de uso;
- Validar os resultados obtidos por meio de comparação com exemplos teóricos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA

Atualmente, o uso da madeira como elemento estrutural está sendo mais procurado e explorado por engenheiros e arquitetos brasileiros, devido a suas excelentes propriedades mecânicas e também por ser um material sustentável, podendo ser proveniente de florestas nativas ou de reflorestamento.

As peças de madeira roliça, segundo Pfeil e Pfeil (2003), têm um comprimento limitado devido aos meios de transporte e ao tamanho das árvores, assim como as peças de madeira serrada, estas por sua vez podem ser ainda mais limitadas, alcançando de quatro a cinco metros de comprimento.

Segundo Calil Junior, Lahr e Dias (2003), existe uma grande dificuldade em encontrar peças comerciais de espécies tropicais acima de sete metros ou peças de reflorestamento acima de cinco metros, exigindo assim o uso de ligações para alcançar vãos maiores. As ligações podem ser consideradas como sendo os tipos de conexões que tem por finalidade ligar e transmitir os esforços entre os elementos estruturais.

Ambos autores afirmam que as ligações de uma estrutura são consideradas pontos fundamentais para a segurança da mesma, e a sua falha pode ser responsável pela ruína de toda a estrutura.

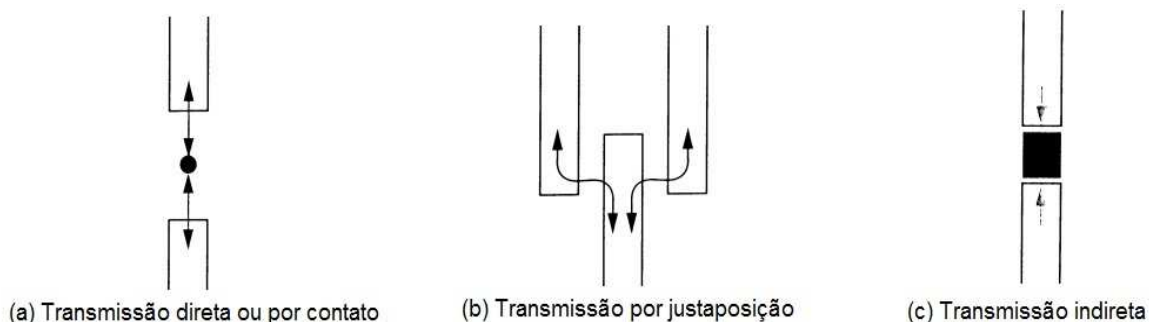
##### 3.1.1 Tipos de Ligações

Segundo Le Govic<sup>1</sup> (1995, apud SZÜCS 2008), as ligações podem ser divididas em três grupos considerando a forma pela qual os esforços são transmitidos:

---

<sup>1</sup>LE GOVIC, C. (1995). **Les assemblages dans la construction en bois**. Paris, França: Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 129p.

- Transmissão direta ou por contato direto: onde não há conector externo entre as peças de madeira (Figura 1a), este tipo de ligação transmite os esforços normais e cortante por meio de entalhes, também conhecidos como sambladuras.
- Transmissão por justaposição: existe uma superfície comum entre as peças que serão interligadas, através de um transpasse das peças (Figura 1b). Neste caso a ligação pode transmitir os esforços normais, tanto de tração como de compressão, cortantes ou momentos, e é realizada com conectores ou adesivos.
- Transmissão indireta: as peças não ultrapassam umas às outras, sendo necessário elementos intermediários para realizar a ligação (Figura 1c). Igualmente a transmissão por justaposição, esses tipos de ligações podem transmitir os esforços normais, cortantes ou momentos através de conectores ou adesivos.



**Figura 1 - Formas de transmissão de esforços nas ligações de estruturas de madeira**  
Fonte: Le Govic (1995) apud SZÜCS (2008).

Calil Junior, Lahr e Dias (2003) afirmam que as ligações podem ser divididas em dois grupos que são os entalhes ou encaixes, nos quais se realizam as transmissões de esforços por meio do contato direto entre as peças, e as ligações utilizando elementos externos, que transmitem os esforços por justaposição ou transmissão indireta.

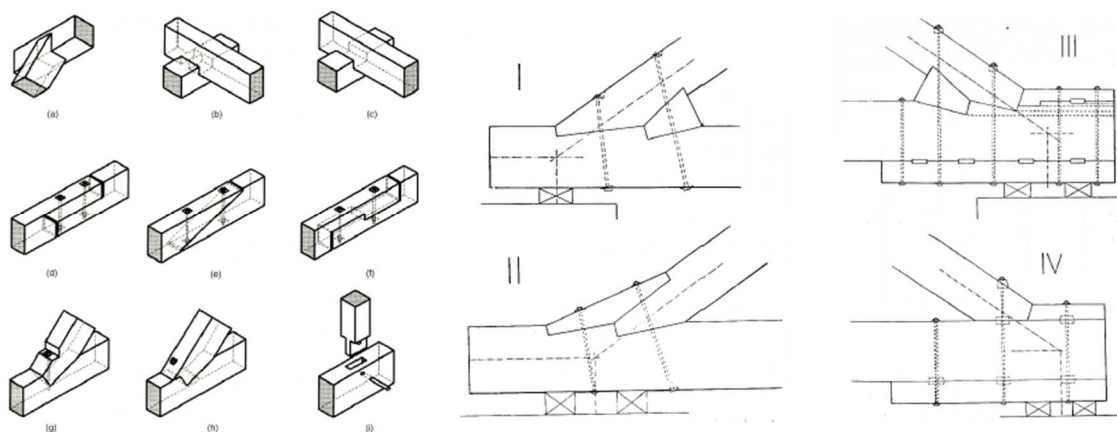
### 3.1.1.1 Transmissão direta – Entalhes ou Encaixes

O entalhe, encaixe ou sambladura é a forma mais tradicional de se fazer uma ligação e ainda uma das mais utilizadas na construção civil. Segundo Dias (2014), as sambladuras são ligações econômicas, pois não necessitam do auxílio de dispositivos externos, mas a sua execução demanda mão de obra qualificada.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), nas ligações por encaixe, a responsável por transmitir os esforços é a própria madeira. Os grampos, parafusos ou braçadeiras, são utilizados apenas como elementos de montagem, desconsiderando-os no cálculo estrutural.

Os entalhes são capazes de suportar os esforços de compressão entre as peças, sendo calculado somente para este caso, no entanto se existe a possibilidade de ocorrer a inversão dos esforços, por exemplo pelo vento, se faz necessário outro tipo de ligação (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

Alguns tipos de entalhes e encaixes estruturais são mostrados na Figura 2.



**Figura 2 - Tipos de entalhes estruturais**  
**Fonte: Dias (2014).**

### 3.1.1.2 Transmissões de esforços através de elementos externos

Alguns exemplos da transmissão através de elementos externos são:

- Pinos metálicos

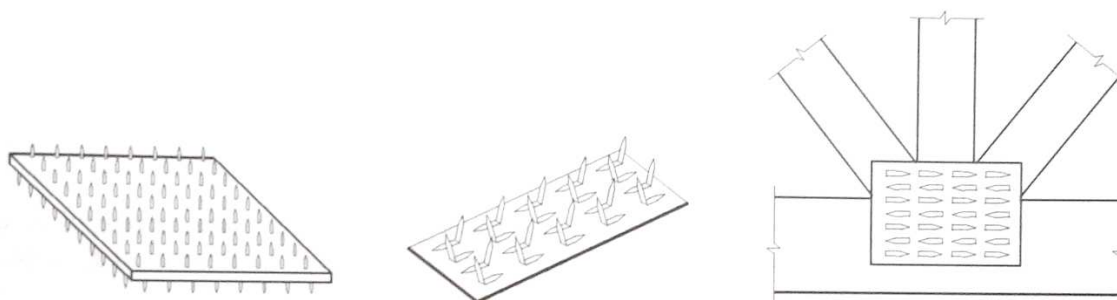
Segundo Calil Junior, Lahr e Dias (2003), os pinos são considerados os elementos de ligação mais utilizados, nos quais a transmissão de esforços causa um efeito de cisalhamento no pino.

Leutner (2013) define pinos metálicos como sendo um fixador cilíndrico de aço que é geralmente um prego ou um parafuso.

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 1997), os pinos metálicos devem ser instalados com pré-furação da madeira, tanto para as ligações pregadas como parafusadas. Nas ligações pregadas o diâmetro para a pré-furação varia conforme o tipo de madeira, onde para as coníferas  $d_0 = 0,85d_{ef}$  e para as folhosas  $d_0 = 0,98d_{ef}$ , onde  $d_{ef}$  é o diâmetro do prego. Já nas ligações parafusadas, para que as mesmas sejam consideradas rígidas o diâmetro de furação não deve exceder o diâmetro do parafuso acrescido de 0,5 mm, se forem empregados valores maiores, as ligações devem ser consideradas deformáveis.

- Chapas com Dentes Estampados (CDE)

Dias (2014) indica que as chapas são providas de dentes estampados ou pregos, os quais suportam os esforços e transferem para o outro lado da ligação. Na Figura 3, ilustra-se alguns tipos de Chapas com Dentes Estampados (CDE).



**Figura 3 - Tipos de chapas com dentes estampados**  
Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Segundo Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), o uso das chapas com dentes estampados é geralmente utilizado em madeiras de baixa densidade, pois assim a cravação dos dentes é realizada com maior eficiência.

De acordo com o projeto de revisão da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997), deve-se empregar as chapas com dentes estampados em peças estruturais somente quando o executor garantir a cravação dos dentes na madeira. Por sua vez, a resistência de cálculo atribuída ao projeto, deve ser garantida pelo respectivo fabricante das chapas.

Conforme Pfeil e Pfeil (2003), comumente as chapas são utilizadas em treliças pré-fabricadas, prensando-se a chapa contra as peças de madeira da ligação.

- Anéis metálicos

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), anéis metálicos são peças metálicas inseridas em entalhes, no formato do anel, realizados nas faces internas da ligação e mantidas na posição através de parafusos. Exemplos de ligações com anéis metálicos são demonstradas na Figura 4.



**Figura 4 – Ligações com anéis metálicos**  
Fonte: Dias (2014).

Segundo Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), a ligação com anéis metálicos suporta uma maior capacidade de carga, quando comparadas com as ligações por pinos metálicos, pois a transmissão dos esforços da ligação faz com que aconteça compressão entre a madeira e o anel e ocorra cisalhamento do disco de madeira interno.

Conforme descrito na NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997), os anéis devem ser fabricados conforme as especificações da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). Em ligações estruturais se admite o uso de anéis metálicos somente com diâmetros internos de 64 mm e 102 mm, e com espessura mínima de 4 mm e 5 mm respectivamente. Os parafusos que acompanham a ligação, os quais mantem a ligação na posição, devem ter diâmetros maiores que 12 mm e 19 mm, respectivamente para anéis de 64 mm e 102 mm de diâmetro.

- Cavilhas

Pfeil e Pfeil (2003), definem cavilha como sendo, pinos circulares confeccionados em madeira, as quais de acordo com a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) devem ser feitos com madeiras da classe C60 que é mais densa, ou então com madeiras de média densidade impregnadas com resina, aumentando assim a sua capacidade de carga.

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997), é admitido o uso de cavilhas em ligações estruturais apenas com os diâmetros de 16 mm, 18 mm e 20 mm. A pré-furação é realizada com o mesmo diâmetro da cavilha.

Dias (2014), complementa que é importante a cavilha estar completamente seca, para que não ocorra retração após a sua colocação na ligação. A ligação com cavilhas é demonstrada na Figura 5.



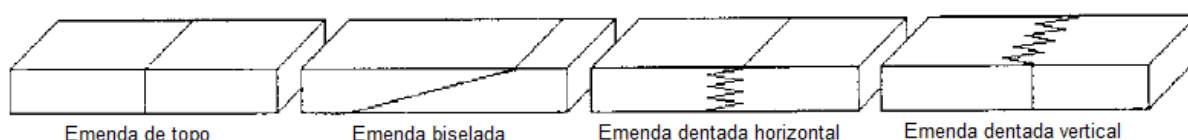
**Figura 5 - Cavilhas**  
Fonte: Dias (2014).

- Adesivos

De acordo com Calil Júnior, Lahr e Dias (2003), esta ligação é realizada através de uma fina película de adesivo, que é inserida entre as peças a serem ligadas. Este tipo de ligação é utilizado principalmente no caso da Madeira Laminada Colada (MLC).

Pfeil e Pfeil (2003) afirmam que nas indústrias de Madeira Laminada Colada, este tipo de ligação é amplamente utilizado, pois se tem o controle necessário para obter uma correta colagem, porém no canteiro de obras não se realiza este tipo de ligação, pois não é possível controlar rigorosamente o processo.

As ligações coladas também são utilizadas para unir peças de topo no sentido de seu comprimento com emendas de geometrias retas (topo), biseladas ou dentadas, conforme ilustra a Figura 6.



**Figura 6 - Tipos de emendas coladas**  
**Fonte: Macedo (1996).**

## 3.2 LIGAÇÕES COM PINOS METÁLICOS

As ligações com pinos metálicos podem ser divididas em dois grupos, pregos e parafusos, que são explicados a seguir.

### 3.2.1 Pregos

Conforme descrito em Pfeil e Pfeil (2003), os pregos são produzidos com arame de aço com baixo teor de carbono e possuem grande variedade de tamanhos. Ainda hoje no Brasil, os tamanhos são representados por dois números, onde o primeiro representa o diâmetro do arame que originou o prego, e o segundo indica o comprimento do prego.








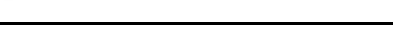

Gerdau (2014), mostra que o primeiro valor é indicado em JP (Jauge de Paris), a conversão das unidades Jauge de Paris para milímetros estão indicadas no Quadro 1, a segunda medida é indicada em LPP (Linhas de Polegadas Portuguesas) e obtemos a sua dimensão em milímetros multiplicando o valor indicado por 2,30 mm.



<b>JP</b>	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>mm</b>	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
<b>JP</b>	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
<b>mm</b>	2,7	3,0	3,4	3,9	4,4	4,9	5,4	5,9	6,4	7,0	7,6	

**Quadro 1 – Conversão de JP para milímetros**  
**Fonte: Gerdau (2014).**

Além das dimensões podemos encontrar diferentes tipos de pregos no mercado, que são demonstrados no Quadro 2.

<b>Tipo de Prego</b>	<b>Ilustração</b>
Prego com cabeça	
Prego sem cabeça	
Prego Ardox	
Prego Telheiro Galvanizado	
Prego com Cabeça Dupla	
Prego Anelado	
Prego Galvanizado	
Prego Quadrado	
Prego para Taco	

**Quadro 2 - Tipos de pregos**  
**Fonte: Gerdau (2014).**

### 3.2.2 Parafusos

Conforme Metálica (2014), parafusos são elementos não permanentes que realizam uma ligação estrutural, podendo ser removido quando for necessário. Em geral os parafusos podem variar conforme a forma da rosca, da cabeça, da haste e do tipo de acionamento.

Segundo Timber Engineering STEP 1 (1995), os parafusos podem ser classificados de três formas, os *dowels*, que são barras de aço lisas do diâmetro do furo ajustados, os *bolts*, que são os parafusos sextavados com porcas e arruelas, e os *screws*, que são os parafusos auto-atarrachantes.

Pfeil e Pfeil (2003) dividem os parafusos em dois grupos, que são os auto-atarraxantes e os com porcas e arruelas, os quais serão explicados a seguir.

#### 3.2.2.1 Parafusos Auto-atarrachantes

Normalmente estes parafusos são utilizados para prender acessórios metálicos em postes ou então na marcenaria e em geral não se utiliza em ligações de estruturas de madeira (PFEIL E PFEIL, 2003).

De acordo com Porteous e Kermani (2007), os parafusos auto-atarrachantes são usados em locais onde necessita-se de resistência mais elevada que os pregos, e com uma maior facilidade de remoção. Estes parafusos devem ser instalados sempre rosqueados e não necessitam de pré-furação para a sua instalação. Os tipos mais encontrados destes parafusos são o de cabeça chata (Figura 7a), o de cabeça arredondada (Figura 7b) e o de cabeça sextavada (Figura 7c). Os mesmos podem ser encontrados com haste lisa de seis milímetros ou menos.



**Figura 7 - Tipos de parafusos auto-atarrachantes**  
**Fonte: Adaptado Porteous e Kermani (2007).**

### 3.2.2.2 Parafusos com porcas e arruelas

Esses parafusos são normalmente estruturais, com formato cilíndrico e liso em seu corpo, em suas extremidades tem-se em um dos lados a cabeça e a rosca com a porca do outro, usa-se também arruelas metálicas nas pontas para diminuir a pressão de apoio na superfície. Eles são instalados em furos com folgas máximas de um a dois milímetros (PFEIL E PFEIL, 2003).

Timber Engineering STEP 1 (1995), define os *bolts*, como parafusos de cabeça hexagonal ou de cabeça quadrada, produzidos com aço com baixo teor de carbono e diâmetros variando de 12 a 30 mm. Também afirmam que é recomendável uma pré-furação com folga de um milímetro, e quanto maior for essa folga, menor será a capacidade de carga da ligação.

Os parafusos encontrados no mercado podem ser produzidos com diversos tipos de aço, porém todos são especificados segundo a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO..., 2008), os valores mínimos de resistência ao escoamento e da resistência à ruptura, de acordo com as normas, estão indicados no Quadro 3. Além disso a norma NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO..., 2008) ainda informa que não podem ser soldados nem aquecidos parafusos fabricados com aço temperado.

Especificação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Diâmetro d	
			mm	Pol
ASTM A307	-	415	-	$\frac{1}{2} \leq d \leq 4$
ISO 4016 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d \leq 36$	-
ASTM A325 <sup>a</sup>	635	825	$16 \leq d \leq 24$	$\frac{1}{2} \leq d \leq 1$
	560	725	$24 \leq d \leq 36$	$1 \leq d \leq 1 \frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d \leq 36$	-
ASTM A490	895	1035	$16 \leq d \leq 36$	$\frac{1}{2} \leq d \leq 1 \frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000	$12 \leq d \leq 36$	-

<sup>a</sup> Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.

**Quadro 3 - Materiais usados em parafusos**

Fonte: Adaptado NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO..., 2008).

Na NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO..., 2008), encontram-se referências a parafusos americanos e internacionais, onde a norma ISO 4016 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2000) define a geometria dos parafusos, e a norma ISO 898-1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1999) define as características do aço empregado no parafuso.

Os parafusos especificados segundo as normas ASTM A325<sup>a</sup>, ASTM A307 e ASTM A490 são, de um modo geral curtos, utilizados em estruturas metálicas, onde os elementos conectados possuem seções transversais esbeltas, portanto não são utilizados nas ligações de madeira e neste projeto de software.

Segundo a ISO 4016 (EUROPEAN..., 2000), os tipos de parafusos especificados pela norma são os indicados no Quadro 4.

Tipo de Parafuso	d (mm)	Área do parafuso (mm <sup>2</sup> )
M10	10,0	58,0
M12	12,0	84,3
M16	16,0	157,0
M20	20,0	240,0
M22	22,0	303,0
M24	24,0	353,0
M27	27,0	459,0
M30	30,0	561,0
M33	33,0	694,0
M36	36,0	817,0

**Quadro 4 - Dimensões dos parafusos segundo ISO 4016**

Fonte: Adaptado ISO 4016 (EUROPEAN..., 2000).

As arruelas para parafusos em estruturas de madeira são especificadas segundo a norma DIN 440 (DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING, 2001), sendo DIN 440R para arruelas redondas com furo central redondo e, DIN 440V para arruelas redondas com furo central quadrado, ilustradas nas Figuras 8 e 9 respectivamente. Suas dimensões especificadas por norma são encontradas nos Quadros 5 e 6.

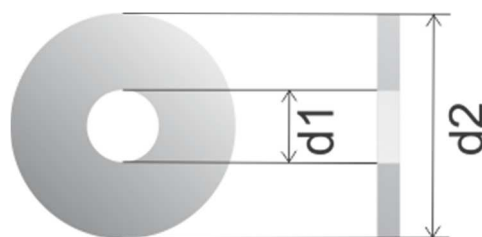


Figura 8 - Arruela definida segundo DIN 440R

Tipos de Arruelas	d1 (mm)	d2 (mm)
M10	11,0	34,0
M12	13,5	44,0
M16	17,5	56,0
M20	22,0	72,0
M22	24,0	80,0
M24	26,0	85,0
M27	30,0	98,0
M30	33,0	105,0
M33	36,0	112,0
M36	39,0	125,0

Quadro 5 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440R  
Fonte: Adaptado DIN 440 (DEUSTCHES..., 2001).

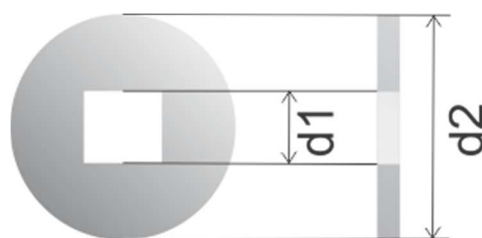


Figura 9 - Arruela definida segundo DIN 440V

Tipos de Arruelas	d1 (mm)	d2 (mm)
M10	11,0	34,0
M12	13,5	44,0
M16	17,5	56,0
M20	22,0	72,0
M22	24,0	80,0

Quadro 6 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440V  
Fonte: Adaptado DIN 440 (DEUSTCHES..., 2001).

Por fim, na norma DIN 436 (DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING, 1990), estão especificadas as dimensões das arruelas quadradas, ilustrada na Figura 10, os valores das dimensões estão indicados no Quadro 7.

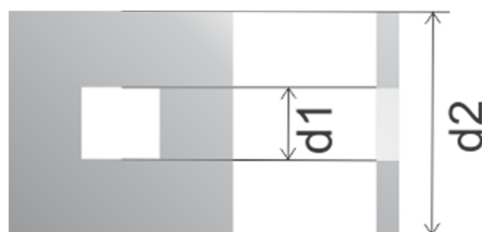


Figura 10 - Arruelas definidas segundo DIN 436

Tipos de Arruelas	d1 (mm)	d2 (mm)
M10	11,0	30,0
M12	13,5	40,0
M16	17,5	50,0
M20	22,0	60,0
M22	24,0	70,0
M24	26,0	80,0
M27	30,0	90,0
M30	33,0	95,0

Quadro 7 - Dimensões da norma DIN 436

Fonte: Adaptado DIN 436 (DEUSTCHES..., 1990).

### 3.3 PROPRIEDADES DA MADEIRA

#### 3.3.1 Classes das madeiras

Segundo a revisão da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011), a estrutura anatômica de cada elemento de madeira condiciona as suas propriedades, distinguindo-se os valores de compressão e tração, assim como os valores relacionados à direção normal às fibras e à direção paralela às fibras. Devido estudos realizados no Brasil, foi possível agrupar as madeiras em classes, que

possuem basicamente as mesmas características, especificadas nesta revisão da norma, as quais serão utilizadas no software desenvolvido.

A revisão da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), divide as madeiras em classes de resistências, com o objetivo de padronizar as suas propriedades e auxiliar na escolha do material para os projetos estruturais. Essa divisão é feita em dois grupos, as classes de resistências da Coníferas, indicada na Tabela 1, e as classes de resistências das Folhosas, indicada na Tabela 2, onde em cada tabela tem-se indicado as resistências características à compressão e ao cisalhamento, o módulo de elasticidade a compressão paralela as fibras da madeira e a densidade aparente.

**Tabela 1 - Classe de resistência das Coníferas**

<b>Coníferas (valores na condição padrão de referência U = 12%)</b>				
<b>Classes</b>	<b><math>f_{c0k}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{v0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>\rho_{aparente}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
C20	20	4	3500	500
C25	25	5	8500	550
C30	30	6	14500	600

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

**Tabela 2 - Classe de resistência das Folhosas**

<b>Folhosas (valores na condição padrão de referência U = 12%)</b>				
<b>Classes</b>	<b><math>f_{c0k}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{v0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>\rho_{aparente}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
D20	20	4	9500	650
D30	30	5	14500	800
D40	40	6	19500	950
D50	50	7	22000	970
D60	60	8	24500	1000

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

Para se realizar um projeto de estruturas de madeira, faz-se necessário avaliar a umidade relativa do ambiente e a umidade de equilíbrio da madeira, pois sua variação afeta as propriedades de resistência e rigidez da madeira. As classes de umidade são indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Classe de umidade

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

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

No caso de madeiras submersas, por exemplo, pilares que se encontram totalmente ou parcialmente abaixo do nível de água, a NBR 7190 não especifica uma classe de umidade, entretanto, considera a influência da umidade indicando um valor de  $k_{mod2}$  específico para o caso.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997), destaca que para se obter os valores de cálculo para o projeto, se faz necessário utilizar coeficientes de minoração e coeficientes de modificação agregados ao valor característico, para isso se utiliza a Equação (1).

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (1)$$

Onde:

$X_d$  = valor de projeto da resistência

$k_{mod}$  = coeficiente de modificação da resistência

$X_k$  = valor característico da madeira de resistência

$\gamma_w$  = coeficiente de minoração da resistência

São relacionados a seguir, equações para realizar o cálculo das propriedades da madeira através das classes definidas na norma.

Para se calcular valor característico da força de embutimento utiliza-se a Equação (2).

$$f_{e0,k} = f_{c0,k} \quad (2)$$



O valor característico da força de embutimento perpendicular às fibras é definido através da Equação (3).

$$f_{e90,k} = 0,25 \cdot f_{c0,k} \cdot \alpha_e \quad (3)$$

Onde:

$f_{c0,k}$  = valor característico de compressão paralelo às fibras;

$\alpha_e$  = coeficiente indicado no Quadro 8.

<b>Diâmetro (cm)</b>	<0,64	0,95	1,27	1,59	1,91	2,22	2,54	3,18	3,81	4,45	5,08	>7,62
<b>Coeficiente <math>\alpha_e</math></b>	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1

**Quadro 8 - Coeficiente  $\alpha_e$**

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

O valor característico da força de embutimento em relação a um ângulo  $\alpha$  qualquer, calcula-se através da Equação (4).

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e0,k} \cdot f_{e90,k}}{f_{e0,k} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{e90,k} \cdot \text{cos}^2 \alpha} \quad (4)$$

Onde:

$f_{e0,k}$  = valor característico de embutimento paralelo às fibras;

$f_{e90,k}$  = valor característico de embutimento perpendicular às fibras;

$\alpha$  = ângulo entre os elementos de madeira.

### 3.3.2 Coeficientes de minoração

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), o coeficiente de minoração para estados limites últimos varia conforme o tipo de solicitação aplicada. Se for decorrente das tensões de compressão o valor é  $\gamma_w = 1,4$ , para as tensões de tração e cisalhamento o valor será de  $\gamma_w = 1,8$ . Já para estados limites de serviço o coeficiente assume valor de  $\gamma_w = 1,0$ , não sendo alterado segundo a tensão aplicada.

### 3.3.3 Coeficientes de modificação

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), os coeficientes de modificação alteram os valores de cálculo em função da classe de carregamento da estrutura, da classe de umidade e a possibilidade da utilização de madeira de qualidade inferior. Pode-se compor o coeficiente de modificação através do produto indicado na Equação (5).

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \quad (5)$$

#### 3.3.3.1 Coeficiente de modificação $k_{mod1}$

O coeficiente  $k_{mod1}$  leva em consideração a classe de carregamento, a qual é definida pela duração prevista acumulada para a ação variável principal agindo na estrutura, e o tipo de madeira empregado. Esse coeficiente de modificação é dado pelo Quadro 9.

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada Madeira roliça Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	Permanente	Vida útil da construção	0,60	0,30
Longa duração	Longa duração	Mais de seis meses	0,70	0,45
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,80	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10	1,10

**Quadro 9 - Definição de classes de carregamento e valores de  $k_{mod1}$**   
**Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).**

Segundo Porteous e Kermani (2007), os exemplos para cada classe de carregamento descrita no Quadro 8, são indicados no Quadro 10 a seguir.

<b>Classes de carregamento</b>	<b>Exemplos</b>
Permanente	Peso próprio
Longa duração	Reservatórios de água Carga de armazenamento
Média duração	Sobrecarga geral de piso
Curta duração	Neve Sobrecarga de manutenção de cobertura
Instantânea	Vento Explosão Cargas de impacto

**Quadro 10 – Exemplos práticos das classes de carregamento**  
**Fonte: Adaptado Porteous e Kermani (2007).**

### 3.3.3.2 Coeficiente de modificação $k_{mod2}$

O coeficiente  $k_{mod2}$  leva em consideração a classe de umidade, definida na Tabela 3, e o tipo de madeira empregado. Esse coeficiente de modificação é dado pela Tabela 4.

**Tabela 4 - Valores do  $k_{mod2}$**

<b>Classes de umidade</b>	<b>Madeira serrada</b>	<b>Madeira recomposta</b>
	<b>Madeira roliça</b> <b>Madeira laminada colada</b> <b>Madeira compensada</b>	
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70	0,90

**Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).**

Para o caso de madeiras serradas submersas, admite-se o valor  $k_{mod2} = 0,65$ .

### 3.3.3.3 Coeficiente de modificação $k_{mod3}$

Por fim, o  $k_{mod3}$  leva em consideração a qualidade da madeira, sendo que para realizar essa avaliação deve-se classificar todas as peças estruturais por meio de método visual e/ou mecânico. As Tabelas 5 e 6, apresentam os valores do coeficiente  $k_{mod3}$  para as madeiras classificadas.

**Tabela 5 - Valores de  $k_{mod3}$  para Coníferas**

Classificação	Classes	Tipos de classificação	
		Apenas visual	Visual e mecânica
Densas (D)	SE-D	0,70	0,90
	S1-D	0,60	0,80
	S2-D	0,50	0,70
	S3-D	0,40	0,60
Classificação	Classes	Tipos de classificação	
		Apenas visual	Visual e mecânica
Não-Densas (ND)	SE-ND	0,60	0,60
	S1-ND	0,50	0,70
	S2-ND	0,40	0,60
	S3-ND	0,30	0,50

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

**Tabela 6 - Valores de  $k_{mod3}$  para Folhosas**

Classes	Tipos de classificação	
	Apenas visual	Visual e mecânica
SE	0,90	1,00
S1	0,85	0,95
S2	0,80	0,70
S3	0,75	0,85

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

Para madeiras não classificadas, os valores que devem ser utilizados são:

- Madeiras Folhosas,  $k_{mod3} = 0,70$ ;
- Madeiras Coníferas, não é permitido o seu uso sem classificação;

- Para as madeiras laminadas coladas, o  $k_{mod3}$  depende da curvatura da peça, e o seu valor é encontrado através da Equação (6). Quando a peça for reta, o  $k_{mod3} = 1,0$ .

$$k_{mod3} = 1 - 2000 \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^2 \quad (6)$$

Onde:

t é a espessura das lâminas;

r é o menor raio de curvatura que compõem a seção transversal resistente.

Para que os dados das Tabelas 5 e 6 sejam adotados corretamente, se faz necessário o conhecimento de seus parâmetros, que são os tipos de classificação, a sua classe e, no caso das coníferas, se elas são consideradas densas ou não.

Segundo Carreira (2003), a madeira pode ser classificada visualmente ou mecanicamente. A classificação visual é realizada por uma pessoa que analisa as quatro faces das peças e define o tipo, localização e tamanho dos defeitos que influenciam na resistência estrutural. Já a classificação mecânica toma como referência um estimador para aferir a resistência da madeira. Neste caso, a densidade e a rigidez à flexão são os mais utilizados.

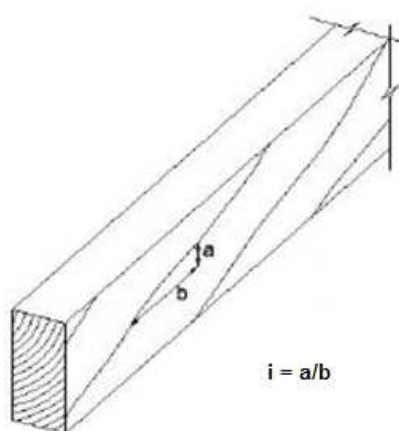
As classes que encontramos no  $k_{mod3}$ , são, em ordem decrescente de qualidade e resistência, SE (estrutural especial), S1 (estrutural nível 1), S2 (estrutural nível 2) e S3 (estrutural nível 3).

Os critérios para que uma peça de madeira seja admitida em determinada classe são descritos por *Southern Pine Inspection Bureau*, que é uma organização sem fins lucrativos nos Estados Unidos, que mantém as normas de qualidade para a produção *Southern Pine* (Pinus) e também na norma ASTM D245 (AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS, 1993), (CARREIRA, 2003).

Em sua dissertação de mestrado Carreira (2003), descreve os parâmetros a serem avaliados, bem como seus respectivos valores limites, para que a peça de madeira seja admitida em determinada classe, os quais são explicados a seguir.

- Inclinação das fibras

A inclinação existente deriva da serragem diagonal da peça, ou das fibras em espiral ou torcidas na árvore e, é quantificada através do ângulo de inclinação das fibras em relação à extremidade da peça, ilustrada na Figura 11. Esta inclinação é medida em todo comprimento da peça nas suas quatro faces, adotando o valor que apresentar a maior inclinação geral. Quando existem nós na estrutura analisada, os desvios das fibras localizados em torno dos nós deverão ser desconsiderados quando a peça tiver dimensões superiores a 38 mm de altura e 89 mm de largura.



**Figura 11 - Inclinação das fibras de uma peça de madeira**  
 Fonte: Southern Pine Inspection Bureau<sup>2</sup> (1994) apud Carreira (2003).

As máximas inclinações permitidas em cada classe seguem as razões de resistência dadas na *National Grading Rule* e são indicados no Quadro 11.

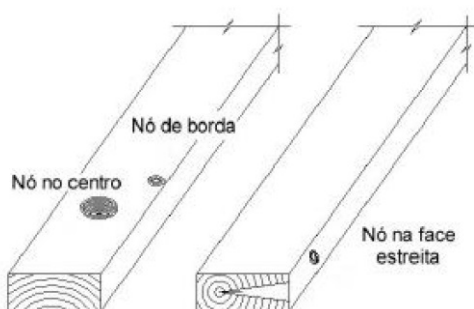
Classe	Inclinação das fibras
SE	1:12
S1	1:10
S2	1:8
S3	1:4

**Quadro 11 - Máxima inclinação das fibras em cada classe**  
 Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

<sup>2</sup>SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994). **Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber**. Pensacola, Fla.

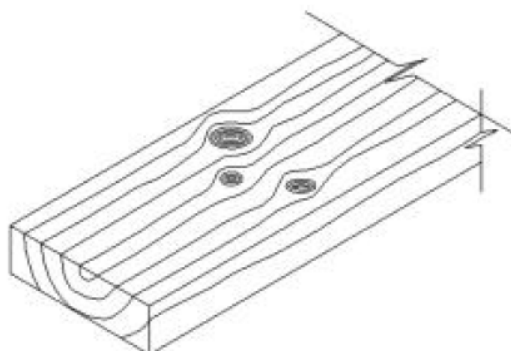
- Nós

Se faz necessário a medição dos nós que possuem a maior dimensão e posicionados na face estreita da peça, na borda e no centro da face larga, como mostra a Figura 12. Se a peça possui furos, os mesmos devem ser limitados da mesma forma que os nós.

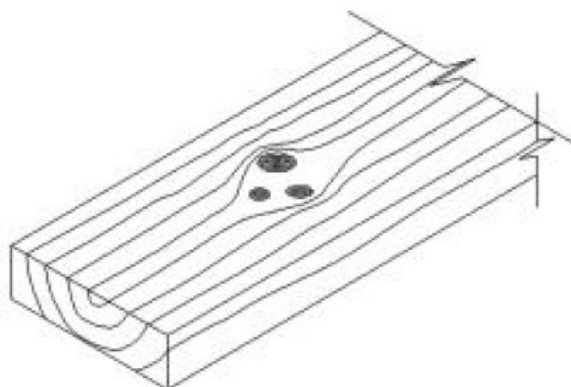


**Figura 12 - Posicionamento dos nós em uma peça de madeira**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**

O autor afirma que se ocorrerem dois ou mais nós próximos, os mesmos devem ser medidos e limitados observando as fibras ao seu entorno. Se as fibras contornam individualmente os nós, conforme a Figura 13, os nós são considerados separadamente, enquanto que se contornam todos os nós juntos, conforme a Figura 14, considera-se o conjunto como sendo somente um nó.

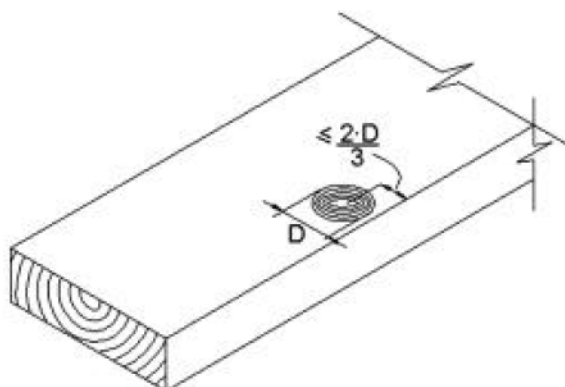


**Figura 13 - Nós individuais**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**



**Figura 14 - Conjunto de nós**  
 Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

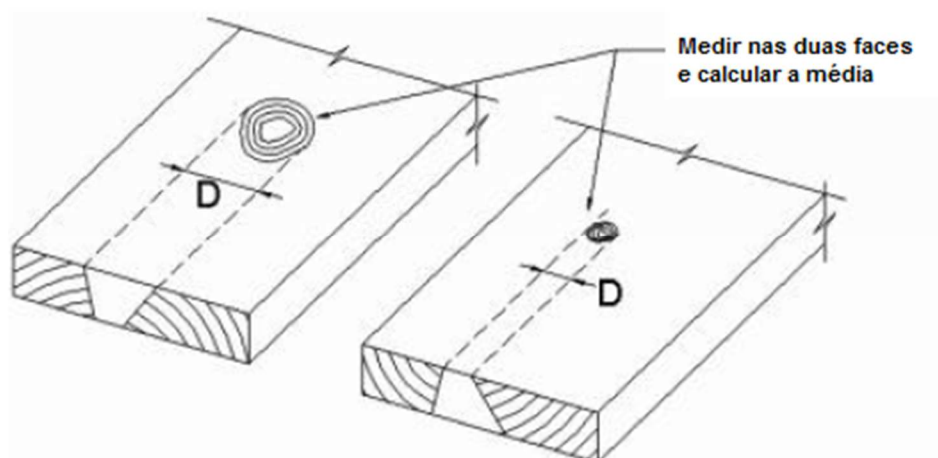
Para se diferenciar os nós em uma face larga de elementos tracionados ou fletidos, o nó é considerado de borda, se a distância do centro do mesmo for igual ou menor a  $\frac{2}{3}$  do diâmetro do nó, ilustrado na Figura 15.



**Figura 15 - Nó na borda de uma peça**  
 Fonte: American... (1993) apud Carreira (2003).

Para se medir os nós em tábuas, deve-se medir o nó em ambos os lados da face larga e calcular a média, conforme indica a Figura 16, adotando este valor como sendo a dimensão do nó. Os nós da face estreita somente são medidos se eventualmente apareçam também em pelo menos uma das faces largas.





**Figura 16 - Medição do diâmetro dos nós em tábuas**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**

Os limites para os defeitos nas faces de uma peça de seção transversal de 3,5 cm por 12,5 cm e comprimento de 2,60 m. Estes limites estabelecidos para os nós estão indicados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Limitações nos defeitos dos nós para peças de seção transversal de 3,5 cm x 12,5 cm e comprimento de 2,60 m.**

Classe	Nós			
	No centro da face	Na borda da face larga	Face estreita	
			D (cm)	L (cm)
SE	4,8	2,7	1,7	8,8
S1	6,3	3,6	2,1	10,4
S2	7,5	4,5	2,6	11,4
S3	9,4	6,2	2,7	12,5

**Fonte: Adaptado de Carreira (2003).**

Para os nós da face estreita de uma peça, Carreira (2003) indica os valores para seções genéricas segundo valores estabelecidos pela Southern Pine Inspection Bureau (1994, apud CARREIRA 2003), apontados no Quadro 12.

Classe	Proporção da área da seção transversal
SE	1/6
S1	1/4
S2	1/3
S3	1/2

**Quadro 12 - Máxima proporção permissível para os nós na face estreita**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**

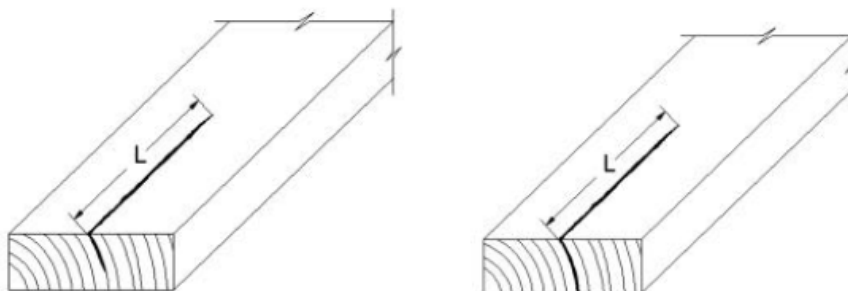
- Fendas e Rachas

Os limites apresentados no Quadro 13, se referem ao modo simplificado da *Southern Pine Inspection Bureau*, segundo Carreira (2003).

Defeitos	Tipo	SE	S1	S2	S3
Racha	Atravessa a peça em espessura	1 vez a largura	1 vez a largura	1,5 vez a largura da peça	1/6 do comprimento da peça
	Superficial	Até 60 cm	Até 60 cm	90 cm ou ¼ do comprimento, o que for maior	Sem limitações
Fenda	-	1 vez a largura	1 vez a largura	1,5 vez a largura da peça	1/6 do comprimento da peça
Fendilhado	Sem limites				

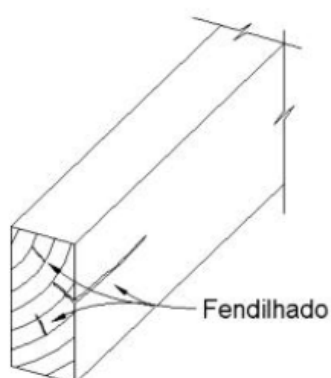
**Quadro 13 - Limitações para rachas e fendas**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**

Nesse método, o tamanho de uma racha anelar na extremidade é mensurado através de uma forma simplificada, e seu valor é igual à sua extensão medida paralelamente em relação ao comprimento da peça, como indicado na Figura 17.

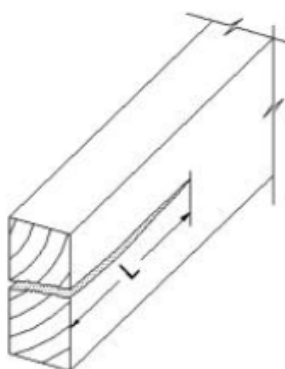


**Figura 17 - Formas de medir uma racha**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**

Já o fendilhamento superficial nas extremidades das peças não são considerados, conforme a Figura 18. Somente são mensurados e limitados quando as fendas cruzam a peça, assumindo o valor medido paralelamente ao comprimento da peça, conforme indica a Figura 19.



**Figura 18 - Fenda superficial**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**



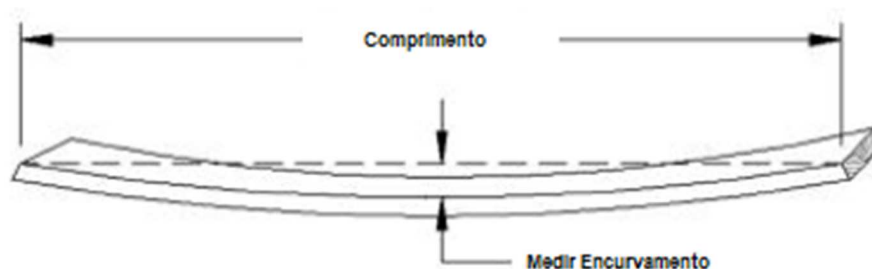
**Figura 19 - Fenda que atravessa a peça em espessura**  
**Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).**

- Empenamento

O empenamento ocorre devido ao desvio na forma geométrica inicial da peça, os quais são descritos abaixo, segundo as regras de classificação do *Southern Pine Inspection Bureau* (1994).

- Encurvamento

O encurvamento é a forma de empenamento em relação ao eixo de menor inércia e é mensurado no ponto onde ocorre o maior deslocamento da linha que une as extremidades, indicados na Figura 20.



**Figura 20 - Medição do encurvamento**

Fonte: *Southern Pine Inspection Bureau* (1994) apud Carreira (2003).

Os limites para o encurvamento são encontrados no Quadro 14.

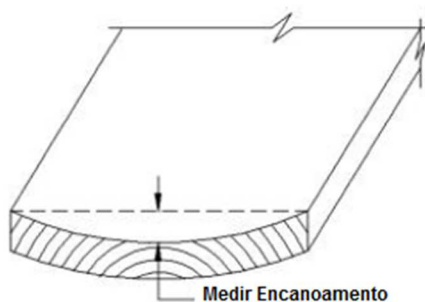
Comprimento (m)	Encurvamento permissível em cada classe (mm)			
	SE	S1	S2	S3
1,8	-	10	13	19
2,4	-	13	19	25
3,1	-	35	38	70
3,7	-	38	50	76
4,3	-	50	63	102
4,9	-	63	83	127
5,5	-	76	102	152
6,1	-	86	114	171

**Quadro 14 - Encurvamento permissível para peças com espessura de 38 mm**

Fonte: *Southern Pine Inspection Bureau* (1994) apud Carreira (2003).

- o Encanoamento

Caracteriza-se empenamento quando em uma peça de madeira, a seção transversal apresente um lado convexo e o outro côncavo, conforme ilustrado na Figura 21.



**Figura 21 - Medição do encanoamento**

Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

Os limites estipulados pela Southern Pine Inspection Bureau (1994), são indicados no Quadro 15.

Face larga (mm)	Encanoamento permissível em cada classe (mm)		
	S1	S2	S3
38 e 64	-	-	-
89	-	-	16
114 e 140	16	16	32
184	24	32	48
235	32	48	64
286	48	64	95

**Quadro 15 - Encanoamento máximo admitido em cada classe**

Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

- o Arqueamento

Ao contrário do encurvamento, o arqueamento é o empenamento em relação ao eixo de maior inércia. Sua quantificação é realizada da mesma forma que o encurvamento, como é ilustrado na Figura 22, e os seus limites estão descritos no Quadro 16.

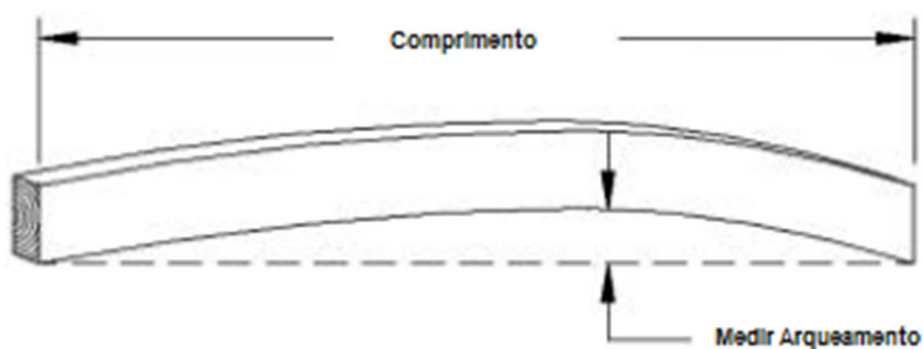


Figura 22 - Medição do arqueamento  
Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

Comprimento (m)	Arqueamento permissível em cada classe (mm)						
	Classe	38 x 64	38 x 89	38 x 140	38 x 184	38 x 235	38 x 286
1,8	S1	5	5	3	2	2	2
	S2	6	6	5	3	2	2
	S3	10	10	6	5	3	3
2,4	S1	6	6	6	5	3	2
	S2	10	10	8	6	5	3
	S3	13	13	13	10	6	5
3,1	S1	13	10	8	6	6	5
	S2	16	13	11	10	6	5
	S3	25	19	16	13	11	10
3,7	S1	14	13	11	10	10	3
	S2	19	16	16	13	11	4
	S3	29	25	22	21	19	6
4,3	S1	19	16	14	13	11	10
	S2	25	22	19	16	13	10
	S3	38	32	29	25	22	19
4,9	S1	24	19	17	14	13	11
	S2	32	25	22	19	16	13
	S3	48	38	35	29	25	22
5,5	S1	26	21	19	16	14	13
	S2	35	29	25	22	19	16
	S3	52	41	38	32	29	25
6,1	S1	29	26	24	19	17	14
	S2	38	35	32	25	22	19
	S3	57	52	48	38	33	29

Quadro 16 - Arqueamento permissível em cada classe  
Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

o Torcimento

Torcimento é uma combinação de empenamentos em forma espiralada, dos eixos de menor e maior inércia, ilustrados na Figura 23 e cujos parâmetros da Southern Pine Inspection Bureau são indicados no Quadro 17.

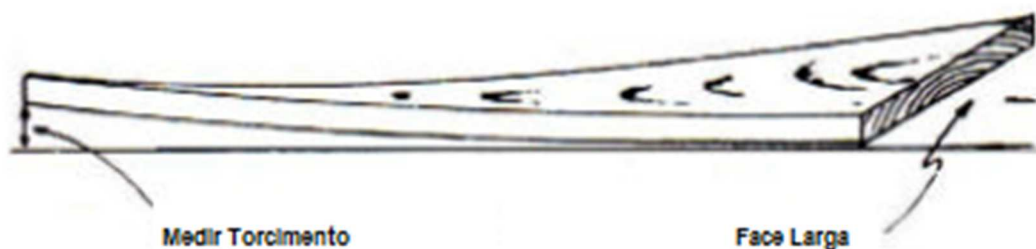


Figura 23 - Medição do torcimento

Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

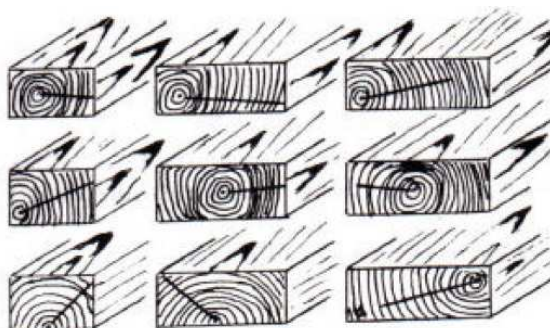
Comprimento (m)	Arqueamento permissível em cada classe (mm)						
	Classe	38 x 64	38 x 89	38 x 140	38 x 184	38 x 235	38 x 286
1,8	S1	6	6	10	14	17	21
	S2	10	10	13	19	22	29
	S3	13	13	19	29	35	41
2,4	S1	10	10	14	19	24	29
	S2	13	13	19	25	32	38
	S3	19	19	29	38	48	57
3,1	S1	11	11	18	24	30	35
	S2	16	16	22	32	38	48
	S3	22	22	35	48	60	70
3,7	S1	14	14	21	29	35	43
	S2	19	19	29	38	48	57
	S3	29	29	41	57	70	86
4,3	S1	16	16	24	33	41	49
	S2	22	22	32	44	54	67
	S3	32	32	48	67	89	98
4,9	S1	19	19	29	38	48	57
	S2	25	25	38	51	64	76
	S3	38	38	57	76	95	114
5,5	S1	21	21	32	43	54	64
	S2	29	29	41	57	70	86
	S3	41	41	64	86	108	127

Comprimento (m)	Arqueamento permitido em cada classe (mm)						
	Classe	38 x 64	38 x 89	38 x 140	38 x 184	38 x 235	38 x 286
6,1	S1	24	24	35	48	33	46
	S2	32	32	48	64	79	95
	S3	48	48	70	95	117	143

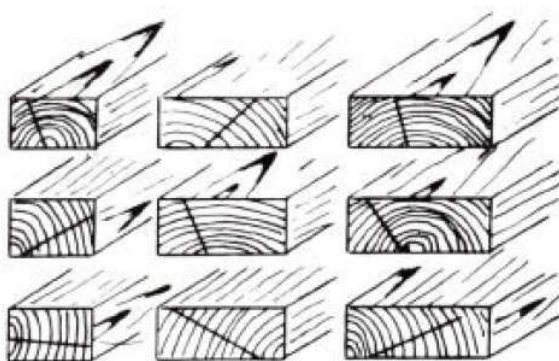
**Quadro 17 - Torcimento permitido em cada classe**

Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).

Por fim, Carreira (2003), mostra que a norma ASTM D245-93, além de classificar com relação aos defeitos da peça estrutural, também analisa as classes de densidades para a madeira em função da taxa de crescimento. Esta taxa é medida através da quantidade de anéis de crescimento existentes em 2,5 cm (1") de comprimento, medidos em uma linha radial representada na Figuras 24 e 25, e além disso, também é levado em conta a quantidade de madeira de inverno existente. O Quadro 17 extraído da norma D245 (AMERICAN..., 1993), indica as classes de densidade e seus parâmetros.



**Figura 24 - Linha radial representativa em peças contendo medula**  
Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).



**Figura 25 - Linha radial representativa em peças sem medula**  
Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994) apud Carreira (2003).



<b>Classe</b>	<b>Anéis / 2,5 cm</b>	<b>Quantidade de madeira de inverno</b>
Densa	$\geq 6$	$> 1/3$
	$\geq 4$	$> 1/2$
Média	$\geq 4$	-
Baixa	$< 4$	-

**Quadro 18 - Classes de densidade definidas na ASTM D245-93**  
**Fonte: Adaptado American... (1993).**

Segundo Carreira (2003), observou-se que na prática as classes de média e baixa densidade recebem a mesma nomenclatura de não-densa, a qual é expressada por ND, enquanto as densas são expressadas por D.

### 3.4 COMBINAÇÃO DE AÇÕES E/OU ESFORÇOS

Uma estrutura recebe influência de ações variáveis, permanentes e excepcionais, que não devem ser consideradas concomitantemente, pois sua probabilidade de ocorrência simultaneamente é baixa, realizando então, combinações das mesmas para adotar o caso mais desfavorável em relação a segurança da estrutura, segundo NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

#### 3.4.1 Estados Limites

Os estados limites definidos em cada projeto devem levar em conta os materiais de construção empregados e devem ser especificados pelas respectivas normas. Os estados limites existentes são os estados limites de últimos ou estados limites de serviço.

#### 3.4.1.1 Estados Limites de Serviço

Os estados limites de serviço ocorrem no período de vida da estrutura, sendo utilizados nos cálculos de deformações excessivas, que podem afetar a utilização da estrutura ou seu aspecto estético, nos cálculos das vibrações da estrutura, verificando vibrações excessivas ou desconfortáveis e, por fim, eventuais danos localizados na estrutura que comprometem o aspecto estético ou a sua durabilidade.

#### 3.4.1.2 Estados Limites Últimos

Ao atingir este estado limite, a estrutura já estará comprometida. Seus limites são considerados na ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais, na instabilidade dinâmica ou por deformações e também na perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida para uma estrutura de corpo rígido.

#### 3.4.2 Ações

As ações podem variar conforme o seu tempo de influência na estrutura, sendo classificadas como ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais.

##### 3.4.2.1 Ações Permanentes

As ações permanentes, são divididas em dois grupos, as ações permanentes diretas, que são os pesos próprios dos elementos construtivos, os pesos de equipamentos fixos e os empuxos devidos ao peso próprio do terreno e outras ações permanentes aplicadas, e as ações permanentes indiretas, onde são consideradas a protensão, os recalques de apoio e a retração dos materiais.

### 3.4.2.2 Ações Variáveis

As ações variáveis não permanecem por um longo período de tempo na estrutura, podendo ser consideradas como normais, quando a sua probabilidade de ocorrência é alta, e especiais quando a probabilidade de ocorrência não é significativa ou suficiente. As principais ações são as dos efeitos de ventos, as sobrecargas de utilização das construções, os efeitos de força de impacto, centrífugas e de frenação, as variações de temperatura e em geral as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas.

### 3.4.2.3 Ações Excepcionais

Por fim, as ações excepcionais, são as decorrentes dos eventuais choques de veículos na estrutura, de eventuais explosões, de incêndios, enchentes ou sismos excepcionais.

### 3.4.3 Combinações de Serviço

Para as combinações de serviço, a norma NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO..., 2003), considera todas as ações permanentes somados às parcelas das ações variáveis, como são indicados nas combinações seguintes.

#### 3.4.3.1 Combinações quase permanentes de serviço

É o tipo de combinação mais utilizado, a qual relaciona os aspectos estéticos da estrutura. A combinação é descrita na Equação (7). Esta combinação é utilizada normalmente na madeira para o cálculo das ações em coberturas onde não há presença de materiais frágeis ligados à estrutura.

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k} \quad (7)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$  = é o valor característico superior das ações permanentes;

$\psi_{2j}$  = coeficiente de redução quase permanente de serviço;

$F_{Qj,k}$  = é o valor característico das ações variáveis.

### 3.4.3.2 Combinações frequentes de serviço

As combinações frequentes de serviço são utilizadas nos cálculos de estruturas com equipamentos que podem sofrer influência de deslocamentos ou vibrações, ou então, estruturas de cobertura com baixa inclinação, onde possam ocorrer empoçamentos. Nesta combinação a ação permanente é considerada em sua totalidade enquanto as ações variáveis são admitidas com os coeficientes de redução, onde na ação variável principal adota-se o coeficiente de variação frequente e nas demais coeficiente de variação quase permanente, como indica a Equação (8).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k} \quad (8)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$  = é o valor característico das ações permanentes;

$\psi_{1j}$  = coeficiente de redução frequente de serviço;

$\psi_{2j}$  = coeficiente de redução quase permanente de serviço;

$F_{Qj,k}$  = é o valor característico das ações variáveis.

### 3.4.3.3 Combinações raras de serviço

As combinações raras de serviço são utilizadas quando o elemento estrutural calculado não pode sofrer danos permanentes ou fissuras, como é o caso de vigas que suportam cargas de paredes de alvenaria, pois as deformações de madeira da viga podem ocasionar fissuras irreversíveis nas paredes. A norma NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO..., 2003), utiliza as ações totais das cargas permanentes e da ação variável principal, acrescentando as demais ações variáveis com os respectivos coeficientes de redução frequente, como indica a Equação (9).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} \cdot F_{Qj,k} \quad (9)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$  = é o valor característico das ações permanentes;

$\psi_{1j}$  = coeficiente de redução frequente de serviço;

$F_{Qj,k}$  = é o valor característico das ações variáveis.

### 3.4.4 Combinações Últimas

As combinações últimas são utilizadas para a verificação do limite de ruptura da estrutura, podem ser calculadas de três formas, as combinações últimas normais, as especiais ou de construção e as excepcionais, segundo a norma NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO..., 2003).

#### 3.4.4.1 Combinações Últimas Normais

As combinações últimas normais são calculadas através da Equação (10).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_Q \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} \right] \quad (10)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$  = é o valor característico das ações permanentes;

$\gamma_g$  = coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$\gamma_Q$  = coeficiente de ponderação de ações variáveis;

$\psi_{0j}$  = coeficiente de combinação de utilização;

$F_{Q1,k}$  = é o valor característico da ação variável principal;

$F_{Qj,k}$  = é o valor característico das ações variáveis secundárias.

#### 3.4.4.2 Combinações Últimas Especiais ou de Construção

As combinações últimas especiais ou de construção, são por sua vez calculadas através da Equação (11).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_Q \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \right] \quad (11)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$  = é o valor característico das ações permanentes;

$\gamma_g$  = coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$\gamma_Q$  = coeficiente de ponderação de ações variáveis;

$\psi_{0j,ef}$  = coeficiente de combinação de utilização efetivo;

$F_{Q1,k}$  = é o valor característico da ação variável principal;

$F_{Qj,k}$  = é o valor característico das ações variáveis secundárias.

### 3.4.4.3 Combinações Últimas Excepcionais

Por fim as combinações últimas excepcionais, são calculadas através da Equação (12).

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_Q \cdot \sum_{j=1}^n \psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k} \quad (12)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$  = é o valor característico das ações permanentes;

$\gamma_g$  = coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$\gamma_Q$  = coeficiente de ponderação de ações variáveis;

$\psi_{0j,ef}$  = coeficiente de combinação de utilização efetivo;

$F_{Q,exc}$  = é o valor da ação transitória excepcional;

$F_{Qj,k}$  = é o valor característico das ações variáveis secundárias.

### 3.4.5 Coeficientes de combinação ou redução e de ponderação

#### 3.4.5.1 Coeficientes de ponderação

Os coeficientes de ponderação são específicos para as ações permanentes e para as ações variáveis e podem ser considerados separadamente ou conjuntamente. Segundo a norma NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO..., 2003), os coeficientes de ponderação para as ações permanentes ( $\gamma_g$ ), são indicados na Tabela 8, quando consideradas separadamente, e na Tabela 9, quando consideradas agrupadas. Os coeficientes das ações variáveis ( $\gamma_Q$ ), são indicados na Tabela 10, quando consideradas separadamente, e na Tabela 11, quando consideradas agrupadas.

Como a norma NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO..., 2003) não especifica os coeficientes para madeira, a norma NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) indica que sejam considerados os seguintes valores:  $\gamma_g = 1,2$  para madeiras industrializadas;  $\gamma_g = 1,3$  para as madeiras serradas ou roliças.

**Tabela 8 - Ações permanentes diretas consideradas separadamente**

Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Peso próprio de estruturas metálicas	1,25	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,30	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados <sup>1)</sup>	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,40	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos <sup>2)</sup>	1,50	1,0
Especial ou de construção	Peso próprio de estruturas metálicas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,20	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados <sup>1)</sup>	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,30	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos <sup>2)</sup>	1,40	1,0
Excepcional	Peso próprio de estruturas metálicas	1,10	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados <sup>1)</sup>	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco	1,20	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos <sup>2)</sup>	1,30	1,0

<sup>1)</sup>Por exemplo: paredes e fachadas pré-moldadas, gesso acantonado  
<sup>2)</sup>Por exemplo: paredes de alvenaria e seus revestimentos, contrapisos

**Fonte: Associação... (2003).**

**Tabela 9 - Ações permanentes diretas consideradas agrupadas**

Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Grandes pontes <sup>1)</sup>	1,30	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2)</sup>	1,35	1,0
	Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>	1,40	1,0
Especial ou de construção	Grandes pontes <sup>1)</sup>	1,20	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2)</sup>	1,25	1,0
	Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>	1,30	1,0



Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Excepcional	Grandes pontes <sup>1)</sup>	1,10	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral <sup>2)</sup>	1,15	1,0
	Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>	1,20	1,0

<sup>1)</sup>Grandes pontes são aquelas em que o peso próprio da estrutura supera 75% da totalidade das ações permanentes.

<sup>2)</sup>Edificações tipo 1 são aquelas onde as cargas acidentais superam 5 kN/m

<sup>3)</sup>Edificações tipo 2 são aquelas onde as cargas acidentais não superam 5 kN/m

Fonte: Associação... (2003).

**Tabela 10 - Ações variáveis consideradas separadamente**

Combinação	Tipo de ação	Coefficiente de ponderação
Normal	Ações truncadas <sup>1)</sup>	1,2
	Efeitos de temperatura	1,2
	Ação do vento	1,4
	Ações variáveis em geral	1,5
Especial ou de construção	Ações truncadas <sup>1)</sup>	1,1
	Efeitos de temperatura	1,0
	Ação do vento	1,2
	Ações variáveis em geral	1,3
Excepcional	Ações variáveis em geral	1,0

<sup>1)</sup> Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximo é truncada por dispositivo físico de modo que o valor dessa ação não pode superar o limite correspondente. O coeficiente da ponderação mostrado na tabela 4 se aplica a esse valor limite.

Fonte: Associação... (2003).

**Tabela 11 - Ações variáveis consideradas conjuntamente<sup>1)</sup>**

Combinação	Tipo de ação	Coefficiente de ponderação
Normal	Pontes e edificações tipo 1	1,5
	Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>	1,4
Especial ou de construção	Pontes e edificações tipo 1	1,3
	Edificação tipo 2 <sup>3)</sup>	1,2
Excepcional	Estruturas em geral	1,0

<sup>1)</sup> Quando as ações variáveis foram consideradas conjuntamente, o coeficiente de ponderação mostrado na tabela 11 se aplica a todas as ações, devendo-se considerar também conjuntamente as ações permanentes diretas. Nesse caso permite-se considerar separadamente as ações indiretas como recalque de apoio e retração dos materiais conforme tabela 9 e o efeito de temperatura conforme tabela 10.

Fonte: Associação... (2003).

### 3.4.5.2 Coeficientes de combinação e redução

Os coeficientes apresentados na Tabela 12, são utilizados nas combinações como fatores de combinação e de redução, tendo como papel reduzir os valores das ações variáveis, levando em consideração a frequência de ocorrência.

**Tabela 12 – Valores dos fatores de combinação ( $\psi_0$ ) e de redução ( $\psi_1$  e  $\psi_2$ ) para as ações variáveis**

Ações	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$ <sup>3)4)</sup>
Cargas acidentais			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>1)</sup>	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>2)</sup>	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura			
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos			
Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
Pontes rodoviárias	0,7	0,5	0,3
Pontes ferroviárias não especializadas	0,8	0,7	0,5
Pontes ferroviárias especializadas	1,0	1,0	0,6
Vigas de rolamentos de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5

<sup>1)</sup> Edificações residenciais, de acesso restrito.

<sup>2)</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.

<sup>3)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para  $\psi_2$  o valor zero.

<sup>4)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução  $\psi_2$  pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.

**Fonte: Associação... (2003).**

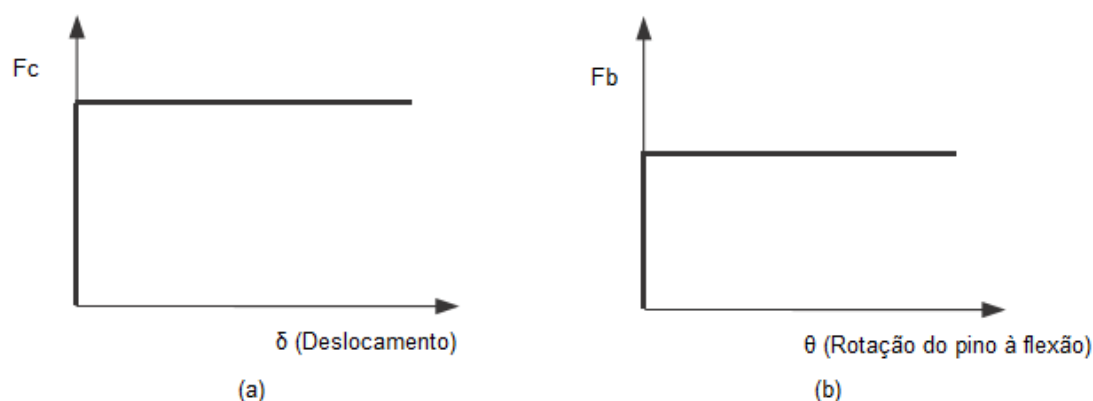
### 3.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS

As ligações em madeira com pregos (*nails*) e parafusos (*screws* e *bolts*) são geralmente considerados como ligações por pinos metálicos (*dowels*) em função dos modos de falha semelhantes. Nesse tipo de ligação, os pinos metálicos interagem com as peças de madeira a serem unidas a medida que a ligação é solicitada.

O trabalho de maior destaque na área foi produzido por Johansen<sup>3</sup> (1949, apud JOHANSSON 2004), que descreve a interação entre o pino metálico e as peças de madeira, considerando o comportamento mecânico totalmente plástico, tanto da madeira, quanto do aço, conforme ilustra a Figura 26.

Utilizando o equilíbrio de forças e momentos e assumindo as considerações anteriormente descritas, Johansen em 1949, formulou os modelos de falha básicos para a resistência de ligações por pinos metálicos (JOHANSSON, 2004).

A teoria ficou conhecida como teoria de Johansen ou EYM (*European Yield Model*) e se tornou a base de grande parte dos documentos normativos no mundo, incluindo-se o europeu (EUROCODE 5) e o brasileiro (NBR 7190).



**Figura 26 - (a) Comportamento mecânico da resistência ao embutimento da madeira e (b) comportamento mecânico de resistência à flexão de pino de aço**  
 Fonte: Adaptado Porteu e Kermani (2007).

Para desenvolvimento das equações, Johansen também adotou outras simplificações, a saber: todos os elementos de madeira possuem as mesmas características de resistência (resistência ao embutimento iguais); para ligações com

<sup>3</sup>JOHANSEN, K. W. **Theory of Timber Connections**. International Association of Bridge and Structural Engineering 9, p. 249-262, 1949.

apenas um plano de corte a espessura das duas peças de madeira são iguais ( $t_1 = t_2$ ); para ligações com dois planos de corte a espessura das peças de madeira devem ser simétricas e por fim; a resistência à flexão do pino metálico é admitida apenas ao seu limite elástico ( $M_{y,k} = \pi \cdot f_y \cdot d^3/32$ );

Em 1957 a teoria foi estendida segundo Meyer<sup>4</sup> (1957, apud JORISSEN 1998) para ligações com peças de madeira com diferentes espessuras e diferentes resistências, também admitindo a capacidade plástica à flexão do pino metálico ( $M_{y,k} = \pi \cdot d^3 \cdot f_y/6$ ).

No apêndice A, são encontradas as deduções das equações desenvolvidas pela teoria de Johansen.

A seguir são apresentados os modelos de falha e as respectivas equações da Teoria de Johansen (EYM).

Para se calcular o coeficiente de relação entre os valores de embutimento dos elementos de madeira, utiliza-se a Equação (13).

$$\beta = \frac{f_{e,k2}}{f_{e,k1}} \quad (13)$$

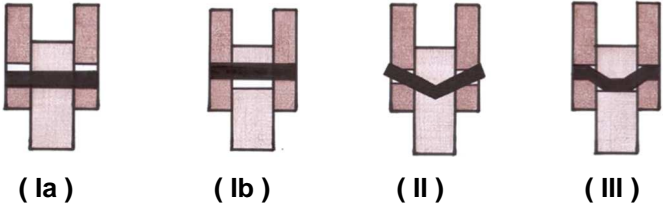
O modelo de cálculo desenvolvido por Johansen, possui equações para realizar o cálculo para uma seção de corte, indicados no Quadro 19, e duas seções de corte, conforme Quadro 20. Ao se calcular ligações com mais de duas seções de corte e com os mesmos elementos, a norma e Johansen recomendam que sejam utilizadas as equações para duas seções de corte e que seja multiplicado o valor de resistência mínimo encontrado para um plano de corte.

---

<sup>4</sup>MEYER, Adolf. **Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung**. Holz als Roh – und Werkstoff, S. 96-109, 1957.

Quadro 19 - Equações de Johansen e modos de falhas para uma seção de corte

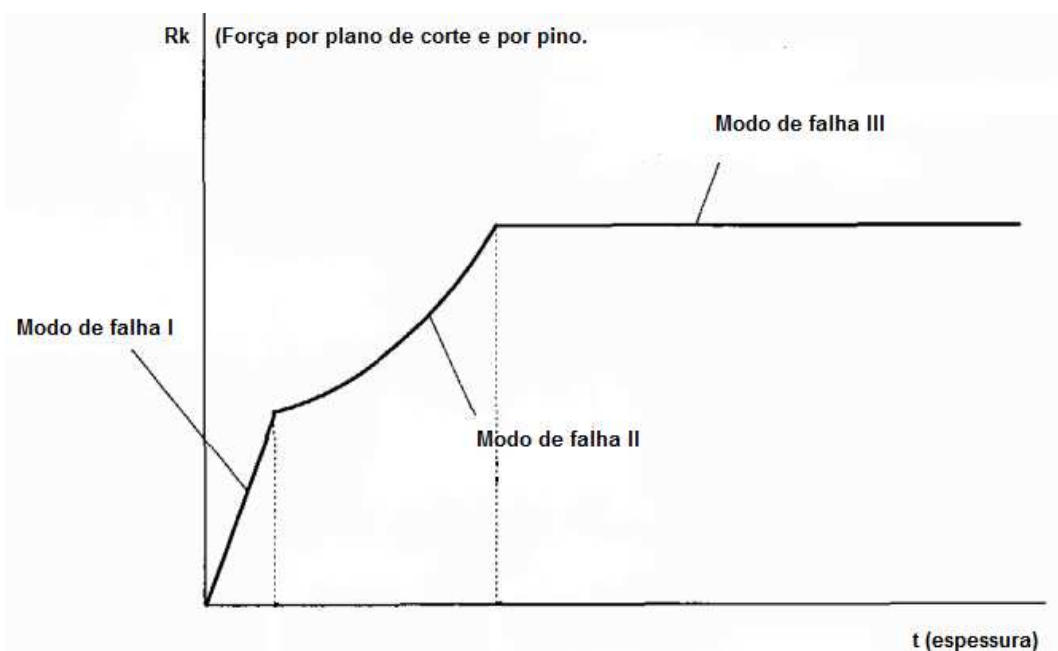
Equações de Johansen e modos de falhas para uma seção de corte		
Modos de falhas		
<p>Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.</p> <p><math>F_{v,rk}</math>, é o menor valor entre as equações dos modos de falha da Teoria de Johansen.</p>	$F_{v,k1} = f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d$	Modo (Ia) (14)
	$F_{v,k2} = f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	Modo (Ib) (15)
	$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]$	Modo (Ic) (16)
	$F_{v,k4} = \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$	Modo (IIa) (17)
	$F_{v,k5} = \frac{f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right]$	Modo (IIb) (18)
	$F_{v,k6} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e,k1} \cdot d}$	Modo (III) (19)

Equações de Johansen e modos de falhas para duas ou mais seções de corte		
Modos de falhas	 <p style="text-align: center;">( Ia )      ( Ib )      ( II )      ( III )</p>	
Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.	$F_{v,k1} = f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d$	Modo (Ia) (20)
	$F_{v,k2} = f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	Modo (Ib) (21)
	$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$	Modo (II) (22)
	$F_{v,k4} = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,k} f_{e,k1} d}$	Modo (III) (23)

**Quadro 20 - Equações de Johansen e modos de falhas para duas ou mais seções de corte**

Os modos de falha I, tanto para corte simples, quanto para corte duplo são regidos pela resistência ao embutimento do pino na madeira, já o modelo de falha II, considera além do fenômeno de embutimento, também o fenômeno de flexão do pino metálico, com a ocorrência de uma rótula plástica. Por fim, o modo de falha III considera a resistência ao embutimento do pino na madeira e a flexão do pino, com a ocorrência de duas rótulas plásticas simultâneas.

A Figura 27 é a representação gráfica das equações do modelo de Johansen, considerando o momento plástico ( $M_y = \pi * d^3 * f_y / 6$ ) e resistências de embutimento iguais em cada uma das peças de madeira ( $f_{e1} = f_{e2}$ ).



**Figura 27 - Gráfico dos modos de falha segundo norma do EC5**  
 Fonte: Adaptado Jorrisen (1998).

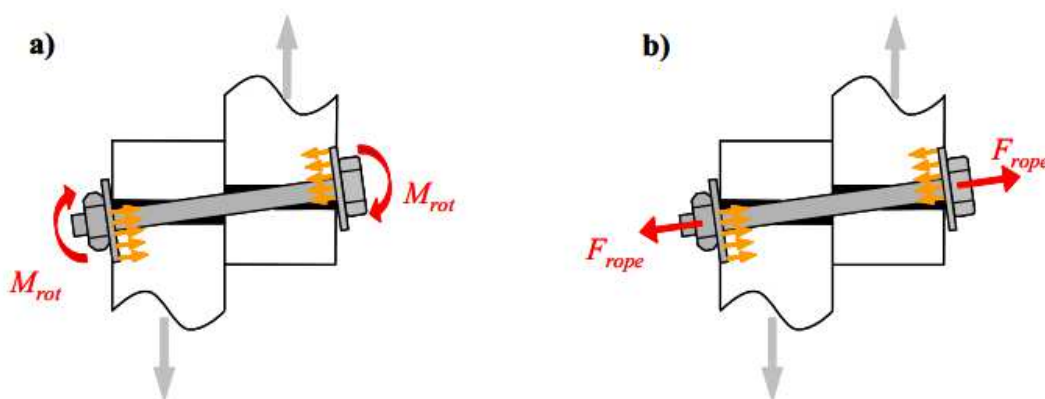
Outros pesquisadores estudaram o fenômeno incluindo Möller<sup>5</sup> (1951, apud Ramskill, 2002), Aune e Patton-Mallory (1986), e concluíram que os efeitos de atrito entre as peças de madeira e de força axial nos pinos metálicos devem ser considerados.

Com relação ao atrito entre as peças a norma europeia considera um acréscimo de 5% para o modo de falha II e 15% para o modo de falha III.

O efeito não linear de compressão provocado pela arruela devido a rotação do pino metálico e de tração do pino metálico, conhecido como “efeito de corda” (*rope effect*), proporciona um acréscimo na resistência da ligação, somente para os modos de falha II e III.

O problema não linear pode ser representado na Figura 28, onde é possível identificar as tensões normais que surgem no contato com a arruela com a madeira devido à rotação do parafuso e atração do parafuso.

<sup>5</sup> MÖLLER, T. **En ny Metod for Berakning av Spikforband**. Report No. 117, Chalmers University of Technology, Suécia, 1951.



**Figura 28 - Tensões normais da arruela com a madeira**  
**Fonte: Reichert (2009).**

O efeito ocorre quando o deslocamento entre as peças de madeira provoca rotação do pino metálico. As arruelas são comprimidas na superfície externa da ligação de madeira, aumentando a resistência da ligação. O incremento de resistência é função dos seguintes parâmetros: deslocamento relativo entre as peças de madeira, espessura dos elementos de madeira, diâmetro do pino metálico, força de arrancamento (para o caso de ligações pregadas) e resistência à compressão normal sob a arruela (para o caso de ligações parafusadas).

Em seu texto, a norma europeia recomenda, de forma conservadora, que o efeito de corda deve ser considerado somente após comprovação experimental, além de não permitir acréscimos maiores do que 25% da resistência calculada segundo a teoria de Johansen.

Outros efeitos como o de compressão da arruela na madeira, provocado pela rotação do pino são atualmente negligenciados pela norma europeia.

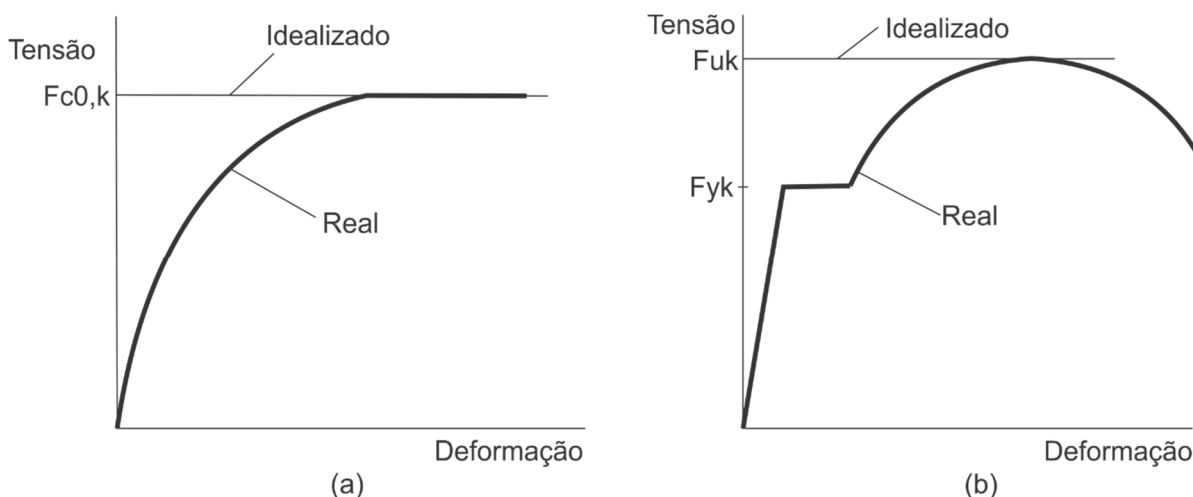
Segundo Reichert (2009), o efeito de compressão da arruela na madeira, provocado pela rotação do pino, facilita o desenvolvimento da rótula plástica no pino, promovendo uma alteração no modo de falha de frágil para mais dúctil, sendo necessário mais estudos sobre o tema.

Outra crítica em relação ao modelo europeu é o fato de considerar o comportamento do aço e da madeira totalmente plásticos, que apesar de simplificar o equilíbrio de forças e momentos, durante o desenvolvimento das equações, só ocorre em alguns casos de arranjo de ligações, após grandes deslocamentos. Dessa forma o real modelo de falha de uma ligação é uma combinação dos três modos de falha



propostos por Johansen, pois o aço e principalmente a madeira, não possuem na realidade comportamento perfeitamente plástico idealizado.

As Figuras 29a e 29b, mostram a comparação do comportamento real e do idealizado.



**Figura 29 – (a) Comparação entre o comportamento real e idealizado da madeira; (b) Comparação entre o comportamento real e idealizado do aço.**  
**Fonte: Adaptado Jorrisen (1998).**

Apesar de prever a capacidade de carga com razoável exatidão, o modelo de Johansen não permite associar um determinado deslocamento à respectiva força atuante na ligação, assim, a rigidez da ligação não pode ser determinada.

A atual versão do EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2008) indica a determinação da rigidez da ligação por meio de uma equação empírica que leva em consideração a densidade específica da madeira e o diâmetro do pino metálico.

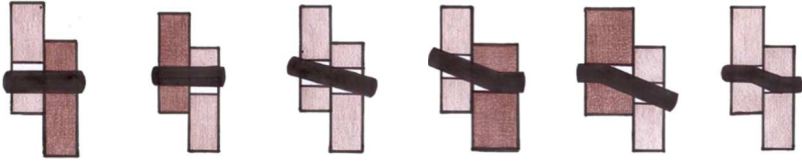
Considerando que a proposta do trabalho é a determinação da resistência da ligação parafusada por meio da formulação específica da norma europeia, o problema da rigidez de ligações não será mais discutido neste trabalho.

A seguir são apresentados os equacionamentos da norma europeia e brasileira.

### 3.6 MODELO DE CÁLCULO EUROCODE 5

O documento europeu EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2008) apresenta um modelo de cálculo embasado no modelo de Johansen, conhecido como EYM

(European Yield Model). O Quadro 21 apresenta as equações para o caso de corte simples e o Quadro 22 apresenta as equações para o caso de corte duplo. Valido para as ligações entre madeira-madeira e utilizando parafusos sextavados.

Equações da norma Eurocode 5 e modos de falhas para uma seção de corte		
Modos de falhas	 <p>(Ia) (Ib) (Ic) (IIa) (IIb) (III)</p>	
Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.  $F_{v,rk}$ , é o menor valor entre as equações.	$F_{v,k1} = f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d$	Modo (Ia) (24)
	$F_{v,k2} = f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	Modo (Ib) (25)
	$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	Modo (Ic) (26)
	$F_{v,k4} = 1,05 \cdot \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	Modo (IIa) (27)
	$F_{v,k5} = 1,05 \cdot \frac{f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	Modo (IIb) (28)
	$F_{v,k6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e,k1} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	Modo (III) (29)

Quadro 21 - Equações da norma Eurocode 5 e modos de falha para uma seção de corte

Quadro 22 - Equações da norma Eurocode 5 e modos de falhas para duas ou mais seções de corte

Equações da norma Eurocode 5 e modos de falhas para duas ou mais seções de corte		
Modos de falhas	<p style="text-align: center;">( Ia )      ( Ib )      ( II )      ( III )</p>	
Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.	$F_{v,k1} = f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d$	Modo (Ia) (30)
	$F_{v,k2} = f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	Modo (Ib) (31)
	$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	Modo (II) (32)
	$F_{v,k4} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e,k1} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}^2}{4}}$	Modo (III) (33)
$F_{v,Rk}$ , é o menor valor entre as equações.		

Nos modelos de falha caracterizados por flexão do pino e embutimento da madeira, modos de falha II e III, são considerados acréscimos devido a fenômenos não lineares.

No modelo II o efeito de atrito entre as peças é considerado como 5% a mais na capacidade prevista pela equação desenvolvida por Johansen. No modelo III considera-se 15% a mais na resistência devido ao atrito entre as peças de madeira.

O efeito não linear de confinamento provocado pelo giro das extremidades dos parafusos não é considerado.

Já o efeito de corda é considerado, tomando-se o menor valor dentre as três hipóteses:

- Resistência a tração do parafuso

O cálculo da resistência do parafuso à tração é realizado considerando a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO..., 2008), conforme a Equação (34).

$$F_{ax,Rk} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f_{uk} \quad (34)$$

- Força de embutimento da arruela na madeira

A forma de se calcular este valor varia conforme a escolha do tipo de arruela, onde para a DIN 440R calcula-se através da Equação (35), para a DIN 440V calcula-se através da Equação (36) e por fim para a DIN 436 calcula-se através da Equação (37).

$$F_{ax,Rk} = \left( \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot 3 \cdot f_{ek} \quad (35)$$

$$F_{ax,Rk} = \left( \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - d_1^2 \right) \cdot 3 \cdot f_{ek} \quad (36)$$

$$F_{ax,Rk} = (d_2^2 - d_1^2) \cdot 3 \cdot f_{ek} \quad (37)$$

- 25% do valor de Johansen

Por fim, o efeito de corda não deve ultrapassar o valor de 25% da equação de Johansen os modos de falha II e III.

A norma europeia recomenda que o efeito de corda seja considerado apenas nos casos onde haja comprovação experimental.

A resistência da ligação é considerada como o menor valor resultante das hipóteses dos Quadros 21 ou 22.

Para se calcular a resistência característica da ligação por seção de corte considerando a quantidade de parafusos da ligação, utiliza-se a Equação (38).

$$R_{v,k} = n^{\circ} \text{ parafusos} \cdot F_{v,rk} \quad (38)$$

### 3.6.1 Momento devido à flexão do pino

Johansen em suas equações adotou para realizar os cálculos o momento elástico do parafuso, indicado na Equação (39), estes mesmos cálculos e considerações, foram utilizadas na versão anterior da norma Eurocode 5, a qual foi formulada em 1993.

$$M_{y,k} = 0,8 \cdot f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6} \quad (39)$$

Através de estudos realizados por Blass & Kraemer (2001), parte significativa dos resultados indicam que o momento plástico não ocorre completamente. Fazendo com que assim as equações fossem alteradas considerando o momento plástico, calculado através da Equação (40).

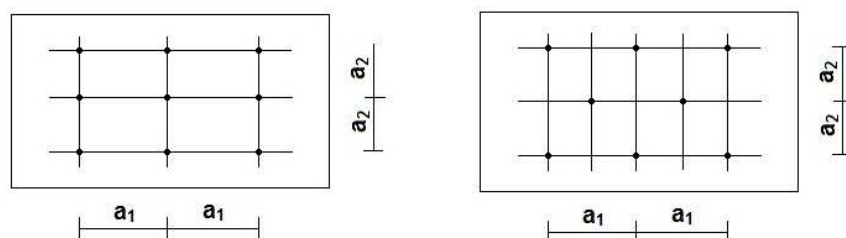
$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (40)$$

Sendo a resistência à tração do aço do parafuso ( $f_{u,k}$ ) em N/mm<sup>2</sup>.

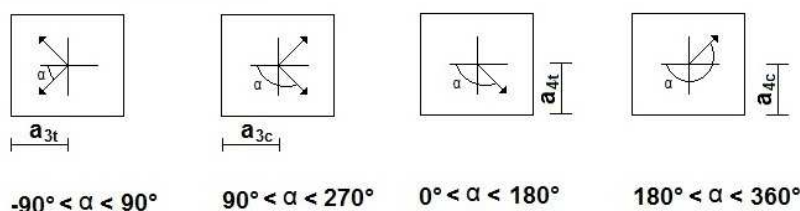
### 3.6.2 Espaçamento

Os espaços e distâncias para utilização dos parafusos são especificados pelo EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2008) conforme a Quadro 22, com seus símbolos definidos na Figura 30.

Espaço perpendicular e paralelo a fibra:



Distância de extremidade e borda:



onde  $\alpha$  é o ângulo entre a força e a direção das fibras

**Figura 30 – Definição do espaçamento e distância para ligações.**  
Fonte: Adaptado European... (2008).

$a_1$ (paralelo às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 +  \cos \alpha ) d$
$a_2$ (perpendicular às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4d$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	máx. (7d ; 80mm)
$a_{3,c}$	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$(1 + 6  \sin \alpha ) d$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6  \sin \alpha ) d$
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	máx. [(2 + 2 sin $\alpha$ ) d ; 3d]
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

**Quadro 23 - Espaçamento e distâncias mínimas para parafusos**  
Fonte: Adaptado European... (2008).

### 3.6.3 Número efetivo de parafusos

Número efetivo de parafusos para uma linha com “n” parafusos na direção paralela as fibras, pode ser calculado conforme Equação (41).

$$n_{ef} = \min. \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \end{array} \right. \quad (41)$$

onde:

$a_1$  = distância entre os parafusos

$d$  = diâmetro do parafuso

$n$  = número de parafusos

$n_{ef}$  = número efetivo de parafusos

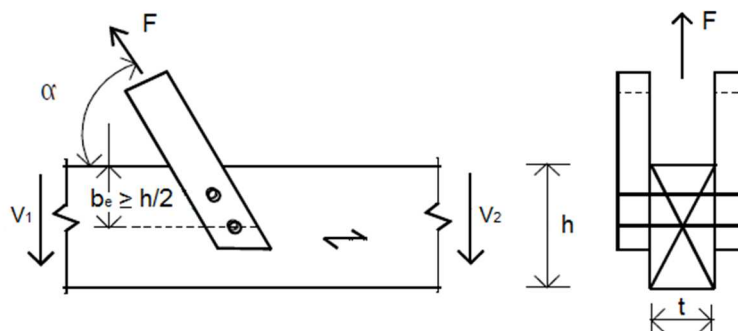
Se a linha com n parafusos estiver na direção perpendicular às fibras o número efetivo de parafusos será igual ao número de parafusos ( $n_{ef} = n$ ).

## 3.7 MODELO BRASILEIRO DE CÁLCULO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS

O critério de dimensionamento conforme a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) assume que o comportamento mecânico das ligações com pinos metálicos é equivalente para os pregos e parafusos, apresentando apenas um modelo de cálculo para os pinos metálicos. Ainda com relação ao documento normativo nacional, o mesmo desconsidera o uso de parafusos auto-atarraxante (*screw*) para elementos estruturais.

A revisão da norma NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) indica que para evitar o fendilhamento na madeira nas regiões das ligações, é necessário respeitar as especificações de espaçamentos e pré-furação para que nas regiões de ligação não haja a ruptura por tração normal às fibras, Figura 31. Esta verificação é realizada conforme Equação (42).

$$F \sin \alpha \leq f_{v,d} \cdot b_e \cdot t \quad (42)$$



**Figura 31 – Ligações com tração normal às fibras**  
**Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2011).**

Onde:

- $b_e$  = é a distância do eixo do pino mais afastado à borda do lado da solicitação, com  $b_e \geq h/2$ ;
- $t$  = é a espessura da peça principal;
- $f_{v,d}$  = é a resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras;
- $\alpha$  = é o ângulo de inclinação da força  $F$  em relação às fibras;
- $h$  = é a altura total da seção transversal da peça principal.

### 3.7.1 Pré-furação

A revisão da norma NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) considera rígidas as ligações com parafusos de porcas e arruelas (parafuso passante), onde a pré-furação deve ser feita com o diâmetro ( $d_0$ ) não maior que o diâmetro do parafuso ( $d$ ) com acréscimo de 5mm, caso o acréscimo for superior ao estipulado, a ligação será considerada deformável.

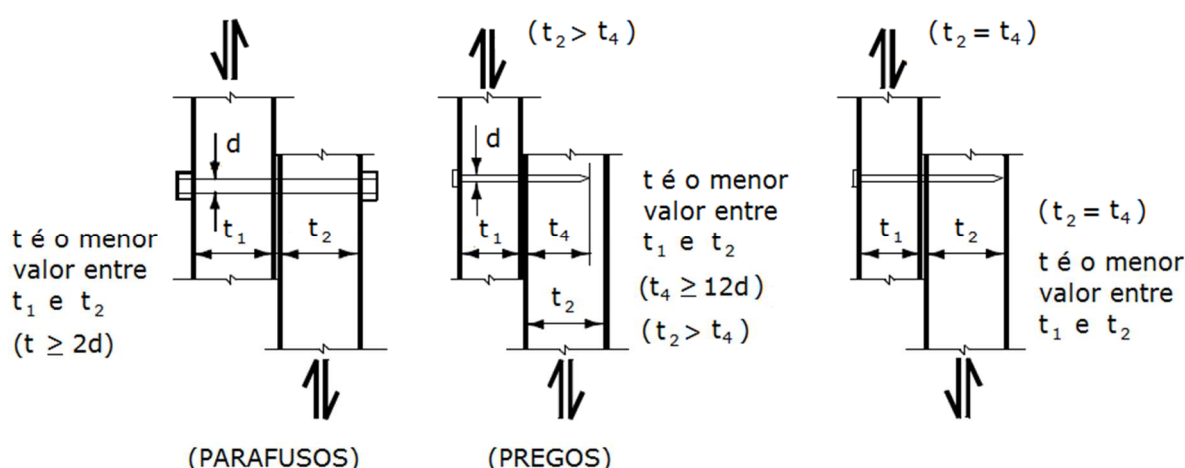


### 3.7.2 Resistência da ligação com pinos metálicos

Segundo revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), a resistência total da ligação com pinos metálicos é influenciada pelo número de pinos, onde até oito pinos em linha, dispostos paralelamente à força aplicada, a resistência total é a somatória da resistência individual de cada pino, acima de oito pinos devem ser considerados 2/3 da resistência individual para cada parafuso adicional. Através da Equação (43) temos o número efetivo de parafusos, onde “n” é o número de pinos utilizados na ligação.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3} \cdot (n - 8) \quad (43)$$

Para uma seção de corte é levado em consideração à resistência ao escoamento do pino ( $f_{y,d}$ ), à resistência ao embutimento ( $f_{e,d}$ ), o diâmetro do pino (d) e a espessura convencional t, sendo o valor de tal espessura o menor entre  $t_1$  e  $t_2$ , como exposto na Figura 32.



**Figura 32 – Pinos metálicos em corte simples**

Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011).

Em seções de corte duplo, a espessura convencional  $t$  é a menor espessura entre  $t_1$  e  $t_2/2$  em uma das seções e  $t_2/2$  e  $t_3$  na outra seção, mostrada na Figura 33.

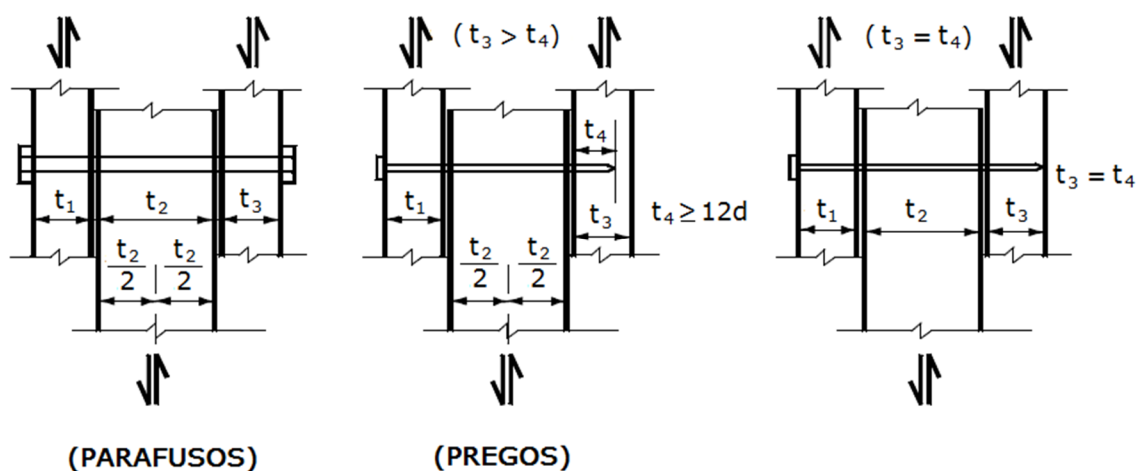


Figura 33 – Pinos metálicos em corte duplo  
 Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011).

Para a determinação da resistência da ligação ( $R_d$ ) é necessário verificar os parâmetros de esbeltez apresentados nas Equações (44) e (45):

$$\lambda = \frac{t}{d} \quad (44)$$

$$\lambda_{lim} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} \quad (45)$$

Onde:

- t é a espessura especificada nas Figuras 32 e 33;
- d é o diâmetro do pino metálico;
- $f_{y,k}$  é o valor da resistência de escoamento do pino
- $f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_s}$  é o valor da resistência de cálculo do escoamento do pino, com  $\gamma_s = 1,1$

Os dois casos apresentados na revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) são:

- Equação (46), ocorrência de embutimento na madeira quando  $\beta \leq \beta_{lim}$ .

$$R_d = 0,50 \cdot t \cdot d \cdot f_{e,d} \quad (46)$$

- Equação (47), ocorrência de flexão do pino quando  $\beta \geq \beta_{lim}$ .

$$R_d = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{y,d} \quad (47)$$

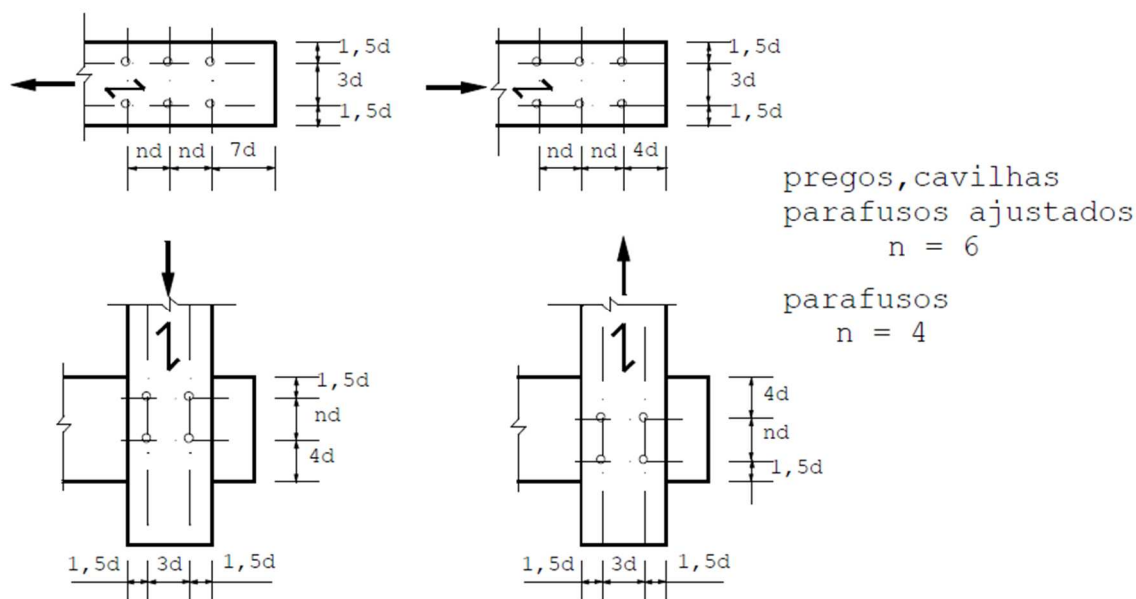
Estas equações foram deduzidas no Apêndice B a partir do modelo de Johansen, utilizando o momento elástico, definido na Equação (39), através da dedução é possível verificar que a equação da norma brasileira está simplificada e possui arredondamentos nos valores utilizados.

### 3.7.3 Espaçamento

Conforme especificado no projeto de revisão da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), para ligações com pinos metálicos:

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

Como descrito acima, os espaçamentos são ilustrados na Figura 34.



**Figura 34 – Espaçamento em ligações com pinos**  
 Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011).

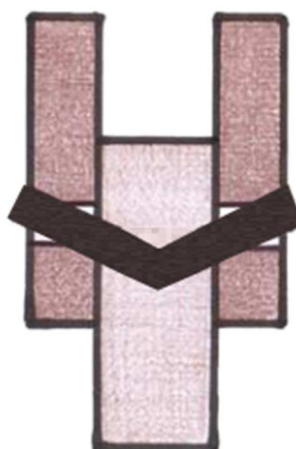
### 3.8 DISCUSSÕES SOBRE O MODELO BRASILEIRO

Conforme estudo de Leutner (2013), um dos modelos de cálculo para ligações com pinos metálicos mais utilizado no mundo ainda é o modelo de Johansen, o qual embasa a norma brasileira e a norma europeia.

Na revisão da norma brasileira NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), o modelo de Johansen é simplificado para apenas dois modos de falha, que são: embutimento da madeira e flexão do pino metálico, realidade que não ocorre na norma europeia, onde Meyer (1957 apud JORISSEN 1998), aprimorou o modelo de Johansen considerando dimensões e elementos distintos para todos os modos de falha.

No Apêndice B, são deduzidas as equações do modelo de Johansen, considerando os mesmos parâmetros utilizados na simplificação da norma brasileira. Com isso, é possível verificar que a norma brasileira deriva do modelo de Johansen, apesar de apresentar alguns coeficientes distintos que não possuem explicações teóricas, porém, estas equações são válidas apenas nas seguintes condições: ligações em corte simples; espessuras das peças de madeiras iguais ( $t_1 = t_2 = t$ ); peças de madeira da mesma classe, sob mesmas condições ( $f_{e1} = f_{e2} = f_e$ ).

Para se calcular ligações com dupla seção de corte, a revisão da norma NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) especifica que deve-se utilizar as mesmas equações deduzidas para uma seção de corte, multiplicando o valor encontrado pelo número de seções de corte, porém ao se verificar o cálculo de Johansen para duas seções de corte ou mais, as equações e os modos de falha são distintos, existe a ocorrência de rótula plástica no pino metálico, ilustrada na Figura 35, o que não ocorre ao se analisar apenas uma seção de corte, conforme ilustra a Figura 36, onde a norma brasileira considera apenas a ocorrência de embutimento nos dois elementos de madeira.



**Figura 35 - Modo de falha II do modelo de Johansen para duas seções de corte**

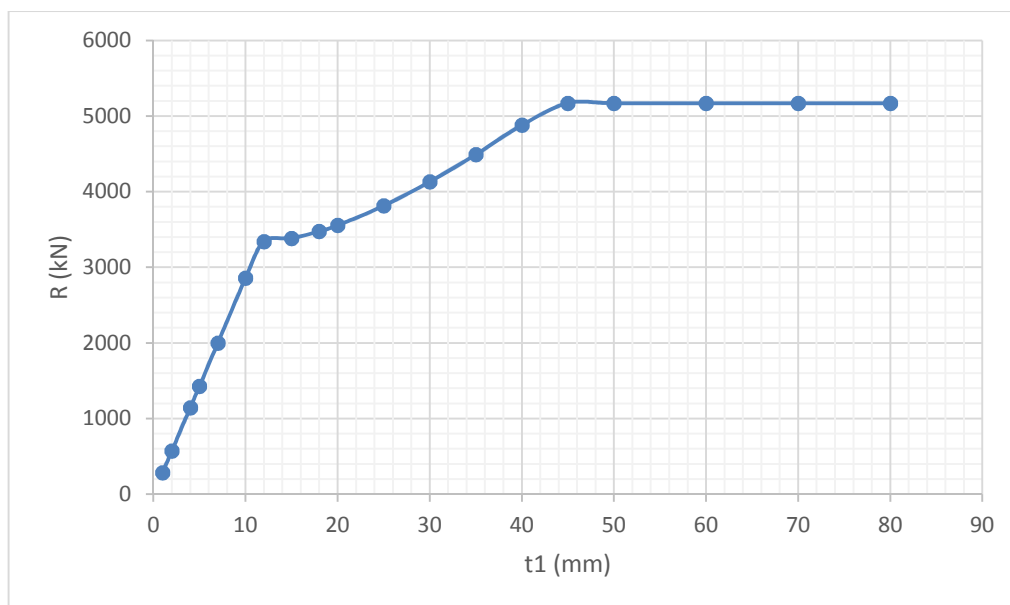


**Figura 36 - Modo de falha I do modelo de Johansen para uma seção de corte**

Simulando a curva para a ligação de corte duplo através do modelo de cálculo da norma europeia, onde os elementos de madeira possuem dimensões  $t_1 = t_2/2$ , utilizando dois parafusos M10 - ISO 4.6, e por fim adotando  $k_{mod1} = k_{mod2} = k_{mod3} = 1$ , obtém-se os valores encontrados na Tabela 13 e que dão origem ao Gráfico 1.

**Tabela 13 – Valores de resistência variando a espessura dos elementos**

t1	Esbeltez (t1/d)	R1 (N)	Modo de falha
1	0,1	286	I
2	0,2	571	I
4	0,4	1143	I
5	0,5	1428	I
7	0,7	2000	I
10	1,0	2857	I
12	1,2	3341	I
15	1,5	3385	II
18	1,8	3475	II
20	2,0	3555	II
25	2,5	3814	II
30	3,0	4132	II
35	3,5	4491	II
40	4,0	4880	II
45	4,5	5171	II
50	5,0	5171	III
60	6,0	5171	III
70	7,0	5171	III
80	8,0	5171	III

**Gráfico 1 - Valores de resistência com a variação da espessura da madeira**

Observando o Gráfico 1, é possível notar os três modos de falha distintos e os pontos de transição entre eles, chamados de esbeltez limites, definidos por  $\lambda = t/d$ .

O documento normativo brasileiro especifica uma esbeltez limite a partir da qual não há incremento na resistência da ligação, com o aumento da espessura das peças de madeira, esse fato ocorre pois o limite da ligação está condicionado à flexão do pino metálico, portanto ao se alterar a espessura dos elementos de madeira, o valor continuará o mesmo devido ao pino metálico.

Quando  $\lambda \leq \lambda_{lim}$  a norma indica uma equação simplificada para o caso de falha I, já quando  $\lambda \geq \lambda_{lim}$ , ocorre a chamada flexão do pino, caracterizada pelo modelo de falha III.

### 3.9 MODELO UTILIZADO NO SOFTWARE

Embasado nas discussões realizadas neste trabalho e nos estudos de Leutner (2013), que sugere, por meio de simulações numéricas, que o modelo de cálculo europeu é mais indicado para se realizar estimativas da capacidade das ligações em madeira. O *software* TCD foi desenvolvido utilizando o método de cálculo da norma europeia, adaptado às características das madeiras brasileiras e seus coeficientes de modificação e minoração das resistências.

A norma europeia considera nos cálculos os valores característicos das resistências da madeira e do aço, aplicando posteriormente os coeficientes de redução existentes, forma distinta da utilizada na norma brasileira, que aplica os coeficientes de modificação e o coeficiente de minoração para a madeira e para o aço, pois ambos coeficientes são diferentes antes de realizar o cálculo da ligação.

Por se aplicar os coeficientes de minoração para cada material, não existe na norma brasileira um coeficiente para a ligação completa em madeira, portanto, será adotado para o *software*  $\gamma_{m,ligação} = 1,4$ , realizando assim, o cálculo conforme a norma europeia, onde se aplica os coeficientes no valor de resistência encontrado. Este valor adotado para  $\gamma_{m,ligação}$  deve ser calibrado através de estudos na área, tanto numéricos, teóricos e experimentais para se ter um valor próximo a realidade das ligações.

Como indicado nas duas normas, o número efetivo de parafusos está relacionado a quantidade de parafusos utilizados na ligação, em que, na norma brasileira, essa penalização ocorre a partir do oitavo parafuso, reduzindo-se um terço da capacidade de cada parafuso adicional a essa quantidade. Para o cálculo da ligação no *software* será considerado o modelo da norma brasileira.

### 3.10 LIGUAGEM UTILIZADA NO SOFTWARE

Segundo Caelum (2014), a linguagem Java, está atualmente em crescimento no mercado, por não ser uma linguagem comum e sim uma plataforma completa. Diferentemente do que ocorre com outras linguagens, como por exemplo a linguagem C, que é interpretada diretamente do sistema operacional da máquina, o Java utiliza uma máquina virtual para ler os códigos gerados nesta linguagem.

As ferramentas para a linguagem Java podem ser divididas em três seguimentos: o JVM (*Java Virtual Machine*), que é apenas a máquina virtual, a qual não está disponível para download separadamente do pacote Java; o JRE (*Java Runtime Environment*), que é o ambiente de execução Java, onde contém o JVM e as bibliotecas da linguagem e com ele é possível executar qualquer aplicação desenvolvida em Java; por fim o JDK (*Java Development Kit*), neste pacote, encontram-se o JRE somado a ferramentas para desenvolvimento, como o compilador.

NetBeans, é um software com a função de auxiliar o usuário com um ambiente de desenvolvimento integrado, o mesmo é gratuito e de código aberto para desenvolvimento de software nas linguagens Java, C, C++, PHP entre outras. O mesmo pode ser executado em variadas plataformas como Windows, Linux, Solaris e MacOS. O NetBeans oferece ferramentas necessárias para desenvolver aplicativos para desktop, web e multiplataformas.

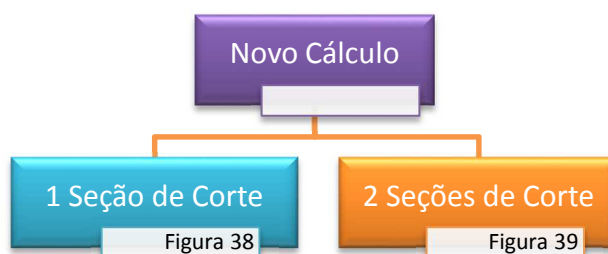
Para o desenvolvimento do software foram utilizados o pacote JDK 7 e o software NetBeans 8 para o desenvolvimento da interface e da linguagem computacional.



## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO

O modelo de cálculo do EUROCODE 5, possibilita fluxogramas diferentes, tendo que calcular valores distintos para cada tipo de ligação. Nos fluxogramas a seguir são mostrados como devem ser realizados os cálculos. A Figura 37, indica qual a primeira opção a ser escolhida, entre uma seção de corte ou duas ou mais seções.



**Figura 37 - Escolha inicial para começar o cálculo**

Ao se utilizar uma seção de corte, temos o seguinte fluxograma, ilustrado na Figura 38.

Para se calcular a força de embutimento de cálculo, se faz necessário utilizar o valor do  $\alpha_e$ . Este valor pode ser encontrado tabelado na norma NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), na qual sofre variação conforme o diâmetro do parafuso. Os valores encontrados na norma, não condizem exatamente aos tipos de parafusos utilizados no software, portanto, através de uma interpolação linear, foram calculados os valores de  $\alpha_e$ , para os diâmetros necessários, indicados no Quadro 24.

Tipo de parafuso	$\alpha_e$
M10	1,9078
M12	1,7391
M16	1,5166
M20	1,3868
M22	1,3338
M24	1,2963
M27	1,2500
M30	1,2125
M33	1,1805
M36	1,1567

**Quadro 24 - Valor de  $\alpha_e$**



**Figura 38 - Fluxograma para 1 seção de corte**

Ao se utilizar duas ou mais seções de corte, temos o seguinte fluxograma, ilustrado na Figura 39.



Figura 39 - Fluxograma para 2 seções de corte

## 4.2 CRIAÇÃO DA INTERFACE E COMPONENTES

A criação da interface foi realizada através do *software* NetBeans em basicamente em 3 fases, que são:

- 1º fase: criação das telas de trabalho, neste software foram as telas de ajuda, de informações sobre o programa e a tela principal, que contém as abas do programa. Sua função é criar o local para se comunicar com o usuário.
- 2º fase: foram adicionados nas telas criadas, os textos necessários, os botões, os campos de texto e as caixas de seleção. Estes itens foram nomeados de modo que sejam facilmente reconhecidos quando for realizar a inserção dos mesmos no código. As funções destes elementos são realizar a comunicação da linguagem com o usuário, obtendo informações necessárias para o programa ou informando dados ao usuário.
- 3º fase: cada elemento adicionado na segunda fase possui uma função, que foram configuradas nesta fase a fim de realizar sua função.

## 4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS ROTEIROS NA LINGUAGEM UTILIZADA

Com a interface do programa criada, a implementação dos roteiros de cálculo foi realizada completamente. Nesta etapa, foram escritos os roteiros de cálculo, utilizando variáveis criadas dentro do código do programa. Após isso, essas variáveis foram vinculadas com os elementos criados na interface, sendo assim, os valores informados pelo usuário serão utilizados no momento de calcular a ligação.

#### 4.4 REALIZAÇÃO DE TESTES PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

Após o *software* ter sido desenvolvido, se faz necessário conferir os resultados, verifica-se assim se os cálculos e as opções escolhidas estão corretos. Os valores do programa foram comparados com os exercícios resolvidos que seguem no Apêndice C deste trabalho.

#### 4.5 SIMULAÇÃO DE COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS

Através do *software* foram realizadas simulações numéricas variando a espessura dos elementos de madeira utilizando o método da norma europeia e comparando com os valores de resistência da norma brasileira.

## 5 RESULTADOS

Como resultado do estudo deste trabalho de conclusão de curso, obteve-se o *software* TCD (*Timber Connections Design*), o qual possibilita o cálculo de ligações entre peças de madeira com uso de pinos metálicos, empregando adaptação do método de cálculo da norma europeia EUROCODE 5, o mesmo foi adaptado para as madeiras existentes no Brasil e os respectivos valores de cálculos da ligação.

Por meio do *software*, foi possível realizar uma comparação entre a norma brasileira e a norma europeia, verificando assim a diferença entre as normas através de cálculos teóricos.

### 5.1 SOFTWARE TCD – TIMBER CONNECTIONS DESIGN

O TCD foi desenvolvido com o intuito de auxiliar os estudantes e profissionais de engenharia no cálculo deste tipo de ligação, possuindo assim o menu de ajuda, que contém informações das normas utilizadas, do método de cálculo, das propriedades das madeiras, dos parafusos e arruelas. O programa também possui dicas de como proceder e qual dado inserir nos campos ao posicionar o mouse sobre o elemento.

A tela inicial do programa é mostrada na Figura 40, onde pode-se encontrar fixas na parte superior a barra de menu e abaixo as abas, onde sequencialmente o usuário irá informar os dados para que se realize o cálculo da ligação. As abas disponíveis no início do programa serão as abas “Início” e “Seções de Corte”. Na aba “Início” encontram-se o logo, algumas informações sobre o programa e o apoio recebido para a realização do programa.

Nas abas encontram-se os diversos parâmetros necessários para se calcular a ligação, o primeiro item a ser preenchido é o número de seções de corte da ligação, portanto, ao acionar a aba “Seções de corte”, ativamos a aba, que é visualizada na Figura 41, na qual o usuário escolhe o número de seções através dos botões disponíveis, só é possível escolher um botão a cada cálculo. Pode-se visualizar que o número de seções de corte é limitado para uma ou duas seções, se a ligação possuir

mais que duas seções de corte, o método de cálculo utilizado é o mesmo de duas seções, portanto deve-se escolher duas seções de corte para realizar esse cálculo.



Figura 40 - Tela inicial do programa

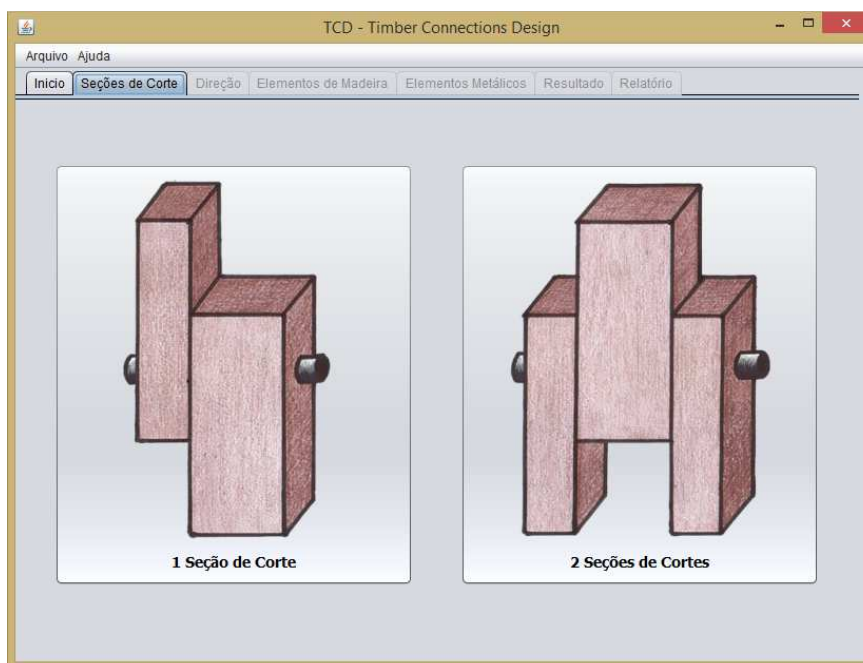


Figura 41 – Aba "Seções de Corte"

Após escolhido as seções de corte, a aba que estará disponível será a da direção da ligação, portanto, ao clicar na aba "Direção", tem-se a tela ilustrada na Figura 42, onde o usuário deve escolher entre paralela, inclinada ou perpendicular.

Da mesma forma que as seções de corte, só é possível escolher apenas uma opção nesta aba.

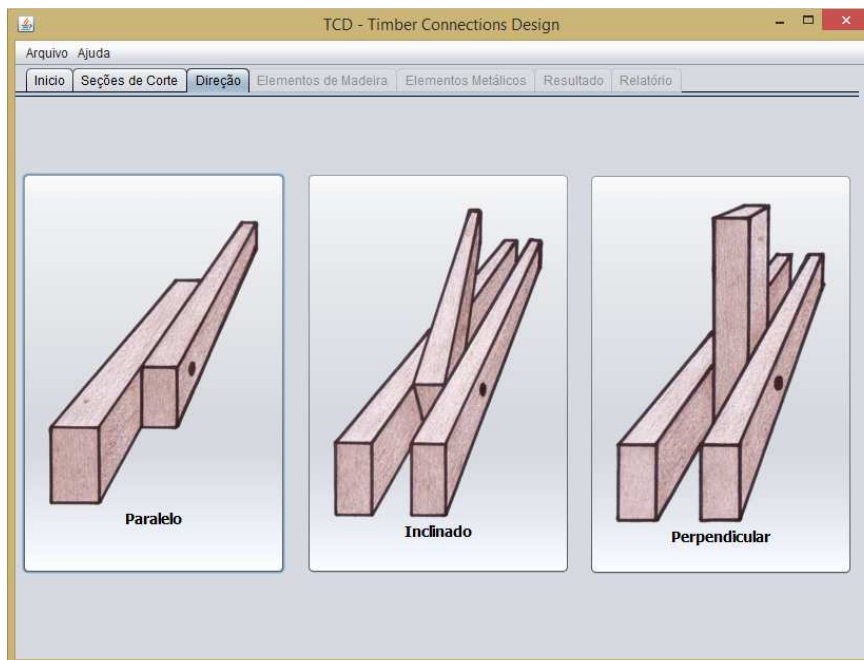


Figura 42 – Aba "Direção"

O próximo passo é a escolha das propriedades e dimensões dos elementos de madeira da ligação, indicado na Figura 43.

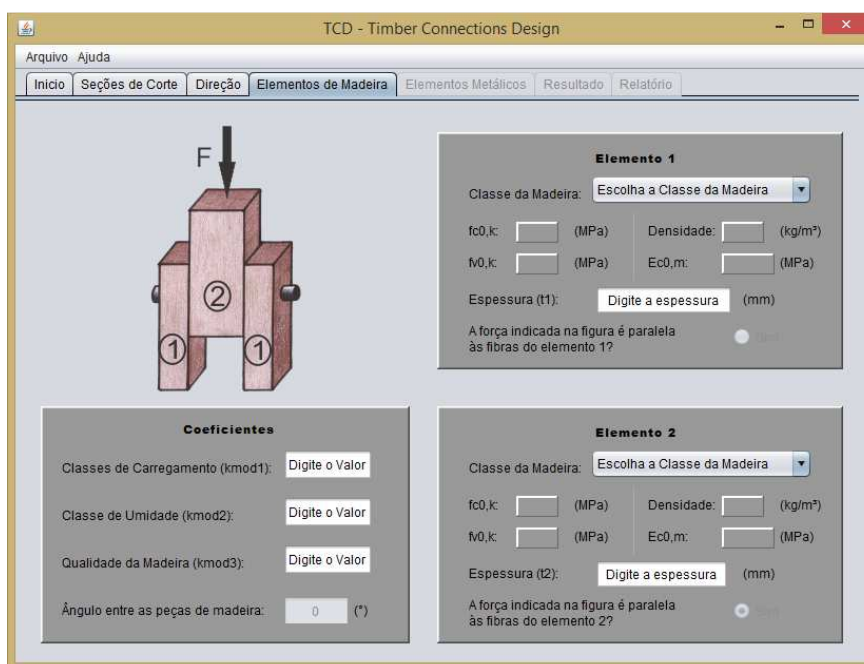


Figura 43 - Aba "Elementos de Madeira"



Conforme Figura 43, temos a aba “Elementos de Madeira” ativa, a qual pode ser dividida em quatro áreas. No canto superior esquerdo, tem-se a imagem da ligação a ser calculada, devido aos fatores escolhidos nas abas anteriores. Esta imagem também indica qual é o elemento de madeira 1 e 2, e no caso de possuir direção, o local do ângulo também é indicado.

No canto inferior esquerdo, tem-se o quadro dos coeficientes que serão aplicados para o cálculo da ligação. Para preencher os  $k_{mod}$ 's deve-se clicar em seus respectivos campos e informar o valor desejado. Os separadores de casas decimais para todos os valores informados devem vírgulas (Ex.: 0,7). O campo ângulo só estará ativo para preenchimento quando a opção escolhida na aba direção for a “Inclinada”, caso contrário o seu valor já será conhecido.

Nos cantos superior e inferior do lado direito, tem-se os quadros das propriedades dos elementos de madeira, onde no superior deve-se ser informado os dados do elemento 1 e no inferior os dados do elemento 2. Para se informar a classe da madeira utiliza-se a caixa de seleção “Escolha a Classe da Madeira”, após este passo, os valores característicos da madeira serão indicados abaixo. A espessura do elemento deverá ser informada no seu respectivo campo, este valor deve ser inserido em milímetros. O último item a ser preenchido neste quadro é com relação a qual elemento está paralelo a força indicada na figura, sendo possível escolher somente um dos elementos de madeira nesta situação. Como padrão o programa escolherá sempre o elemento 2 estando paralelo a força, resultando ao usuário alterar caso o elemento 1 estiver nesta situação. Este campo só estará ativo para a escolha, quando a opção “Inclinada” ou “Perpendicular” for selecionada previamente na aba de direção.

Por fim, as últimas características da ligação a serem informadas são relacionadas aos elementos metálicos, que são inseridos ao clicar na aba “Elementos Metálicos”, que estará disponível após o preenchimento total da aba “Elementos de Madeira”, a configuração desta aba é indicada na Figura 44.

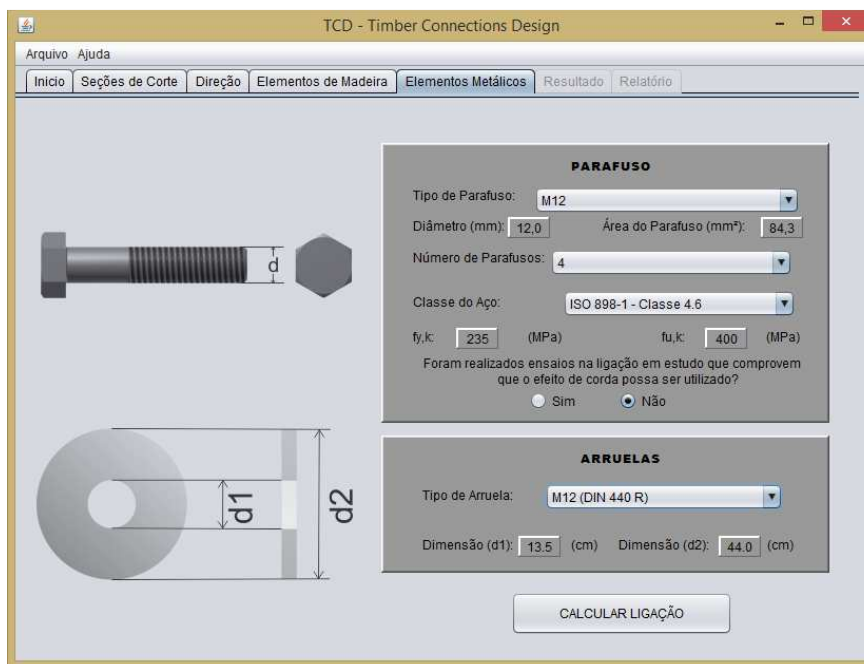


Figura 44 - Aba "Elementos Metálicos"

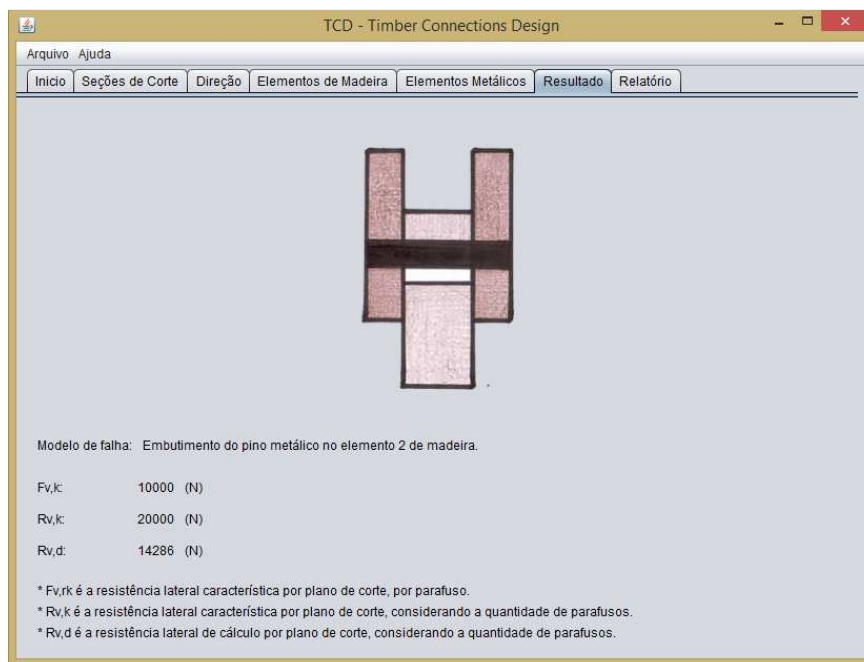
Esta aba está dividida basicamente em duas áreas, do lado esquerdo tem-se as imagens usadas como referência, onde na parte superior está a imagem do parafuso e abaixo a imagem da arruela que será exibida após a sua seleção. Do lado direito tem-se os quadros para informar as propriedades e característica dos materiais utilizados.

No quadro "Parafusos", deve-se escolher primeiramente o tipo de parafuso, pois a classe do aço pode variar conforme o tipo de parafuso, após escolhido o tipo de parafuso em sua caixa de seleção, deve-se escolher também a quantidade de parafusos em sua respectiva caixa de seleção. Após escolhido o tipo de parafuso, aparecerão as classes existentes para o respectivo tipo de parafuso na caixa de seleção das classes de aço. Encontra-se no método de cálculo europeu, a consideração ou não do efeito de corda, neste caso o usuário deverá escolher se foram realizados os ensaios que a norma recomenda para se considerar este valor no cálculo.

No quadro "Arruelas", temos a escolha do tipo de arruela que será utilizada, a qual depende também do tipo de parafuso escolhido e somente após esta escolha, poderá ser escolhido o tipo de arruela.

Por fim, tem-se o botão de cálculo da ligação, o qual após preenchido todos os valores, calculará a ligação resultando em um modo de falha e o valor de resistência da ligação. Ao clicar no botão para calcular o programa irá para a aba

“Resultado”, indicado na Figura 45, também ficará disponível a aba “Relatório”, ilustrada na Figura 46. Se o usuário, por ventura, esquecer de preencher algum campo necessário, o programa informará através de um aviso quais campos devem ser preenchidos para que a ligação seja calculada.



**Figura 45 - Aba "Resultado"**

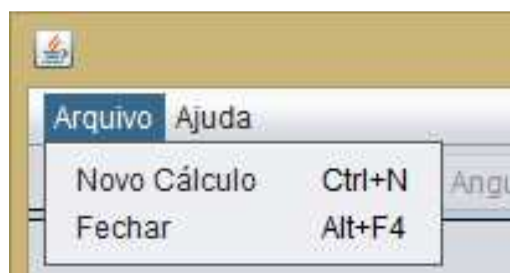
Na aba “Resultados” são apresentados os resultados calculados pelo programa de forma sucinta, nela encontram-se o modo de falha da ligação, a resistência lateral característica por plano de corte e por parafuso da ligação ( $F_{v,k}$ ), a resistência lateral característica por plano de corte considerando a quantidade de parafusos ( $R_{v,k}$ ) e por fim a resistência lateral de cálculo por plano de corte considerando a quantidade de parafusos ( $R_{v,d}$ ).

Após calculada a ligação, um relatório será gerado, o qual poderá ser visualizado na aba “Relatório”, nesta aba tem-se o relatório, a opção de imprimi-lo e a opção de realizar um novo cálculo, conforme indica a Figura 46.



**Figura 46 - Aba "Relatório"**

Com o relatório pronto, a ligação foi calculada corretamente, o usuário então poderá realizar quantos cálculos forem necessários clicando no botão “Novo Cálculo” disponível na aba “Relatório”, também através do menu “Arquivos” e então o botão “Novo Cálculo”, conforme a Figura 47, ou simplesmente utilizando as teclas de atalho “CTRL + N”, o qual iniciará o programa novamente. Também através deste menu, poderá encerrar o programa clicando em “Fechar”, ou utilizando as teclas de atalho “ALT + F4”.



**Figura 47 - Menu "Arquivo"**

No menu “Ajuda”, ilustrado na Figura 48, encontram-se os botões “Ajuda”, que pode ser acessado pela tecla “F1” a qualquer momento, onde encontram-se informações sobre os elementos de madeira e metálicos, método de cálculo e normas utilizadas, ilustrado na Figura 49 e o botão “Sobre” que traz informações sobre o programa, ilustrado na Figura 50.

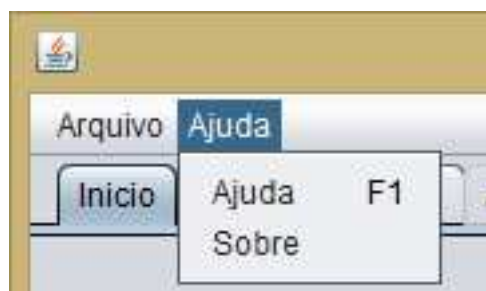


Figura 48 - Menu "Ajuda"

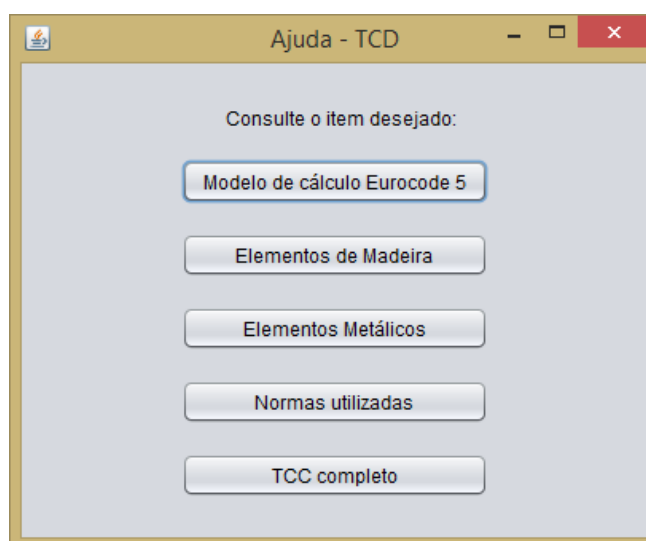


Figura 49 - Tela "Ajuda"



Figura 50 - Tela "Sobre"

## 5.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS

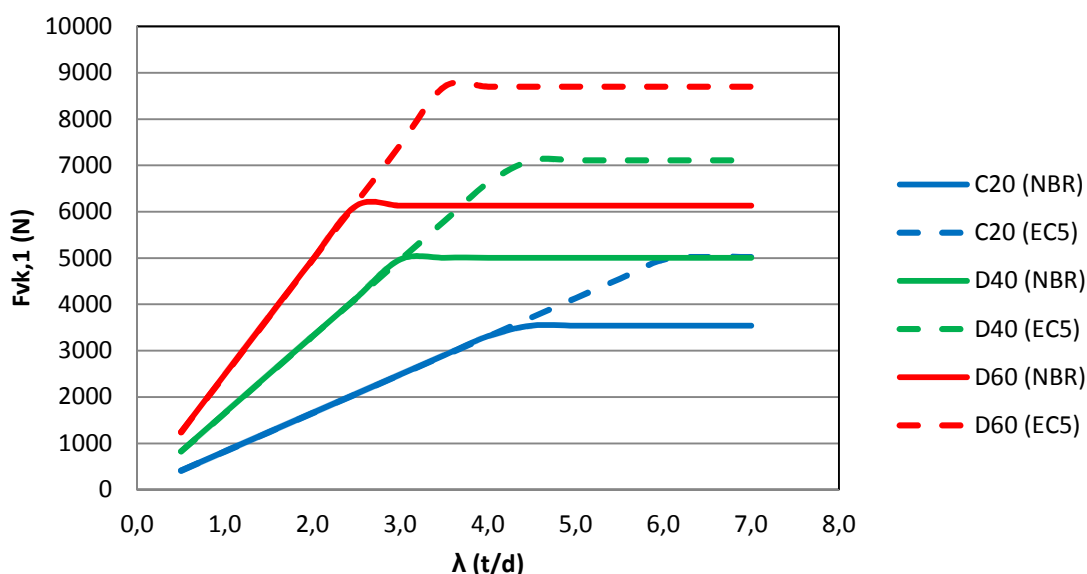
Conforme a dedução do Apêndice B, as equações da norma brasileira consideradas para as simulações seguintes são apresentadas nas equações sem arredondamentos (B.1 e B.2), que divergem das apresentadas na norma brasileira, porém possuem embasamento através da dedução.

### 5.2.1 Simulação para uma seção de corte

Considerando elementos de madeira iguais, parafusos M10 – ISO 4016 e classe de aço 4.6 – ISO 891-1, foram simuladas ligações em madeira com pinos metálicos, variando a espessura dos elementos de madeira, onde estão indicados na Tabela 14 os valores calculados e ilustrados no Gráfico 2. Os valores obtidos estão sendo calculados por parafuso, uma seção de corte e sem aplicação dos coeficientes.

**Tabela 14 – Resultado da simulação para uma seção de corte**

t (mm)	$\lambda$ (t/d)	C20		D40		D60	
		Fvk,1 (N) (NBR)	Fvk,1 (N) (EC5)	Fvk,1 (N) (NBR)	Fvk,1 (N) (EC5)	Fvk,1 (N) (NBR)	Fvk,1 (N) (EC5)
5	0,5	414	414	828	828	1243	1243
10	1,0	828	828	1657	1657	2485	2485
15	1,5	1243	1243	2485	2485	3728	3728
20	2,0	1657	1657	3314	3314	4970	4971
25	2,5	2071	2071	4142	4142	6132	6213
30	3,0	2485	2485	4970	4970	6132	7456
35	3,5	2899	2899	5007	5799	6132	8707
40	4,0	3314	3314	5007	6627	6132	8707
45	4,5	3540	3728	5007	7109	6132	8707
50	5,0	3540	4142	5007	7109	6132	8707
55	5,5	3540	4556	5007	7109	6132	8707
60	6,0	3540	4971	5007	7109	6132	8707
65	6,5	3540	5027	5007	7109	6132	8707
70	7,0	3540	5027	5007	7109	6132	8707



**Gráfico 2 - Comparação do valor de resistência para uma seção de corte da norma brasileira e europeia**

Através destes resultados é possível notar que tanto o modelo europeu quanto o modelo brasileiro, deduzidos no Apêndice B, conduzem a valores idênticos no trecho onde ocorre o modelo de falha de embutimento do pino na madeira.

Já no trecho onde o modo de falha é regido pela flexão do pino, há uma certa divergência, ocasionada pelo fato da norma brasileira considerar o limite elástico de flexão do pino e no documento europeu considera-se o limite plástico.

### 5.2.2 Simulação para duas seções de corte

Considerando elementos de madeira iguais, parafusos M10 – ISO 4016 e classe de aço 4.6 – ISO 891-1, foram simuladas ligações em madeira com pinos metálicos, variando a espessura dos elementos de madeira, onde estão indicados na Tabela 15 os valores calculados e ilustrados no Gráfico 3. Os valores obtidos estão sendo calculados por parafuso, considerando assim, a quantidade de seções de corte e não considerando os coeficientes.

Tabela 15 – Resultado da simulação para duas seções de corte

t (mm)	$\lambda$ (t/d)	C20		D40		D60	
		Fvk,1 (N) (NBR)	Fvk,1 (N) (EC5)	Fvk,1 (N) (NBR)	Fvk,1 (N) (EC5)	Fvk,1 (N) (NBR)	Fvk,1 (N) (EC5)
5	0,5	828	2000	1657	4000	2485	6000
10	1,0	1657	4000	3314	8000	4970	11263
15	1,5	2485	6000	4970	9325	7456	11792
20	2,0	3314	6556	6627	9821	9941	12832
25	2,5	4142	6756	8284	10560	12264	14189
30	3,0	4970	7058	9941	11465	12264	15748
35	3,5	5799	7438	10013	12483	12264	17414
40	4,0	6627	7876	10013	13581	12264	17414
45	4,5	7081	8360	10013	14219	12264	17414
50	5,0	7081	8880	10013	14219	12264	17414
55	5,5	7081	9428	10013	14219	12264	17414
60	6,0	7081	9996	10013	14219	12264	17414
65	6,5	7081	10054	10013	14219	12264	17414
70	7,0	7081	10054	10013	14219	12264	17414

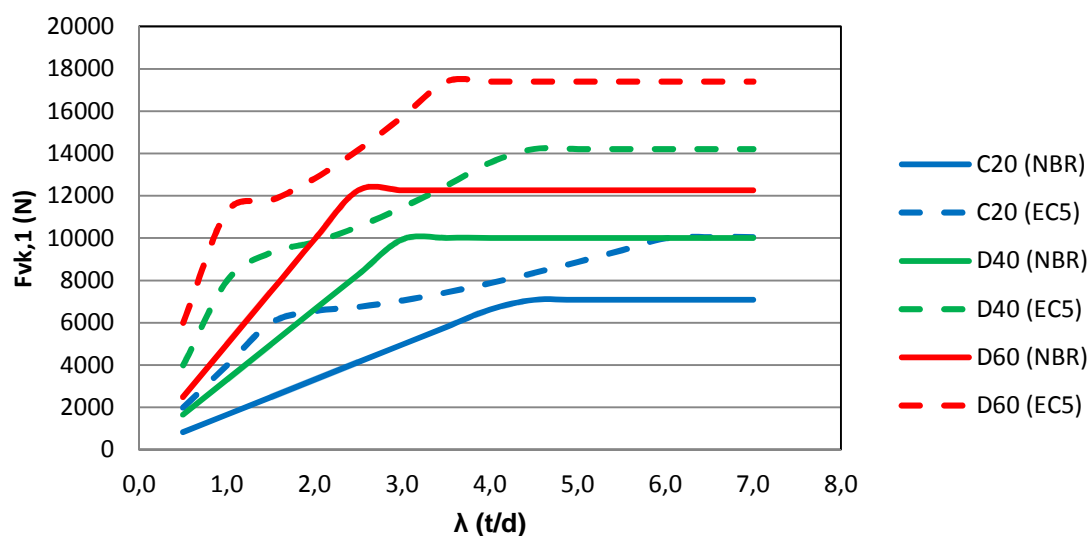


Gráfico 3 - Comparação do valor de resistência para duas seções de corte da norma brasileira e europeia

Através destes resultados é possível perceber que os valores da norma brasileira, deduzidas no Apêndice B, divergem dos da norma europeia para duas seções de corte, para as condições especificadas, onde na norma europeia os valores se aproximam da curva dos modos de falha de Johansen e os valores da norma brasileira mostram que o modo de falha II não é considerado no equacionamento.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos modelos de cálculo para ligações parafusadas em madeira, bem como o desenvolvimento do *software* TCD possibilitaram tecer as seguintes conclusões:

- O trabalho de maior destaque na área foi produzido por Johansen em 1949, que descreve a interação entre o pino metálico e as peças de madeira, considerando o comportamento totalmente plástico, tanto para a madeira quanto para o aço. Conhecido atualmente como EYM (*European Yield Model*) o modelo de Johansen, apresenta distintas equações para cada um dos modos de falha e atualmente constitui-se a base dos documentos normativos brasileiro (NBR 7190) e europeu (EC5).

- Apesar dos dois modelos de cálculo, brasileiro e europeu, advirem da mesma teoria básica, apresentam diferenças significantes, principalmente quando são analisadas ligações com duas seções de corte.

- Quando se trata de ligações com apenas uma seção de corte, madeiras com espessuras idênticas e de mesmas propriedades mecânicas, o modelo europeu e brasileiro coincidem. Os resultados na região de falha por embutimento na madeira (Modo de Falha I) são idênticos, nos dois casos e, na região caracterizada por flexão do pino, há uma diferença, pois o modelo brasileiro considera o momento fletor do parafuso no seu limite elástico e, a norma europeia utiliza o momento no seu limite plástico.

- Quando se trata de ligações com duas seções de corte, não há correspondência entre os dois modelos apresentados nos respectivos documentos normativos. A norma europeia considera três modos de falha distintos, entretanto, a norma brasileira apresenta apenas os mesmos dois modos de falha, deduzidos a partir do modelo com uma seção de corte.

- Os exemplos teóricos deixaram evidente a divergência entre os modelos para duas seções de corte, mesmo quando consideradas madeiras com mesmas propriedades mecânicas.

- As comprovações teóricas obtidas no trabalho devem ser validadas experimentalmente por meio de ensaios em corpos de prova de ligação.

- Os acréscimos de resistência devido ao atrito entre as peças de madeira e devido ao efeito de corda são considerados no modelo europeu.

- A efeito não linear de compressão da arruela na madeira, provocado pela rotação do pino são atualmente negligenciados pela norma europeia.

- Mais trabalhos devem ser realizados no país para verificar numericamente e experimentalmente a influência desses parâmetros na resistência da ligação, considerando as condições nacionais de uso.

- O programa educacional TCD (*Timber Connections Design*), desenvolvido no estudo, permite o cálculo de ligações parafusadas em madeira, utilizando o modelo da norma europeia adaptado a algumas condições da norma brasileira, de forma prática e amigável. As ajudas interativas permitem ao usuário entendimento dos fenômenos envolvidos e também que o usuário esclareça dúvidas a respeito das propriedades mecânicas dos materiais utilizados, em atendimento as normas brasileiras de aço (NBR 8800) e madeira (NBR 7190).

- O relatório final de dimensionamento, produzido pelo software ao final de cada simulação, pode ser impresso exibindo as principais informações sobre as propriedades dos materiais utilizados, dimensões, resistência da ligação, além, da visualização do modo de falha crítico da ligação.

- O software TCD é uma excelente ferramenta didática para o ensino de cálculo de ligações parafusadas e deve ser complementado para realizar também o dimensionamento de ligações pregadas em madeira, ligações com chapas metálicas e madeira, dentre outros.

- Mais estudos numéricos e experimentais devem ser realizados a fim de comprovar a validade das considerações adotadas no desenvolvimento do modelo de cálculo para o país.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D245-93 Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable fo visually Graded Lumber**. West Conshohoken, PA: 1993.

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

\_\_\_\_\_. **Revisão NBR 7190: Projeto estruturas de madeiras**. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 8800: Projeto estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

AUNE, P.; PATTON-MALLORY, M. **Lateral Load-bearing Capacity of Nailed Joints Based on the Yield Theory**. Forest Products Laboratory Research Paper 470, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 1986.

BLASS, H. J.; KRAEMER, V. **Effective bending capacity of dowel-type fasteners**. In International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission CIB-W18, (pp. 71–80), Stuttgart, 2001.

CAELUM. **Java e Orientações a Objetos**. Disponível em: <[www.caelum.com.br/apostilas](http://www.caelum.com.br/apostilas)>. Acesso em: 20 novembro 2015.

CALIL JUNIOR, Carlito; LAHR, Francisco A. R.; DIAS, Antonio Alves. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. Baueri – São Paulo: Manole Ltda, 2003.

CARREIRA, Marcelo R. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de pinus Sp**. 2003. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DIAS, Alan. **Ligações em Estruturas de Madeira**. Carpintaria: blog estruturas de madeira. Disponível em:

<[http://estruturasdemadeira.blogspot.com.br/2013\\_02\\_01\\_archive.html](http://estruturasdemadeira.blogspot.com.br/2013_02_01_archive.html)>. Acesso em: 20 março 2014.

DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING. **DIN 436 – Square washers for use in timber constructions**. Berlin, (1990).

\_\_\_\_\_. **DIN 440 – Washers – With square hole, especially for timber construction**. Berlin, (2001).

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures**. Brussels, (2008).

\_\_\_\_\_. **EN ISO 898-1 – Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs**. Brussels, (1999).

\_\_\_\_\_. **ISO 225 – Fasteners – Bolts, screws, studs and nuts – Symbols and descriptions of dimensions**. Brussels, (2010).

\_\_\_\_\_. **ISO 4016 – Hexagon head bolt – Product grade C**. Brussels, (2000).

GERDAU. **Pregos**. Disponível em: <[https://www.amigosdocampo.com.br/arquivos/downloads/131015162846\\_CatalogoPregosGerdau.pdf](https://www.amigosdocampo.com.br/arquivos/downloads/131015162846_CatalogoPregosGerdau.pdf)>. Acesso em: 01 julho 2014.

JOHNSSON, Helena. **Plug shear failure in nailed timber connections**. Dept. of Civil and Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, 2004.

JORISSEN, André. **Double shear timber connections with dowel type fasteners**. College voor Promoties aangewezen, Technische Universiteit Delft, Países Baixos, 1998.

LEUTNER, Aline M. **Resistência de ligações com parafuso passante com porca e arruela em madeira**. 2013. 127f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, Campo Mourão, 2013.

MACEDO, Alcebíades N. **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): Avaliação de método de ensaio**. 1996, 115 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

METÁLICA. **Parafusos: definição e tipos.** Disponível em: <<http://www.metlica.com.br/artigos-tecnicos/parafusos>>. Acesso em: 15 jun. 2014.

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

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro: LTC, 2003.

RAMSKILL, Thomas E. **Effect of Cracking on Lag Bolt Performance.** Dissertation to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2002.

REICHERT, Thomas. **Development Of 3d Lattice Models For Predicting Nonlinear Timber Joint Behaviour.** Thesis for degree of Doctor of Philosophy. School of Engineering and the Built Environment, 2009.

SZÜCS, Carlos A.; TEREZO, Rodrigo F.; VALLE, Ângela do; MORAES, Poliana D. de. **Estruturas de Madeira.** Florianópolis, 198p. 2008.

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

## APÊNDICE A – Dedução das Equações de Johansen

Timber Engineering STEP 1 (1995), assume que tanto a madeira quanto o pino de ligação são ideais, ou seja, a madeira é considerada um material perfeitamente plástico e o pino metálico perfeitamente rígido. Esta aproximação simplifica a análise e segundo o documento tem pouca influência no resultado final.

- Corte simples

Para as ligações com corte simples, temos os seguintes modelos de falha derivados dos modelos de Johansen.

- Modelo de falha Ia e Ib

Ocorrência somente de embutimento na madeira em apenas uma das peças. Na Figura A.1a o embutimento ocorre apenas no elemento 1 de madeira, com espessura  $t_1$ , e na Figura A.1b o embutimento ocorre no elemento 2, com espessura  $t_2$ .

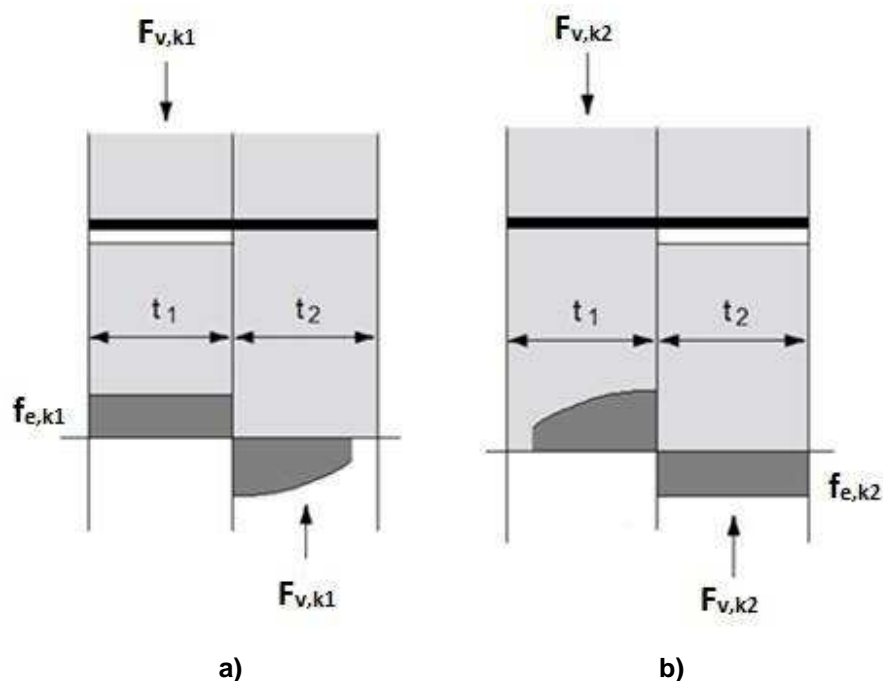


Figura A.151 – a) Modelo de falha Ia; b) Modelo de falha Ib

A força da ligação para o modelo de falha Ia é demonstrado na Equação (A.1) para falha no elemento 1 e na Equação (A.2) temos o modelo de falha Ib onde a falha ocorre no elemento 2.

$$F_{v,k1} = f_{c0,k1} \cdot t_1 \cdot d \quad (\text{A.1})$$

$$F_{v,k2} = \begin{cases} f_{c0,k2} \cdot t_2 \cdot d \\ \beta \cdot f_{c0,k1} \cdot t_2 \cdot d \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

o Modelo de falha Ic

Ocorrência de embutimento da madeira nos dois elementos de madeira simultaneamente e com giro no pino metálico, sem deformação do mesmo, como demonstrado na Figura A.2.

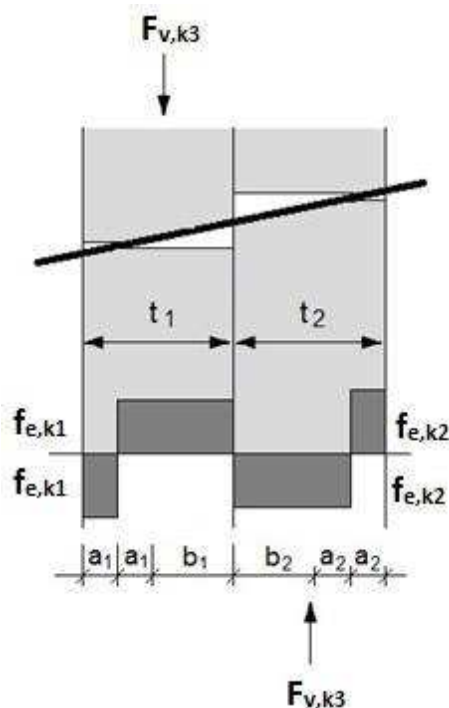


Figura A.2 – Modelo de falha Ic

A Equação (A.3) para a resistência da ligação para o modelo de falha com embutimento nas duas espessuras  $t_1$  e  $t_2$ , é descrita a partir das deduções a seguir:

Sabendo que a resistência é calculada como:

$$F_{v,k3} = -(f_{e,k1} \cdot d \cdot a_1) + (f_{e,k1} \cdot d \cdot a_1) + (f_{e,k1} \cdot d \cdot b_1)$$

Temos

$$F_{v,k3} = f_{e,k1} \cdot d \cdot b_1$$

Também podendo ser expressa como:

$$F_{v,k3} = f_{e,k1} \cdot d \cdot b_1 = f_{e,k2} \cdot d \cdot b_2 = \beta \cdot f_{e,k1} \cdot d \cdot b_2$$

Pois

$$b_1 = \beta \cdot b_2$$

Momento na interface

$$\begin{aligned} &= f_{e,k1} \cdot d \cdot \left( \frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right) \\ &= f_{e,k2} \cdot d \cdot \left( a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right) \\ &= \beta \cdot f_{e,k1} \cdot d \cdot \left( a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right) \end{aligned}$$

Equacionando e substituindo:

$$b_2 = \frac{b_1}{\beta}$$

Teremos:

$$\begin{aligned} \frac{b_1^2}{2} \cdot \frac{\beta + 1}{\beta} &= \beta \cdot a_2^2 + a_1^2 \\ a_1 &= \frac{t_1 - b_1}{2} \end{aligned}$$

e

$$a_2 = \frac{t_2 - b_2}{2} = \frac{\beta \cdot t_2 - b_1}{2 \cdot \beta}$$

Substituindo teremos:

$$b_1^2 \cdot \left( \frac{1 + \beta}{\beta} \right) + 2 \cdot b_1 \cdot (t_1 + t_2) - (t_1^2 + \beta \cdot t_2^2) = 0$$

Resolvendo para b<sub>1</sub> temos:

$$b_1 = \frac{t_1}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$$

Como especificado:

$$R_d = f_{h,1,d} \cdot d \cdot b_1$$



$$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[ 1 + \frac{t_1}{t_2} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \quad (\text{A.3})$$

o Modelo de falha IIa

Ocorrência de flexão do pino metálico com ocorrência de rótula plástica no elemento 2, como mostrado na Figura A.3.

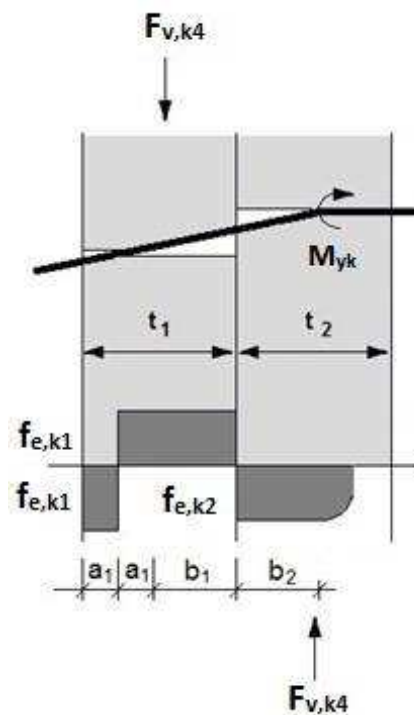


Figura A.3 – Modelo de falha IIa

O cálculo da resistência da ligação para o modelo de falha IIa é especificado pela Equação (A.4) e deduzido na sequência.

Sabendo que:

$$F_{v,k4} = f_{e,k1} \cdot d \cdot b_1 = f_{e,k2} \cdot d \cdot b_2 = \beta \cdot f_{e,k1} \cdot d \cdot b_2$$

$$b_1 = \beta \cdot b_2$$

Fazendo o equilíbrio dos momentos:

$$\Sigma M_{yk} = -f_{e,k2} d \frac{b_2^2}{2} + f_{e,k1} d (b_1 + a_1) \left( b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right) - f_{e,k1} d a_1 \left( b_1 + b_2 + \frac{3a_1}{2} \right)$$

Substituindo:

$$f_{e,k2} = \beta \cdot f_{e,k1} \quad \text{E} \quad a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$$

Fornece:

$$b_1^2 + t_1 \cdot \frac{2 \cdot \beta}{2 + \beta} \cdot b_1 - \frac{\beta \cdot t_1^2}{2 + \beta} - \frac{M_{yk}}{f_{e,k1} \cdot d} \cdot \frac{4 \beta}{2 + \beta} = 0$$

Logo

$$b_1 = \frac{t_1}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{yk}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Substituindo  $b_1$  em:

$$R_d = f_{e,k1} \cdot d \cdot b_1$$

Temos:

$$F_{v,k4} = \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{yk}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \quad (\text{A.4})$$

- Modelo de falha IIb

Ocorrência de flexão do pino metálico com ocorrência de rótula plástica no elemento 1, esquematizado na Figura A.4.

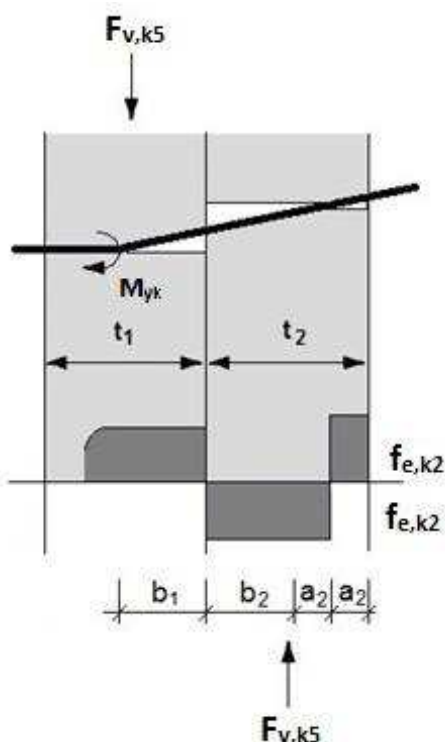


Figura A.4 – Modelo de falha IIb

O cálculo da resistência da ligação para o modelo de falha 2b é especificado pela Equação (A.5) e deduzido na sequência.

Como antes:

$$b_1 = \beta \cdot b_2$$

Fazendo o equilíbrio dos momentos:

$$\Sigma M_{yk} = f_{e,k1} d \left[ \frac{-b_1^2}{2} + \beta b_2 \left( b_1 + \frac{b_2}{2} \right) + \beta a_2 \left( b_1 + t_2 - \frac{3a_2}{2} \right) - \beta a_2 \left( b_1 + t_2 - \frac{a_2}{2} \right) \right]$$

Substituindo:

$$b_1 = \beta \cdot b_2$$

E

$$a_2 = \frac{t_2 - b_2}{2}$$

Temos:

$$b_2^2 + \frac{\beta}{2} \cdot \frac{4 \cdot t_2 \cdot b_2}{\beta \cdot (2 \cdot \beta + 1)} - \left( \frac{\beta \cdot t_2^2}{4} + \frac{M_{yk}}{f_{e,k1} \cdot d} \right) \frac{4}{\beta \cdot (2 \cdot \beta + 1)} = 0$$

Resolvendo para  $b_2$ :

$$b_2 = \frac{-t_2}{2 \cdot \beta + 1} + \sqrt{\frac{t_2^2}{(2 \cdot \beta + 1)^2} + \frac{t_2^2}{2 \cdot \beta + 1} + \frac{4 \cdot M_{yk}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot \beta \cdot (2 \cdot \beta + 1)}}$$

Sendo

$$F_{v,k5} = \beta \cdot f_{e,k1} \cdot d \cdot b_2$$

Assim:

$$F_{v,k5} = \frac{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_2}{1 + 2 \cdot \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{yk}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] \quad (A.5)$$

- o Modelo de falha III

Considerando que há ocorrência de flexão do pino metálico e a existência de duas rótulas plásticas, uma em cada elemento de madeira, podendo ser visualizado na Figura A.5.

Para o modelo de falha 3 a resistência da ligação é especificada na Equação (A.6) e deduzida a seguir.

Com a somatória dos momentos temos:

$$M_{yk} + M_{yk} = f_{e,k1} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left( b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - \beta \cdot f_{e,k1} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2}$$

Lembrando que:

$$b_2 = \frac{b_1}{\beta}$$

Substituindo e resolvendo para  $b_1$ :

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{yk}}{f_{e,k1} \cdot d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}}$$

Sendo:

$$F_{v,k6} = f_{e,k1} \cdot d \cdot b_1$$

Temos:

$$F_{v,k6} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{yk} \cdot f_{e,k1} \cdot d} \quad (A.6)$$

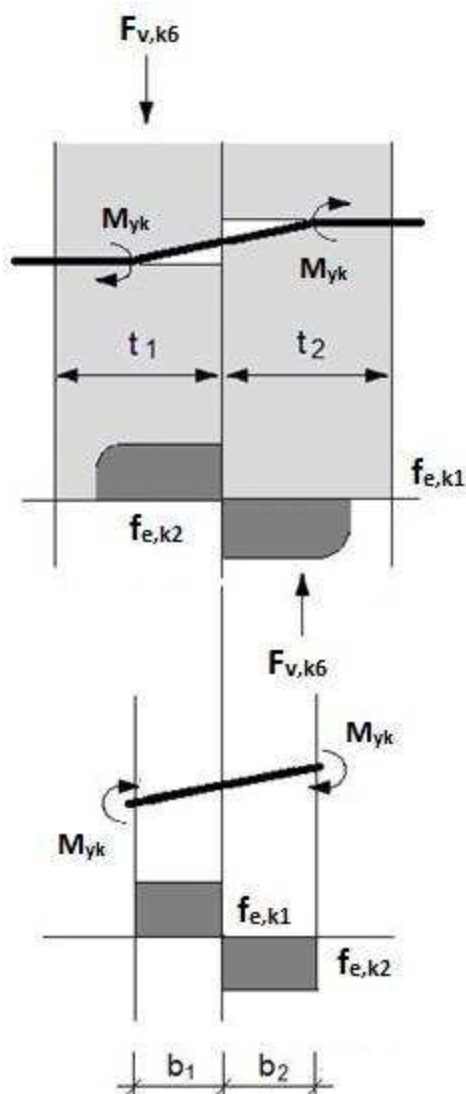


Figura A.5 – Modelo de falha III

- Dupla seção de corte

Segundo Timber Engineering STEP 1 (1995) pode-se utilizar a mesma abordagem de Johansen para se desenvolver equações para resistência da ligação para duas seções de corte, porém, deve-se multiplicar as equações pelo número de cortes, assim, para dupla seção simétrica se multiplica por dois como apresentadas nas Equações (A.7) a (A.10).

$$F_{v,k1} = 2 \cdot (f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d) \quad \text{Modelo de falha Ia} \quad (A.7)$$

(Figura A.1a)

$$F_{v,k2} = 2 \cdot (0,5 \cdot f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta) \quad \text{Modelo de falha Ib} \quad (A.8)$$

(Figura A.1b)

$$F_{v,k3} = 2 \left( \frac{f_{e,k1} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{yk}}{f_{e,k1} d t_1^2}} - \beta \right] \right) \quad \text{Modelo de falha IIa} \quad (A.9)$$

(Figura A.3)

$$F_{v,k4} = 2 \left( \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{yk} f_{e,k1} d} \right) \quad \text{Modelo de falha III} \quad (A.10)$$

(Figura A.5)

O modelo de falha e o número da Figura refere-se ao diagrama mostrado em uma seção de corte.

Nessas equações  $t_2$  é a espessura do elemento central e  $t_1$  a espessura do elemento exterior ou a espessura de penetração do pino no elemento exterior, sendo o que tiver menor valor.

## APÊNDICE B – Dedução das Equações da Norma Brasileira através do Modelo de Johansen

Através das equações deduzidas por Johansen, tem-se a simplificação adotada na norma brasileira, considerando:

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

e

$$\frac{t_2}{t_1} = 1$$

Substituindo na equação (3) temos:

$$R_d = \frac{f_{e,d} \cdot d \cdot t}{1 + 1} \left[ \sqrt{1 + 2 \cdot (1)^2 [1 + 1 + (1)^2] + 1^3 \cdot (1)^2} - 1(1 + 1) \right]$$

Resolvendo:

$$R_d = \frac{f_{e,d} \cdot d \cdot t}{2} \cdot [\sqrt{8} - 2]$$

$$R_d = \frac{f_{e,d} \cdot d \cdot t}{2} \cdot [0,828]$$

$$R_d = 0,414 \cdot f_{e,d} \cdot d \cdot t \quad (\text{B.1})$$

A atual versão da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) apresenta o fator de multiplicação igual a 0,4, porém no projeto de revisão da norma apresenta alteração para fator de multiplicação de 0,5. Não havendo explicação teórica que demonstre a alteração.

Quando o cálculo é realizado para flexão do pino, a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO.., 2011) utiliza a Equação (6), considerando que as peças de madeiras unidas sejam a mesma ( $f_{e,d,1} = f_{e,d,2}$ ) e apenas a utilização de parafuso passante com porcas e arruelas. Assim a Equação (B.2) é obtida através de a dedução a seguir.

Sendo:

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

Substituindo na Equação (26) temos:

$$R_d = \sqrt{\frac{2 \cdot (1)}{1 + 1}} \sqrt{2 \cdot M_d \cdot f_{e,d,1} \cdot d}$$

$$R_d = \sqrt{2 \cdot M_d \cdot f_{e,d,1} \cdot d}$$

No EUROCODE 5 (1993) o valor de cálculo do momento ( $M_d$ ) é utilizado seguindo as convenções de momento elástico, conforme a Equação (39).

$$M_d = 0,8 \cdot f_u \cdot \frac{d^3}{6}$$

Substituindo o valor do momento temos:

$$R_d = \sqrt{2 \cdot \left(0,8 \cdot f_{y,d} \cdot \frac{d^3}{6}\right) \cdot f_{e,d,1} \cdot d}$$

$$R_d = \sqrt{0,266 \cdot d^4 \cdot f_{y,d} \cdot f_{e,d,1}}$$

$$R_d = 0,516 \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{y,d} \cdot f_{e,d,1}} \quad (\text{B.2})$$



## APÊNDICE C – Exemplos para validação do *software*

### CORTE SIMPLES:

Realizar o cálculo da ligação com 4 parafusos M10 – Classe 4.6 e arruelas M10 – DIN 440 V, onde os elementos de madeira são da classe C20 e possuem espessuras  $t_1 = 30 \text{ mm}$  e  $t_2 = 30 \text{ mm}$ . Deve-se aplicar  $k_{mod1} = 0,6$ ,  $k_{mod2} = 1,0$  e  $k_{mod3} = 1,0$ .

### DADOS:

PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS DE MADEIRA			
$f_{c0,k} = 20 \text{ MPa}$	$f_{v0,k} = 4 \text{ MPa}$	$E_{c0,m} = 3500 \text{ MPa}$	$\rho = 500 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

PROPRIEDADES DOS PARAFUSOS			
M10 – Classe 4.6	$d = 10 \text{ mm}$	$f_{\gamma,k} = 235 \text{ MPa}$	$f_{\mu,k} = 400 \text{ MPa}$

Para esta dimensão de parafuso, temos que o valor de  $\alpha_e = 1,9078$ .

PROPRIEDADES DAS ARRUELAS		
M10 – DIN 440 V	$d_1 = 11,0 \text{ mm}$	$d_2 = 34,0 \text{ mm}$

### CÁLCULOS INICIAIS:

Através da Equação (40), calcula-se o momento plástico característico:

$$M_{\gamma k} = 0,3 \cdot f_{\mu,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 400 \cdot 10^{2,6} = 47.773 \text{ N.mm}$$

Através da Equação (13), calcula-se o coeficiente de relação entre os valores de embutimento dos elementos de madeira:

$$\beta = \frac{20}{20} = 1$$

Utilizando a Equação (3), calcula-se a força de embutimento perpendicular as fibras dos elementos de madeira:

$$f_{e90,k} = 0,25 \cdot f_{e0,k} \cdot \alpha_e = 0,25 \cdot 20 \cdot 1,9078 = 9,54 \text{ N/mm}^2$$

Através das Equações (34) e (35), calcula-se o efeito de corda que posteriormente será comparado com o valor de Johansen.

- Devido à resistência de tração no pino metálico:

$$F_{ax,rk} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f_{u,k} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 400 = 23.562 \text{ N}$$

- Devido à resistência ao embutimento da arruela na madeira:

$$F_{ax,rk} = \left( \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - d_1^2 \right) \cdot 3 \cdot f_{e90,k} = \left( \frac{\pi \cdot 34^2}{4} - 11^2 \right) \cdot 3 \cdot 9,54$$

$$F_{ax,rk} = 22.522 \text{ N}$$

Portanto, deve-se utilizar o menor valor entre os dois,  $F_{ax,rk} = 22.522 \text{ N}$ , porém deve-se verificar se o mesmo não é superior a 25% da equação de Johansen.

#### CÁLCULO DA RESISTÊNCIA CONSIDERANDO O EFEITO DE CORDA

Utilizando as Equações (24 a 29), calculou-se a resistência da ligação.

Equação (24):

$$F_{v,k1} = f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d = 20 \cdot 30 \cdot 10 = 6.000 \text{ N}$$

Equação (25):

$$F_{v,k2} = f_{e0,k1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta = 20 \cdot 30 \cdot 10 \cdot 1 = 6.000 \text{ N}$$

Equação (26):

Para este caso, deve-se verificar o valor do efeito de corda comparado com 25% da parcela de Johansen.

$$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} t_1 d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

O limite de  $F_{ax,rk}$  é a parcela de Johansen nesta equação, portanto deve-se verifica-la primeiramente.

$$Johansen\ 3 = \frac{f_{e,k1} t_1 d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$$

$$Johansen\ 3 = \frac{20 \cdot 30 \cdot 10}{1 + 1} \left[ \sqrt{1 + 2 \cdot 1^2 \left[ 1 + \frac{30}{30} + \left( \frac{30}{30} \right)^2 \right] + 1^3 \cdot \left( \frac{30}{30} \right)^2} - 1 \cdot \left( 1 + \frac{30}{30} \right) \right]$$

$$Johansen\ 3 = 2.485\ N$$

Neste caso temos que  $Johansen\ 3 \leq F_{ax,rk}$ , portanto  $F_{ax,rk} = 2.485\ N$ .

Calculando-se então este item temos que:

$$F_{v,k3} = (Johansen\ 3) + \frac{F_{ax,rk}}{4} = 2485 + \frac{2485}{4}$$

$$F_{v,k3} = 3.106\ N$$

Equação (27):

Para este caso, também deve-se verificar o valor do efeito de corda comparado com 25% da parcela de Johansen.

$$F_{v,k4} = 1,05 \cdot \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

O limite de  $F_{ax,rk}$  é a parcela de Johansen nesta equação, portanto deve-se verificá-la primeiramente.

$$Johansen\ 4 = \frac{f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e0,k1} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right]$$

$$Johansen\ 4 = \frac{20 \cdot 30 \cdot 10}{2 + 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 47.773}{20 \cdot 30^2 \cdot 10}} - 1 \right]$$

$$Johansen\ 4 = 3.361\ N$$

Neste caso temos que  $Johansen\ 4 \leq F_{ax,rk}$ , portanto  $F_{ax,rk} = 3.361\ N$ .

Calculando-se então este item temos que:

$$F_{v,k4} = 1,05 \cdot (Johansen\ 4) + \frac{F_{ax,rk}}{4} = 1,05 \cdot 3.361 + \frac{3.361}{4}$$

$$F_{v,k4} = 4.369\ N$$

Equação (28):

Para este caso, também deve-se verificar o valor do efeito de corda comparado com 25% da parcela de Johansen.

$$F_{v,k5} = 1,05 \cdot \frac{f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

O limite de  $F_{ax,rk}$  é a parcela de Johansen nesta equação, portanto deve-se verifica-la primeiramente.

$$Johansen\ 5 = \frac{f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right]$$

$$Johansen\ 5 = \frac{20 \cdot 30 \cdot 10}{1 + 2 \cdot 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1^2 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (1 + 2 \cdot 1) \cdot 47.773}{20 \cdot 10 \cdot 30^2}} - 1 \right]$$

$$Johansen\ 5 = 3.361\ N$$

Neste caso temos que  $Johansen\ 5 \leq F_{ax,rk}$ , portanto  $F_{ax,rk} = 3.361\ N$ .

Calculando-se então este item temos que:

$$F_{v,k5} = 1,05 \cdot (Johansen\ 5) + \frac{F_{ax,rk}}{4} = 1,05 \cdot 3.361 + \frac{3.361}{4}$$

$$F_{v,k5} = 4.369\ N$$

Equação (29):

Para este caso, também deve-se verificar o valor do efeito de corda comparado com 25% da parcela de Johansen.

$$F_{v,k6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e0,k1} \cdot d} + \frac{F_{ax,rk}}{4}$$

O limite de  $F_{ax,rk}$  é a parcela de Johansen nesta equação, portanto deve-se verifica-la primeiramente.

$$Johansen\ 6 = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e0,k1} \cdot d} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 47.773 \cdot 20 \cdot 10}$$

$$Johansen\ 6 = 4.371\ N$$

Neste caso temos que  $Johansen\ 6 \leq F_{ax,rk}$ , portanto  $F_{ax,rk} = 4.371\ N$ .

Calculando-se então este item temos que:

$$F_{v,k6} = 1,15 \cdot (Johansen\ 6) + \frac{F_{ax,rk}}{4} = 1,15 \cdot 4.371 + \frac{4.371}{4}$$

$$F_{v,k4} = 6.119\ N$$

$$F_{v,rk} \leq \begin{cases} F_{v,k1} = 6.000\ N \\ F_{v,k2} = 6.000\ N \\ F_{v,k3} = 3.106\ N \\ F_{v,k4} = 4.369\ N \\ F_{v,k5} = 4.369\ N \\ F_{v,k6} = 6.119\ N \end{cases}$$

Portanto  $F_{v,rk} = F_{v,k3} = 3.106\ N$ , ocorrendo embutimento nos dois elementos de madeira, devido ao giro do pino metálico.

Para calcular a resistência característica da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (38).

$$R_{v,k} = n^{\circ}\ parafusos \cdot F_{v,rk} = 4 \cdot 3.106 = 12.424\ N$$

Para se calcular a resistência de cálculo da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (1).

$$R_{v,d} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \cdot \frac{R_{v,k}}{\gamma_w}$$

$$R_{v,d} = 0,6 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{12.424}{1,4} = 5.325\ N$$

## CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DESCONSIDERANDO O EFEITO DE CORDA

Utilizando as Equações (24 a 29), calculou-se a resistência da ligação.

Equação (24):

$$F_{v,k1} = f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d = 20 \cdot 30 \cdot 10 = 6.000 \text{ N}$$

Equação (25):

$$F_{v,k2} = f_{e0,k1} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta = 20 \cdot 30 \cdot 10 \cdot 1 = 6.000 \text{ N}$$

Equação (26):

$$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} t_1 d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,k3} = \frac{20 \cdot 30 \cdot 10}{1 + 1} \left[ \sqrt{1 + 2 \cdot 1^2 \left[ 1 + \frac{30}{30} + \left( \frac{30}{30} \right)^2 \right] + 1^3 \cdot \left( \frac{30}{30} \right)^2} - 1 \cdot \left( 1 + \frac{30}{30} \right) \right] + \frac{0}{4}$$

$$F_{v,k3} = 2.485 \text{ N}$$

Equação (27):

$$F_{v,k4} = 1,05 \cdot \frac{f_{e,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,k4} = 1,05 \cdot \frac{20 \cdot 30 \cdot 10}{2 + 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 47.773}{20 \cdot 10 \cdot 30^2}} - 1 \right] + \frac{0}{4}$$

$$F_{v,k4} = 3.529 \text{ N}$$

Equação (28):

$$F_{v,k5} = 1,05 \cdot \frac{f_{e,k1} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e,k1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,k5} = 1,05 \cdot \frac{20 \cdot 30 \cdot 10}{1 + 2 \cdot 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1^2 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (1 + 2 \cdot 1) \cdot 47.773}{20 \cdot 10 \cdot 30^2}} - 1 \right] + \frac{0}{4}$$

$$F_{v,k5} = 3.529 \text{ N}$$

Equação (29):

$$F_{v,k6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e0,k1} \cdot d} + \frac{F_{ax,rk}}{4}$$

$$F_{v,k6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 47.773 \cdot 20 \cdot 10} + \frac{0}{4}$$

$$F_{v,k6} = 5.027 \text{ N}$$

$$F_{v,rk} \leq \begin{cases} F_{v,k1} = 6.000 \text{ N} \\ F_{v,k2} = 6.000 \text{ N} \\ F_{v,k3} = 2.485 \text{ N} \\ F_{v,k4} = 3.529 \text{ N} \\ F_{v,k5} = 3.529 \text{ N} \\ F_{v,k6} = 5.027 \text{ N} \end{cases}$$



Portanto  $F_{v,rk} = F_{v,k3} = 2.485 \text{ N}$ , ocorrendo embutimento nos dois elementos de madeira, devido ao giro do pino metálico.

Para calcular a resistência característica da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (38).

$$R_{v,k} = n^{\circ} \text{ parafusos} \cdot F_{v,rk} = 4 \cdot 2.485 = 9.940 \text{ N}$$

Para se calcular a resistência de cálculo da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (1).

$$R_{v,d} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \cdot \frac{R_{v,k}}{\gamma_w}$$

$$R_{v,d} = 0,6 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{9.940}{1,4} = 4.260 \text{ N}$$

A seguir são ilustrados os relatórios gerado pelo *software* para a ligação calculada, considerando o efeito de corda, conforme Figura C.1, e desconsiderando o mesmo, conforme Figura C.2.

**DADOS:****ELEMENTOS DE MADEIRA**

<b>Elemento 1:</b>	C-20
$f_{c0,k}$ :	20 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	4 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	3500 (MPa)
Densidade:	500 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	30 (mm)

<b>Elemento 2</b>	C-20
$f_{c0,k}$ :	20 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	4 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	3500 (MPa)
Densidade:	500 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	30 (mm)

<b>Coefficientes</b>	
$k_{mod1}$ :	0,6
$k_{mod2}$ :	1
$k_{mod3}$ :	1
Ângulo:	0 (°)
$\gamma_{m,ligação}$ :	1,4

**ELEMENTOS METÁLICOS**

<b>Parafuso</b>	
Tipo de Parafuso:	ISO 4016 - M10
d: 10,0 (mm)	Número de Parafusos: 4
Classe de Aço:	ISO 898-1 - Classe 4.6
$f_{y,k}$ : 235 (MPa)	$f_{u,k}$ : 400 (MPa)
Consideração da Força de Arrancamento:	Sim

<b>Arruela</b>	
Tipo de arruela:	DIN 440 V - M10
d1: 11.0 (mm)	d2: 34.0 (mm)

**VALORES CALCULADOS:**

<b>Cálculos Preliminares</b>	
$f_{e0,k1}$ :	20 (MPa)
$f_{e0,k2}$ :	20 (MPa)
$F_{ax,rk}$ :	18457 (N)

<b>Cálculo do Eurocode 5</b>					
$M_{yk}$ :	47773 (N.mm)	$\beta$ : 1,00			
$F_{v,k1}$ :	6000 (N)	$F_{v,k3}$ :	3107 (N)	$F_{v,k5}$ :	4366 (N)
$F_{v,k2}$ :	6000 (N)	$F_{v,k4}$ :	4369 (N)	$F_{v,k6}$ :	6120 (N)

**RESULTADO:**

Tipo de ruptura: Embutimento do pino metálico nas duas peças, devido ao giro do pino metálico.



$F_{v,rk}$ :	3107 (N)
$R_{v,k}$ :	12426 (N)
$R_{v,d}$ :	5326 (N)

\*  $F_{v,rk}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, por parafuso.

\*  $R_{v,k}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.

\*  $R_{v,d}$  é a resistência lateral de cálculo por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.

18/12/2014

01:00:41

Figura C.1 – Relatório TCD para uma seção de corte considerando o efeito de corda



## RELATÓRIO DE RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO



1 Seção de Corte

Direção Paralela:



### DADOS:

#### ELEMENTOS DE MADEIRA

Elemento 1:	C-20
$f_{c0,k}$ :	20 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	4 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	3500 (MPa)
Densidade:	500 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	30 (mm)

Elemento 2	C-20
$f_{c0,k}$ :	20 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	4 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	3500 (MPa)
Densidade:	500 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	30 (mm)

Coeficientes	
$k_{mod1}$ :	0,6
$k_{mod2}$ :	1
$k_{mod3}$ :	1
Ângulo:	0 (°)
$\gamma_{m,ligação}$ :	1,4

#### ELEMENTOS METÁLICOS

Parafuso	
Tipo de Parafuso:	ISO 4016 - M10
$d$ : 10,0 (mm)	Número de Parafusos: 4
Classe de Aço:	ISO 898-1 - Classe 4.6
$f_{y,k}$ : 235 (MPa)	$f_{u,k}$ : 400 (MPa)
Consideração da Força de Arrancamento: Não	



Arruela	
Tipo de arruela:	DIN 440 V - M10
$d_1$ : 11,0 (mm)	$d_2$ : 34,0 (mm)



### VALORES CALCULADOS:

Cálculos Preliminares	
$f_{e0,k1}$ :	20 (MPa)
$f_{e0,k2}$ :	20 (MPa)
$F_{ax,rk}$ :	0 (N)

Cálculo do Eurocode 5			
$M_{yk}$ :	47773 (N.mm)	$\beta$ :	1,00
$F_{v,k1}$ :	6000 (N)	$F_{v,k3}$ :	2485 (N)
$F_{v,k2}$ :	6000 (N)	$F_{v,k4}$ :	3529 (N)
		$F_{v,k5}$ :	3529 (N)
		$F_{v,k6}$ :	5027 (N)

### RESULTADO:

Tipo de ruptura: Embutimento do pino metálico nas duas peças, devido ao giro do pino metálico.



$F_{v,rk}$ :	2485 (N)
$R_{v,k}$ :	9941 (N)
$R_{v,d}$ :	4260 (N)

\*  $F_{v,rk}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, por parafuso.

\*  $R_{v,k}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.

\*  $R_{v,d}$  é a resistência lateral de cálculo por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.

18/12/2014

01:33:34

Figura C.2 – Relatório TCD para uma seção de corte desconsiderando o efeito de corda

**CORTE DUPLO:**

Realizar o cálculo da ligação com 4 parafusos M12 – Classe 8.8 e arruelas M12 – DIN 440 R, onde os elementos de madeira são da classe D40 e possuem espessuras  $t_1 = 30 \text{ mm}$  e  $t_2 = 60 \text{ mm}$ . Deve-se aplicar  $k_{mod1} = 0,6$ ,  $k_{mod2} = 1,0$  e  $k_{mod3} = 1,0$ .

**DADOS:**

<b>PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS DE MADEIRA</b>			
$f_{c0,k} = 40 \text{ MPa}$	$f_{v0,k} = 6 \text{ MPa}$	$E_{CO,m} = 19500 \text{ MPa}$	$\rho = 950 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

<b>PROPRIEDADES DOS PARAFUSOS</b>			
M12 – Classe 8.8	$d = 12 \text{ mm}$	$f_{\gamma,k} = 640 \text{ MPa}$	$f_{\mu,k} = 800 \text{ MPa}$

Para esta dimensão de parafuso, temos que o valor de  $\alpha_e = 1,7391$ .

<b>PROPRIEDADES DAS ARRUELAS</b>		
M12 – DIN 440 R	$d_1 = 13,5 \text{ mm}$	$d_2 = 44,0 \text{ mm}$

**CÁLCULOS INICIAIS:**

Através da Equação (40), calcula-se o momento plástico característico:

$$M_{\gamma k} = 0,3 \cdot f_{\mu,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 12^{2,6} = 153.490 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Através da Equação (13), calcula-se o coeficiente de relação entre os valores de embutimento dos elementos de madeira:

$$\beta = \frac{40}{40} = 1$$

Utilizando a Equação (3), calcula-se a força de embutimento perpendicular as fibras dos elementos de madeira:

$$f_{e90,k} = 0,25 \cdot f_{e0,k} \cdot \alpha_e = 0,25 \cdot 40 \cdot 1,7391 = 17,39 \text{ N/mm}^2$$

Através das Equações (34) e (35), calcula-se o efeito de corda que posteriormente será comparado com o valor de Johansen.

- Devido à resistência de tração no pino metálico:

$$F_{ax,rk} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f_{u,k} = 0,75 \cdot \frac{\pi \cdot 12^2}{4} \cdot 800 = 67.858 \text{ N}$$

- Devido à resistência ao embutimento da arruela na madeira:

$$F_{ax,rk} = \left( \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot 3 \cdot f_{e90,k} = \left( \frac{\pi \cdot 44^2}{4} - \frac{\pi \cdot 13,5^2}{4} \right) \cdot 3 \cdot 17,39$$

$$F_{ax,rk} = 71.859 \text{ N}$$

Portanto, deve-se utilizar o menor valor entre os dois,  $F_{ax,rk} = 67.858 \text{ N}$ , porém deve-se verificar se o mesmo não é superior a 25% da equação de Johansen.

#### CÁLCULO DA RESISTÊNCIA CONSIDERANDO O EFEITO DE CORDA

Utilizando as Equações (30 a 33), calculou-se a resistência da ligação.

Equação (30):

$$F_{v,k1} = f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d = 40 \cdot 30 \cdot 12 = 14.400 \text{ N}$$

Equação (31):

$$F_{v,k2} = 0,5 \cdot f_{e0,k2} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \cdot 40 \cdot 60 \cdot 12 = 14.400 \text{ N}$$

Equação (32):

$$F_{v,k3} = 1,05 \cdot \frac{f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e0,k1} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,rk}}{4}$$

O limite de  $F_{ax,rk}$  é a parcela de Johansen nesta equação, portanto deve-se verifica-la primeiramente.

$$Johansen\ 3 = \frac{f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e0,k1} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right]$$

$$Johansen\ 3 = \frac{40 \cdot 30 \cdot 12}{2 + 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 153.490}{40 \cdot 30^2 \cdot 12}} - 1 \right]$$

$$Johansen\ 3 = 8.998,34\ N$$

Neste caso temos que  $Johansen\ 3 \leq F_{ax,rk}$ , portanto  $F_{ax,rk} = 8.998,34\ N$ .

Calculando-se então este item temos que:

$$F_{v,k3} = 1,05 \cdot (Johansen\ 3) + \frac{F_{ax,rk}}{4} = 1,05 \cdot 8.998,34 + \frac{8.998,34}{4}$$

$$F_{v,k3} = 11.697,84\ N$$

Equação (33):

Para este caso, também deve-se verificar o valor do efeito de corda comparado com 25% da parcela de Johansen.

$$F_{v,k4} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e0,k1} \cdot d} + \frac{F_{ax,rk}}{4}$$

O limite de  $F_{ax,rk}$  é a parcela de Johansen nesta equação, portanto deve-se verifica-la primeiramente.

$$Johansen\ 4 = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e0,k1} \cdot d} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 153.490 \cdot 40 \cdot 12}$$

$$Johansen\ 4 = 12.138,80\ N$$

Neste caso temos que  $Johansen\ 4 \leq F_{ax,rk}$ , portanto  $F_{ax,rk} = 12.138,80\ N$ .

Calculando-se então este item temos que:

$$F_{v,k4} = 1,15 \cdot (Johansen\ 4) + \frac{F_{ax,rk}}{4} = 1,15 \cdot 12.138,80 + \frac{12.138,80}{4}$$

$$F_{v,k4} = 16.994,32\ N$$

$$F_{v,rk} \leq \begin{cases} F_{v,k1} = 14.400\ N \\ F_{v,k2} = 14.400\ N \\ F_{v,k3} = 11.698\ N \\ F_{v,k4} = 16.994\ N \end{cases}$$

Portanto  $F_{v,rk} = F_{v,k3} = 11.698\ N$ , ocorrendo flexão do pino metálico com rótula plástica no elemento 2 de madeira.

Para calcular a resistência característica da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (38).

$$R_{v,k} = n^{\circ}\ parafusos \cdot F_{v,rk} = 4 \cdot 11.698 = 46.792\ N$$

Para se calcular a resistência de cálculo da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (1).

$$R_{v,d} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \cdot \frac{R_{v,k}}{\gamma_w}$$

$$R_{v,d} = 0,6 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{46.792}{1,4} = 20.053\ N$$

#### CÁLCULO DA RESISTÊNCIA SEM CONSIDERAR O EFEITO DE CORDA:

Utilizando as Equações (30 a 33), calculou-se a resistência da ligação.

Equação (30):

$$F_{v,k1} = f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d = 40 \cdot 30 \cdot 12 = 14.400 \text{ N}$$

Equação (31):

$$F_{v,k2} = 0,5 \cdot f_{e0,k2} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \cdot 40 \cdot 60 \cdot 12 = 14.400 \text{ N}$$

Equação (32):

$$F_{v,k3} = 1,05 \cdot \frac{f_{e0,k1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e0,k1} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,rk}}{4}$$

$$F_{v,k3} = 1,05 \cdot \frac{40 \cdot 30 \cdot 12}{2 + 1} \left[ \sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 153.490}{40 \cdot 30^2 \cdot 12}} - 1 \right] + \frac{0}{4}$$

$$F_{v,k3} = 9.448,23 \text{ N}$$

Equação (33):

$$F_{v,k4} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e0,k1} \cdot d} + \frac{F_{ax,rk}}{4}$$

$$F_{v,k4} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 153.490 \cdot 40 \cdot 12} + \frac{0}{4}$$

$$F_{v,k4} = 13.959 \text{ N}$$

$$F_{v,rk} \leq \begin{cases} F_{v,k1} = 14.400 \text{ N} \\ F_{v,k2} = 14.400 \text{ N} \\ F_{v,k3} = 9.448 \text{ N} \\ F_{v,k4} = 13.959 \text{ N} \end{cases}$$



Portanto  $F_{v,rk} = F_{v,k3} = 11.698 \text{ N}$ , ocorrendo flexão do pino metálico com rótula plástica no elemento 2 de madeira.

Para calcular a resistência da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (38).

$$R_{v,k} = n^{\circ} \text{ parafusos} \cdot F_{v,rk} = 4 \cdot 9.448 = 37.792 \text{ N}$$

Para se calcular a resistência de cálculo da ligação para uma seção de corte, considerando a quantidade de parafusos utiliza-se a Equação (1).

$$R_{v,d} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \cdot \frac{R_{v,k}}{\gamma_w}$$

$$R_{v,d} = 0,6 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{37.792}{1,4} = 16.196 \text{ N}$$

A seguir são ilustrados os relatórios gerado pelo *software* para a ligação calculada, considerando o efeito de corda, conforme Figura C.3, e desconsiderando o mesmo, conforme Figura C.4.

**DADOS****ELEMENTOS DE MADEIRA**

<b>Elemento 1:</b>	D-40
$f_{c0,k}$ :	40 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	6 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	19500 (MPa)
Densidade:	950 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	30 (mm)

<b>Elemento 2:</b>	D-40
$f_{c0,k}$ :	40 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	6 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	19500 (MPa)
Densidade:	950 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	60 (mm)

<b>Coefficientes</b>	
$k_{mod1}$ :	0,6
$k_{mod2}$ :	1
$k_{mod3}$ :	1
Ângulo:	0 (°)
$\gamma_{m,ligação}$ :	1,4

**ELEMENTOS METÁLICOS**

<b>Parafuso</b>	
Tipo de Parafuso:	ISO 4016 - M12
$d$ : 12,0 (mm)	Número de Parafusos: 4
Classe de Aço:	ISO 898-1 - Classe 8.8
$f_{y,k}$ : 640 (MPa)	$f_{u,k}$ : 800 (MPa)
Consideração da Força de Arrancamento:	Sim

<b>Arruela</b>	
Tipo de arruela:	DIN 440 R - M12
$d1$ : 13,5 (mm)	$d2$ : 44,0 (mm)

**VALORES CALCULADOS:**

<b>Cálculos Preliminares</b>	
$f_{e0,k1}$ :	40 (MPa)
$f_{e0,k2}$ :	40 (MPa)
$F_{ax,rk}$ :	71863 (N)

<b>Cálculo do Eurocode 5</b>	
$M_{yk}$ :	153491 (N.mm)
$\beta$ :	1,00
$F_{v,k1}$ :	14400 (N)
$F_{v,k2}$ :	14400 (N)
$F_{v,k3}$ :	11698 (N)
$F_{v,k4}$ :	16994 (N)

**RESULTADO:**

Tipo de ruptura: Flexão do pino metálico com ocorrência de rótula plástica no elemento 2.

$F_{v,rk}$ :	11698 (N)
$R_{v,k}$ :	46791 (N)
$R_{v,d}$ :	20053 (N)

- \*  $F_{v,rk}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, por parafuso.
- \*  $R_{v,k}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.
- \*  $R_{v,d}$  é a resistência lateral de cálculo por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.

18/12/2014

03:18:52

Figura C.3 – Relatório TCD para duas ou mais seções de corte considerando o efeito de corda



## RELATÓRIO DE RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO



2 ou mais Seções de Corte

Direção Paralela:



### DADOS:

#### ELEMENTOS DE MADEIRA

<b>Elemento 1:</b>	D-40
$f_{c0,k}$ :	40 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	6 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	19500 (MPa)
Densidade:	950 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	30 (mm)

<b>Elemento 2:</b>	D-40
$f_{c0,k}$ :	40 (MPa)
$f_{v0,k}$ :	6 (MPa)
$E_{c0,m}$ :	19500 (MPa)
Densidade:	950 (kg/m <sup>3</sup> )
Espessura:	60 (mm)

<b>Coefficientes</b>	
$k_{mod1}$ :	0,6
$k_{mod2}$ :	1
$k_{mod3}$ :	1
Ângulo:	0 (°)
$\gamma_{m,ligação}$ :	1,4

#### ELEMENTOS METÁLICOS

<b>Parafuso</b>	
Tipo de Parafuso:	ISO 4016 - M12
d: 12,0 (mm)	Número de Parafusos: 4
Classe de Aço:	ISO 898-1 - Classe 8.8
$f_{y,k}$ : 640 (MPa)	$f_{u,k}$ : 800 (MPa)
Consideração da Força de Arrancamento:	Não

<b>Arruela</b>	
Tipo de arruela:	DIN 440 R - M12
d1: 13,5 (mm)	d2: 44,0 (mm)

### VALORES CALCULADOS:

<b>Cálculos Preliminares</b>	
$f_{e0,k1}$ :	40 (MPa)
$f_{e0,k2}$ :	40 (MPa)
$F_{ax,rk}$ :	0 (N)

<b>Cálculo do Eurocode 5</b>			
Myk:	153491 (N.mm)	$\beta$ :	1,00
$F_{v,k1}$ :	14400 (N)	$F_{v,k3}$ :	9448 (N)
$F_{v,k2}$ :	14400 (N)	$F_{v,k4}$ :	13960 (N)

### RESULTADO:

Tipo de ruptura: Flexão do pino metálico com ocorrência de rótula plástica no elemento 2.



$F_{v,rk}$ :	9448 (N)
$R_{v,k}$ :	37793 (N)
$R_{v,d}$ :	16197 (N)

\*  $F_{v,rk}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, por parafuso.

\*  $R_{v,k}$  é a resistência lateral característica por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.

\*  $R_{v,d}$  é a resistência lateral de cálculo por plano de corte, considerando a quantidade de parafusos.

18/12/2014

03:20:53

Figura C.4 – Relatório TCD para duas ou mais seções de corte desconsiderando o efeito de corda

## **APÊNDICE D – Software TCD – Timber Connections Design**

O software TCD – Timber Connections Design desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso, é disponibilizado através de contato pelo e-mail [mvschwanz@gmail.com](mailto:mvschwanz@gmail.com) , informando o seu nome completo, cidade, universidade e solicitando a versão atualizada atualizada.