

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

FRANCIELI STEFANI COFANI

**SOFTWARE DE APOIO À APRENDIZAGEM PARA  
DIMENSIONAMENTO DE PILARES EM MADEIRA SUBMETIDOS À  
COMPRESSÃO OU À FLEXOCOMPRESSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO  
2016

FRANCIELI STEFANI COFANI

**SOFTWARE DE APOIO À APRENDIZAGEM PARA  
DIMENSIONAMENTO DE PILARES EM MADEIRA SUBMETIDOS À  
COMPRESSÃO OU À FLEXOCOMPRESSÃO**

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

CAMPO MOURÃO  
2016



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

### SOFTWARE DE APOIO À APRENDIZAGEM PARA DIMENSIONAMENTO DE PILARES EM MADEIRA SUBMETIDOS À COMPRESSÃO OU À FLEXOCOMPRESSÃO

por

**Francieli Stefani Cofani**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 8h00min do dia 28 de novembro de 2016 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. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira**

( UTFPR )

**Prof. Dr. Leandro Waidemam**

( 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. Ronaldo Rigobello**

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

A Deus.

Aos meus pais Warley e Nilza.

Ao meu irmão Gabriel.

Ao meu eterno namorado Guilherme.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade de vivenciar esta experiência acadêmica! Aos meus pais, Nilza e Warley, por todo o suporte e carinho, por nunca deixarem faltar nada e sempre me apoiarem nos momentos de maior dificuldade, ao meu irmão Gabriel por sempre lembrar-me da alegria de viver e ao meu namorado Guilherme, por estar ao meu lado e principalmente por colaborar efetivamente no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador e amigo Jorge Góes, meu sincero agradecimento por me ajudar a trilhar este caminho, obrigada por todos os conselhos, ensinamentos, conversas que me ajudaram a crescer profissionalmente e pessoalmente. Agradeço também a oportunidade de participar do PET – Programa de Educação Tutorial, o qual foi fonte de muito aprendizado e experiências, obrigada a todos meus amigos petianos pelos momentos vividos.

Aos meus amigos de UTFPR, Thais Padilha, Thais Fernanda, Angélica Fernandes, Sara Coimbra, Andressa Maiara, Alexandre Borges, Victor Medeiros, Lígia Maillard, agradeço imensamente os momentos vividos, as risadas compartilhadas, as gordices, as brincadeiras, os trabalhos e estudos, espero que estas amizades perpetuem!

Agradeço aos meus familiares e às minhas amigas Talina e Emily, que mesmo com distância estiveram ao meu lado de alguma maneira. Agradeço aos meus avós Serge e Antenor por me incentivarem a viver esta experiência e aos meus avós Alice e Osvaldo por todo carinho, obrigada por todos os ensinamentos!

Enfim, agradeço a todos que passaram pela minha vida tornando-a mais agradável!

## RESUMO

COFANI, Francieli S. **Software de apoio à aprendizagem para dimensionamento de pilares em madeira submetidos à compressão ou à flexocompressão.** Campo Mourão, 2016. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

Com a implantação da cultura da sustentabilidade e a partir da conferência mundial Rio-92, a madeira passou a ser vista como material chave para o desenvolvimento sustentável, além de ser versátil permitindo combinar soluções estruturais e arquitetônicas com beleza, conforto e segurança. A partir da importância que este material passou a ter no setor da construção civil, torna-se necessário uma normatização eficiente e segura nos métodos de dimensionamento das estruturas construídas em madeira. No Brasil, a NBR 7190 (1997) exerce tal função e sua versão atual foi publicada em 1997. Porém, logo que publicada surgiram várias críticas ao método de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas, o que fez com que em 2011 fosse formulado o projeto de norma da NBR 7190 (2011). Devido à necessidade de criar softwares que contemplem as alterações apresentadas no projeto da norma brasileira, além da importância das ferramentas digitais, que permitem um processo de aprendizagem mais dinâmico, este trabalho teve como objetivo desenvolver um software para dimensionamento de pilares em madeira com seção maciça, submetidos à compressão ou à flexocompressão de acordo com o projeto da norma brasileira. Como resultado deste trabalho obteve-se o software VeM (Verificações de Elementos em Madeira) desenvolvido através da multiplataforma Lazarus, cujo funcionamento consiste na entrada dos dados pelo usuário, cálculo das propriedades do material, cálculo das propriedades geométricas, verificação do elemento à ruptura, verificação do elemento à estabilidade e por fim indicação dos resultados em relatório próprio.

**Palavras-chave:** Software. Compressão. Flexocompressão. Pilares em Madeira.

## ABSTRACT

COFANI, Francieli S. **Learning support software for design of wooden columns submitted to combined bending and axial forces**. Campo Mourão, 2016. 94p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

With the implementation of sustainability culture and from the Rio-92 World Conference, the wood started to be seen as a key material for a sustainable development, it is also versatile, allowing us to combine structural and architectural solutions with beauty, comfort and safety. Seeing the importance that this material has in the construction sector, it is necessary an efficient and safe regulation in design methods of wooden structures built. In Brazil, the NBR 7190 (1997) performs that and its current version was published in 1997. However, as soon as it was published there were several criticisms of the design method for combined bending and axial forces, which meant that in 2011 it was made the proposed standard design NBR 7190 (2011). Due to the need to create a software that addresses the amendments in brazilian code and the importance of digital tools that allow a process of learning more dynamic, this study is aimed to develop software for sizing columns wood with solid section, under combined bending and axial forces according to the draft project standard brazilian code. As a result of this work it was obtained VEM software (Elements Checks Wood) carried by platform Lazarus, whose operation is the data input by the user, calculating properties of the material, calculating geometric properties, verificating the element to rupture, verificating the stable element and finally displaying the results in a own report.

**Keywords:** Software. Combined Bending. Axial Forces. Wooden columns.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abrigo construído pelo homem primitivo (120 000 - 40 000 a.C.) .....	17
Figura 2 - Seções transversais de peças comprimidas. Madeira roliça (a), ou madeira lavrada (b), madeira serrada (c), madeira laminada colada (d), seção composta de peças roliças (e), seção composta de peças serradas com ligação contínua (f) e seção composta de peças serradas ligadas por peças intermediárias descontínuas (g).....	19
Figura 3 - Residência sustentada por pilares de madeira pínus.....	20
Figura 4 - Pilar elementos com ligação descontínua.....	21
Figura 5- Diagrama de corpo livre de um seguimento na posição defletida.....	23
Figura 6 - Valores dos coeficientes K.....	26
Figura 7 - Coluna submetida à carga excêntrica .....	27
Figura 8 - Diagrama de corpo livre da seção arbitrária .....	28
Figura 9 – Diagrama de corpo livre (a) e diagramas de tensões (b) .....	30
Figura 10 - Curvas de resistência à compressão segundo os critérios da NBR 7190/97 .....	33
Figura 11 - Ajuste da curva de resistência à compressão para peças de seção retangular em madeira folhosa nas classes de umidade 1 e 2.....	34
Figura 12 - Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97 para folhosas de classe C40 submetidas à compressão centrada .....	35
Figura 13 - Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97 para folhosas de classe C40 submetidas à flexocompressão .....	36
Figura 14 - Valores de $K_E$ .....	44
Figura 15 - Interface Lazarus .....	48
Figura 16 - Dados de entrada do programa .....	50
Figura 17 - Fluxograma da entrada de dados para as “Propriedades da Madeira” ...	51
Figura 18 - Fluxograma referente às “Propriedades geométricas e de vinculação” ..	52
Figura 19 - Fluxograma referente ao item "Definição do Esforço".....	53
Figura 20 - Verificação de Peças Comprimidas com Carga Centrada .....	54
Figura 21 - Verificação de Peças Flexocomprimidas com Carga Excêntrica .....	54
Figura 22 - Página inicial do software VeM .....	57
Figura 23 – Tela de "Ajuda" .....	57



Figura 24 - Tela: "Propriedades da Madeira" .....	58
Figura 25 - Opções para o "Tipo de Classificação" para Coníferas .....	59
Figura 26 - Mensagem para quando selecionado o item "Madeira Conífera não classificada" .....	59
Figura 27 - Opções para o "Tipo de Classificação" para Folhosas .....	60
Figura 28 - Tela: "Propriedades Geométricas e de Vinculação" .....	61
Figura 29 - Tela para seção transversal retangular/quadrada.....	62
Figura 30 - Tela para seção transversal circular .....	63
Figura 31 - Opções de vinculações disponibilizadas pelo software.....	64
Figura 32 - Tela: "Esforço de Cálculo" .....	65
Figura 33 - Tela para "Esforço Centrado" .....	66
Figura 34 - Tela para "Esforço Excêntrico" .....	67
Figura 35 - Modelo de relatório gerado pelo software .....	68
Figura 36 - Tela: "Relatório de Cálculo" .....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência das Coníferas .....	38
Tabela 2 - Classes de resistência das Folhosas .....	38
Tabela 3 - Valores do $k_{mod2}$ .....	40
Tabela 4 - Classe de umidade.....	40
Tabela 5 - Valores de $k_{mod3}$ para Coníferas.....	41
Tabela 6 - Valores de $k_{mod3}$ para Folhosas.....	41

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definição de classes de carregamento e valores de $k_{\text{mod}1}$ .....	39
Quadro 2 - Exemplos práticos das classes de carregamento .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
AF&PA	<i>American Forest and Paper Association</i>
AS	<i>Australian Standards</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CWC	<i>Canadian Wood Council</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EUROCODE	<i>European Standard</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
MLC	Madeira Laminada Colada
NB	Norma Brasileira
NBR	Norma Brasileira Revisada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>16</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
4.1 CONSTRUÇÕES EM MADEIRA.....	17
4.2 PILARES DE MADEIRA .....	19
4.2 TEORIA DA FLAMBAGEM PARA ELEMENTOS COMPRIMIDOS.....	21
4.2.1 Flambagem em pilares com tipos diferentes de vinculações. ....	25
4.3 TEORIA DA FLAMBAGEM PARA ELEMENTOS FLEXOCOMPRIMIDOS .....	27
4.4 DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE MADEIRA COM SEÇÃO MACIÇA.....	31
4.4.1 Dimensionamento de elementos comprimidos e flexocomprimidos com seção maciça segundo o projeto de norma NBR 7190 (2011). ....	37
4.4.1.1 Parâmetros de Resistência .....	37
4.4.1.2 Parâmetros de Rigidez .....	42
4.4.1.2 Parâmetros Geométricos.....	42
4.4.1.3 Condições de alinhamento das peças.....	44
4.4.1.4 Peças Comprimidas com Carga Centrada .....	45
4.4.1.5 Peças Flexocomprimidas com Carga excêntrica.....	46
4.5 LINGUAGEM UTILIZADA NO SOFTWARE .....	47
<b>5 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>49</b>
5.1 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO .....	49
5.2 CRIAÇÃO DA INTERFACE E COMPONENTES .....	55
5.3 REALIZAÇÃO DE TESTES PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE .....	55
<b>6 RESULTADO.....</b>	<b>56</b>
6.1 SOFTWARE VEM – VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS EM MADEIRA .....	56
6.2 – TESTES DE VALIDAÇÃO DO SOFTWARE .....	69
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE A – EXEMPLOS PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE .....</b>	<b>75</b>

<b>APÊNDICE B– SOFTWARE VEM – CÓDIGO DE IMPLEMENTAÇÃO DO ROTEIRO DE CÁLCULO .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE C– SOFTWARE VEM – VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS EM MADEIRA .....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o uso de técnicas construtivas inadequadas fez com que as construções em madeira se tornassem sinônimos de sub-habitação ou de pouca durabilidade.

Atualmente com a fixação da cultura sustentável, a utilização de madeira nas construções está sendo revista e começa a ganhar espaço no setor, uma vez que este material passou a ser visto principalmente após a conferência mundial Rio-92, como um fator importante para o desenvolvimento sustentável (MEIRELLES, 2007).

Além do apelo sustentável, a madeira é um material versátil, possibilitando emendas simples, ligações precisas e permite combinar soluções estruturais e arquitetônicas com beleza, conforto e segurança (PETRUCCI, 1998). Quando comparada ao concreto e ao aço, possui produção com baixo consumo energético, é mais leve e apresenta maior facilidade de usinagem (NICOLAS, 2001).

A partir da importância que este material voltou a possuir no cenário atual da construção civil, torna-se necessário uma normatização eficiente e segura dos métodos de dimensionamento das estruturas construídas em madeira. No Brasil, a NBR 7190 exerce tal função, sua versão atual foi publicada em 1997, a qual passou a adotar o método semiprobabilístico dos estados limites para verificação da segurança estrutural (MIOTTO, 2003). Além disso, novos critérios foram introduzidos na revisão de 1997, a citar: conceitos de excentricidade acidental mínima, consideração da fluência da madeira e amplificação de excentricidades.

Logo que publicada, Miotto (2003) comenta que surgiram muitas críticas ao método de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas, essas críticas eram devidas basicamente às descontinuidades nos diagramas de resistência x esbeltez e a complexidade de algumas expressões. A partir de estudos realizados a cerca do tema por autores como Baraldi e Logsdon (1998), Cordovil (1998), Santos et. al. (2002) e Miotto (2003), em 2011 formulou-se a proposta de norma da NBR 7190.

Visando facilitar a aplicação do método de dimensionamento, os softwares surgem como uma ferramenta poderosa que torna o trabalho de dimensionar mais ágil. Além de auxiliar o profissional, as ferramentas digitais auxiliam o desenvolvimento acadêmico uma vez que o uso de tecnologias na educação

possibilitam processos educacionais mais iterativos, colaborando para o desenvolvimento de princípios como a motivação, participação e fixação dos conteúdos, que são essenciais no processo de aprendizagem (SILVA, et. al., 2007).

Até a formulação do projeto de norma da NBR 7190, softwares para dimensionamento de peças comprimidas e flexocomprimidas foram desenvolvidos com base na versão de 1997.

Neste contexto, devido à importância das ferramentas digitais e a necessidade de criar softwares que contemplem as alterações apresentadas no projeto de norma da NBR 7190, este trabalho possui como objetivo principal desenvolver um software para dimensionamento de pilares em madeira com seção maciça, submetidos à compressão ou à flexocompressão de acordo com o projeto de norma da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um software para dimensionamento de pilares em madeira com seção maciça, submetidos à compressão ou à flexocompressão de acordo com o projeto de norma da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento estrutural de peças de madeira submetidas à compressão e flexocompressão;
- Estudar o modelo de cálculo proposto pela norma brasileira de 1997 e pelo projeto de norma de 2011;
- Escrever um código computacional para realizar o dimensionamento de pilares em madeira segundo o projeto de norma da NBR 7190 (2011);
- Desenvolver interface gráfica entre usuário e código e manual para uso;
- Comparar resultados obtidos com exemplos teóricos.

### 3 JUSTIFICATIVA

Logo que publicada a primeira revisão da NBR 7190 em 1997 pesquisadores já evidenciaram falhas no método de dimensionamento de peças comprimidas e flexocomprimidas, como afirma Miotto (2003). Ainda assim, a formulação de um novo projeto de norma foi ocorrer apenas em 2011, desta maneira o método apresentado na versão de 1997 foi utilizado até pouco tempo atrás.

Neste período foram desenvolvidos softwares para verificação de elementos comprimidos e flexocomprimidos de acordo com a NBR 7190 (1997). Devido às adequações realizadas no projeto de norma torna-se necessária a criação de novos softwares que contemplem as alterações realizadas.

Outro aspecto importante é a vertente educacional. O uso de ferramentas digitais no processo de aprendizagem possibilita um desenvolvimento mais dinâmico, incentivando princípios como a motivação, participação, internalização de conteúdos, que são essenciais no processo de aprendizagem (SILVA, et. al., 2007).

Neste contexto, este trabalho é significativo uma vez que irá contribuir no desenvolvimento de uma nova ferramenta para o dimensionamento de pilares em madeira com seção maciça, submetidos à compressão ou à flexocompressão de acordo com o projeto de norma ABNT NBR 7190 (2011) e conseqüentemente auxiliar o desenvolvimento de atividades acadêmicas ligadas ao tema.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção apresentam-se tópicos relevantes para o desenvolvimento do trabalho, dentre eles tem-se o comportamento estrutural de elementos comprimidos e flexocomprimidos, os métodos para dimensionamento de elementos submetidos à compressão e a flexocompressão de acordo com o Projeto de Norma da NBR 7190 (2011) e por fim é apresentada a linguagem utilizada para o desenvolvimento do software.

### 4.1 CONSTRUÇÕES EM MADEIRA

De acordo com Hoffmann e Pelegrini (2009), desde a pré-história o homem vem utilizando a madeira para construir seu abrigo. A utilização deste material varia muito em cada sociedade, uma vez que o desenvolvimento de métodos para seu uso depende de fatores como o clima, o terreno e as espécies de árvores disponíveis.

Na China, os primeiros registros de construções em madeira datam do período de 960 - 1270, durante a dinastia Sung. Neste período a construção chinesa utilizava elementos de vigas e pilares com ligações por encaixes, e apresentavam uma grande precisão geométrica (MEIRELLES, 2007). No continente Europeu, os primeiros registros de estruturas em madeira datam de 120 000 – 40 000 a.C., nesta época o homem primitivo utilizava de galhos de árvore entrelaçados cobertos por vegetação para construir seu abrigo (HANDBOOK 1, 2008).



**Figura 1 - Abrigo construído pelo homem primitivo (120 000 - 40 000 a.C.)  
Fonte: Handbook 1 – Timber Structures (2008).**

No Brasil, a utilização deste recurso para construções se deu com as comunidades indígenas, cujas edificações rústicas e primitivas causavam um impacto insignificante na paisagem do país. Com a chegada dos portugueses e a ocupação territorial as consequências da exploração da madeira se modificaram drasticamente. A arquitetura das construções era europeia, já as técnicas construtivas em madeira e o vasto conhecimento das possibilidades do material eram indígenas (HOFFMANN;PELEGRINI, 2009).

O uso de técnicas construtivas inadequadas fez com que as construções em madeira se tornassem sinônimos de sub-habitação ou de pouca durabilidade no Brasil. Porém, com a fixação da cultura sustentável, a utilização de madeira nas construções está sendo revista e começa a ganhar espaço no setor, uma vez que este material passou a ser visto principalmente após a conferência mundial Rio-92, como um fator importante para o desenvolvimento sustentável (MEIRELLES, 2007).

Além do apelo sustentável, a madeira é um material versátil, possibilitando emendas simples, ligações precisas e permite combinar soluções estruturais e arquitetônicas com beleza, conforto e segurança (PETRUCCI, 1998). Quando comparada ao concreto e ao aço, possui produção com baixo consumo energético, é mais leve e apresenta maior facilidade de usinagem (NICOLAS, 2001).

Não bastasse seu desempenho satisfatório quando usada isoladamente, a madeira possui grande aplicabilidade quando utilizada juntamente com outros materiais, como o concreto. As estruturas mistas de concreto e madeira são empregadas em construções novas como pontes, pisos e coberturas residenciais, plataformas e passarelas e também na recuperação de obras antigas apresentando funcionamento satisfatório (NICOLAS, 2001).

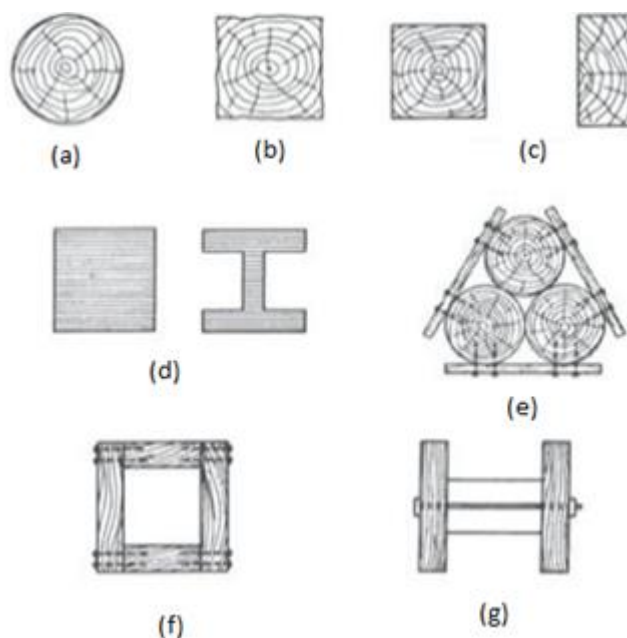
Por fim, fica evidente a aplicabilidade deste material, o qual pode ser utilizado “na forma de treliças para coberturas, pilares para pontes, postes, cimbramentos, esteios ou outros casos” (MIOTTO, 2003, p. 1), sendo frequente o caso de peças de madeiras expostas a esforços de compressão ou flexocompressão, principalmente os pilares de madeira, o qual será abordado na próxima seção.

## 4.2 PILARES DE MADEIRA

As peças comprimidas são aquelas encontradas em sistemas de contraventamento, em componentes de treliças, além de colunas e pilares isolados ou que pertencem a pórticos, no caso em estudo tem-se os pilares de madeira.

Estas peças podem estar submetidas à compressão simples ou à flexocompressão quando há aplicação de carga com excentricidade ou há a ação de um momento fletor devido às cargas transversais que atuam em combinação com as cargas de compressão axial (PFEIL; PFEIL, 2003).

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003) os pilares de madeira podem ser encontrados com seção simples ou com seção composta. Os de seção simples são formados geralmente por madeira roliça (a), ou madeira lavrada (b), madeira serrada (c), ou ainda por madeira laminada colada (d). Já as de seção composta podem ser formadas por seção composta de peças roliças (e), seção composta de peças serradas com ligação contínua (f) ou ainda por seção composta de peças serradas ligadas por peças intermediárias descontínuas (g), como se pode observar na figura 2.



**Figura 2 - Seções transversais de peças comprimidas. Madeira roliça (a), ou madeira lavrada (b), madeira serrada (c), madeira laminada colada (d), seção composta de peças roliças (e), seção composta de peças serradas com ligação contínua (f) e seção composta de peças serradas ligadas por peças intermediárias descontínuas (g)**  
 Fonte: Adaptado de PFEIL e PFEIL, 2003.

Os pilares formados por seção simples são aqueles que possuem a seção transversal maciça ao longo de sua altura, seu uso possui como restrição, no caso da madeira roliça, madeira lavrada e madeira serrada, as dimensões limitadas das seções comercialmente disponíveis (SZÜCS et. al., 2008).

A residência apresentada na figura 3, que possui 162m<sup>2</sup> e fica localizada em Santo Antônio do Pinhal (SP), foi construída totalmente em toras de madeira de pínus, as quais passaram por um tratamento preservante em autoclave, o qual confere resistência e proteção contra fungos e insetos. A construção é sustentada por pilares de madeira de pínus que possuem em média 12,5 cm de espessura (DUARTE, 2010).



**Figura 3 - Residência sustentada por pilares de madeira pínus**  
Fonte: Revista construir mais por menos disponível no Portal Casa e Cia.<sup>1</sup>

Já os pilares de seção composta podem ser formados por elementos justapostos solidarizados continuamente ou por elementos com ligações descontínuos (PFEIL; PFEIL 2003). “A união entre as peças pode ser feita pelo uso de adesivo adequado ou por dispositivos de ligação tais como cavilhas, pinos metálicos (parafusos ou pregos) e conectores (anéis metálicos)” (SZÜCS et. al., 2008, p. 120).

De acordo com Araújo (2003), os elementos contínuos são aqueles nos quais o contato entre as peças ocorre em todo o seu comprimento, já os descontínuos possuem peças interpostas ou por chapas laterais apenas em alguns pontos da estrutura.

<sup>1</sup> Disponível em: <http://construirmaispormenos.uol.com.br/escm/economia-obra/10/artigo226932-1.asp>> Acesso em mai. 2016.

A figura 4 apresenta um pilar com espaçadores interpostos em residência em São Luiz do Purunã (PR).



**Figura 4 - Pilar elementos com ligação descontínua**  
Fonte: FOGAÇA; REIS (2014).

#### 4.2 TEORIA DA FLAMBAGEM PARA ELEMENTOS COMPRIMIDOS

Os elementos estruturais compridos e esbeltos sob a ação de uma força de compressão podem ser denominados colunas, já a instabilidade lateral que ocorre devido à aplicação de compressão axial denomina-se flambagem (HIBBELER, 2010). Um elemento estrutural na iminência de sofrer instabilidade lateral está submetido a uma carga axial máxima denominada Carga Crítica ( $P_{cr}$ ).

De acordo com Miotto (2003), a primeira pessoa a verificar o fenômeno da flambagem foi P. Van Musschenbroek em 1729 por meio da realização de experimentos. Mas foi em 1744, que o Matemático suíço Leonhard Euler, foi o primeiro a resolver problemas deste tipo, quando apresentou pela primeira vez um estudo teórico sobre linhas elásticas.

Para a determinação da carga crítica foram feitas algumas considerações, como apresenta Hibbeler (2010):

- A coluna a ser considerada é perfeitamente reta antes da aplicação carga;
- O material utilizado na fabricação da coluna é um material homogêneo;
- A carga é aplicada no centroide da seção transversal;

- O material comporta-se de maneira linear-elástica;
- Por fim, a coluna sofre flambagem em um único plano.

A partir destas considerações, surge o conceito de coluna ideal, a qual satisfaz todas as considerações anteriores e é utilizada para a determinação da carga crítica. Segundo Hibbeler (2010, p. 479) “o fato de a coluna continuar estável ou torna-se instável quando sujeita a uma carga axial dependerá de sua capacidade de restauração, que é baseada em sua resistência à flexão”.

Desta forma, para calcular a carga crítica e a configuração deslocada da coluna quando deformada, aplica-se a equação (1), a qual relaciona o momento interno na coluna com sua forma defletida, e é obtida dos conceitos utilizados na resolução de problemas de instabilidade, considerando que a inclinação da curva elástica seja pequena:

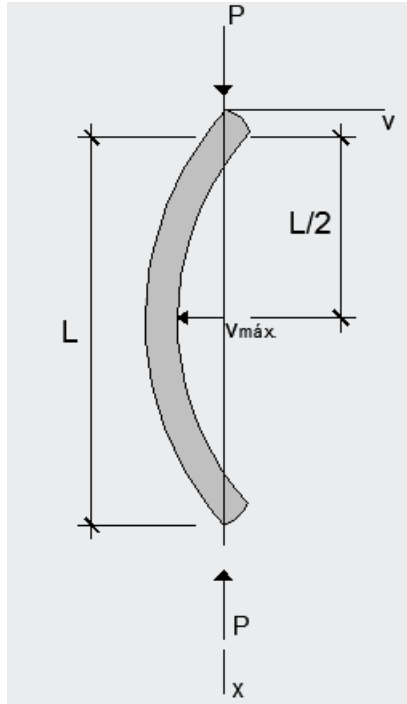
$$EI \frac{d^2\vartheta}{dx^2} = M \quad (1)$$

O momento interno pode ser determinado pelo método das seções, assim como feito por Hibbeler (2010), com base na figura 5, sendo este momento igual a  $M = -P\vartheta$ , assim a equação (1) se tornará:

$$EI \frac{d^2\vartheta}{dx^2} = -P\vartheta$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \left(\frac{P}{EI}\right)\vartheta = 0 \quad (2)$$





**Figura 5- Diagrama de corpo livre de um seguimento na posição defletida**

Fonte: Adaptado de HIBBELER, 2010.

A equação 2 é uma equação diferencial linear homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes, que pelo método das equações diferenciais possui como solução:

$$v = C_1 \operatorname{sen} \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} x \right) + C_2 \cos \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} x \right) \quad (3)$$

As duas constantes de integração são determinadas pelas condições de contorno nas extremidades da coluna. Visto que  $v = 0$  em  $x = 0$ , então  $C_2 = 0$  e  $v = 0$  em  $x = L$ , então:

$$C_1 \operatorname{sen} \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} L \right) = 0$$

Essa equação é satisfeita quando  $C_1 = 0$ , mas se  $C_1$  é igual à zero,  $v = 0$ , o que é uma solução trivial, e que só seria possível se a coluna permanecesse sempre reta, desta maneira outra solução é:

$$\operatorname{sen} \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} L \right) = 0$$

Esta equação é satisfeita se:

$$\left( \sqrt{\frac{P}{EI}} L \right) = n\pi$$

Ou

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \text{ com } n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

O menor valor de P é obtido quando n é igual a 1 (um). Assim, obtém-se para a carga crítica, também denominada de carga de Euler, a seguinte equação:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (5)$$

Onde:

$P_{cr}$  é a carga crítica ou força axial máxima no elemento imediatamente antes do início da flambagem.

$E$  é o módulo de elasticidade para o material.

$I$  é o menor momento de inércia para a área da seção transversal do elemento.

$L$  é o comprimento do elemento sem apoio, cujas extremidades estejam presas por pinos.

De acordo com Hibbeler (2010), a equação (5) pode ser escrita de uma maneira mais útil para a finalidade de projeto, se a inércia for expressa em termos de área de seção transversal (A) e de raio de giração da área da seção transversal (i). Desta maneira tem-se:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E (Ai^2)}{L^2}$$

$$\left( \frac{P}{A} \right)_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/i)^2}$$

Escrevendo em termo de tensão crítica, tem-se:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/i)^2} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_{cr}$  é a tensão crítica, que é a tensão média na coluna imediatamente antes da flambagem. Essa tensão é elástica, desta forma,  $\sigma_{cr} \leq \sigma_e$ , considerando  $\sigma_e$  a tensão limite elástica do material.

$E$  é o módulo de elasticidade para o material.

$i$  é o raio de giração da coluna e é determinado por  $i = \sqrt{I/A}$ , onde  $I$  é o menor momento de inércia da área da seção transversal do elemento estrutural, desde que mantido o mesmo comprimento de flambagem em todas as direções.

$L$  é o comprimento de flambagem.

A relação geométrica  $L/i$  na equação (6) chama-se índice de esbeltez, que consiste em uma medida da flexibilidade da coluna e serve para classificar as colunas em esbeltas, intermediárias ou curtas (HIBBELER, 2010).

De acordo com Hibbeler (2010) o entendimento de que uma coluna sofrerá instabilidade lateral em torno do eixo principal da seção transversal que tenha menor momento de inércia, desde que mantido o mesmo comprimento de flambagem em todas as direções, é de extrema importância, pois permite que o engenheiro busque um equilíbrio mantendo os mesmos momentos de inércia em todas as direções. Desta maneira, as seções transversais circulares e as quadradas, a primeira mais que a segunda, são ótimas colunas uma vez que os momentos de inércia em  $x$  e em  $y$  são iguais.

#### 4.2.1 Flambagem em pilares com tipos diferentes de vinculações.

As equações deduzidas anteriormente possuem como uma das restrições o fato das extremidades da coluna ideal serem vinculadas por pinos, ou seja, permitirem o giro. Porém, muitas vezes as colunas podem ser vinculadas de modos diferentes do considerado anteriormente.

Na equação (6),  $L$  representa a distância sem apoio entre os pontos de inflexão da linha elástica (HIBBELER, 2010). Caso a coluna tenha suas extremidades vinculadas de outro modo, o valor de  $L$  deverá ser aquele que

represente a distância entre os pontos de momento nulo. Desta maneira, esta distância recebe o nome de Comprimento Efetivo ( $L_{ef}$ ).

Para facilitar o cálculo da carga crítica, Hibbeler (2010) apresenta o fator de comprimento efetivo ( $K$ ), o qual é um coeficiente adimensional utilizado por normas e manuais, sendo que o comprimento efetivo ( $L_{ef}$ ) é definido por:

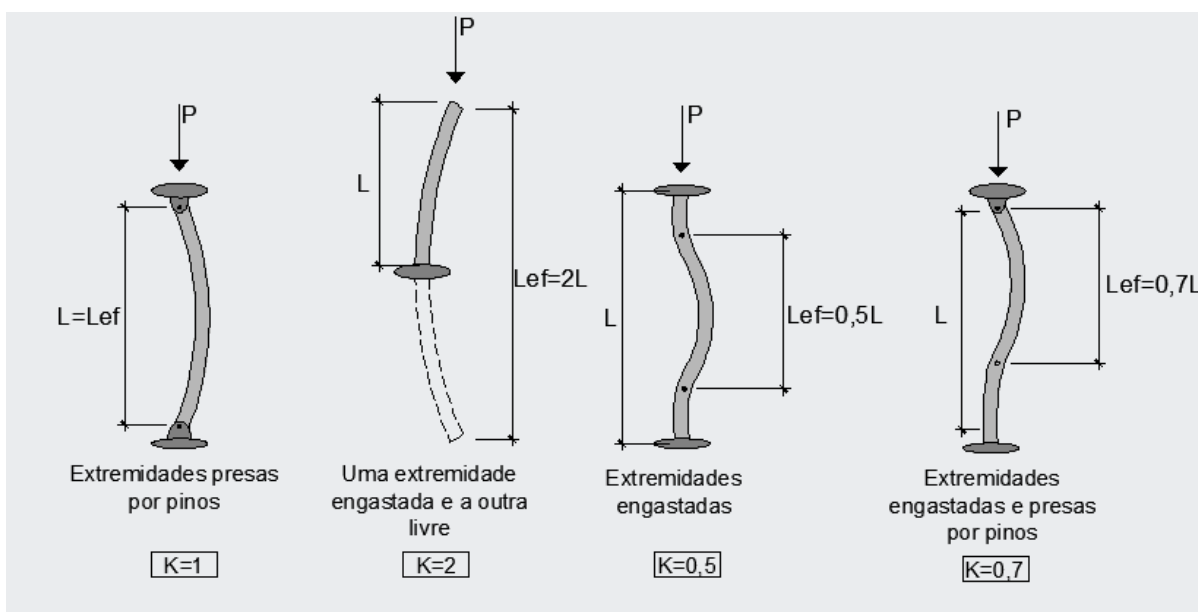
$$L_{ef} = KL \quad (7)$$

Assim, pode-se rescrever as equações (5) e (6) introduzindo este fator:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (9)$$

Hibbeler (2010) apresenta a figura 6 com valores teóricos para o fator de comprimento efetivo.



**Figura 6 - Valores dos coeficientes  $K$**   
**Fonte: Adaptado de HIBBELER (2010).**

Na NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011), o coeficiente apresentado por Hibbeler (2010) recebe a notação  $K_E$  ao invés de apenas  $K$ .

### 4.3 TEORIA DA FLAMBAGEM PARA ELEMENTOS FLEXOCOMPRESOS

A fórmula de Euler foi desenvolvida considerando-se que a carga  $P$  era sempre aplicada no centroide da área da seção transversal da coluna e que a coluna é perfeitamente reta, o que dificilmente se encontra na prática, uma vez que as colunas fabricadas nunca são perfeitamente retas e em geral não se conhece a aplicação da carga com precisão (HIBBELER, 2010).

Para estudar o caso em que as colunas não são perfeitamente retas e não se conhece o local exato da aplicação da carga, aplicou-se a carga  $P$  à coluna a uma curta distância excêntrica “ $e$ ” em relação ao centroide da seção transversal, como apresenta a figura 7 (HIBBELER, 2010).

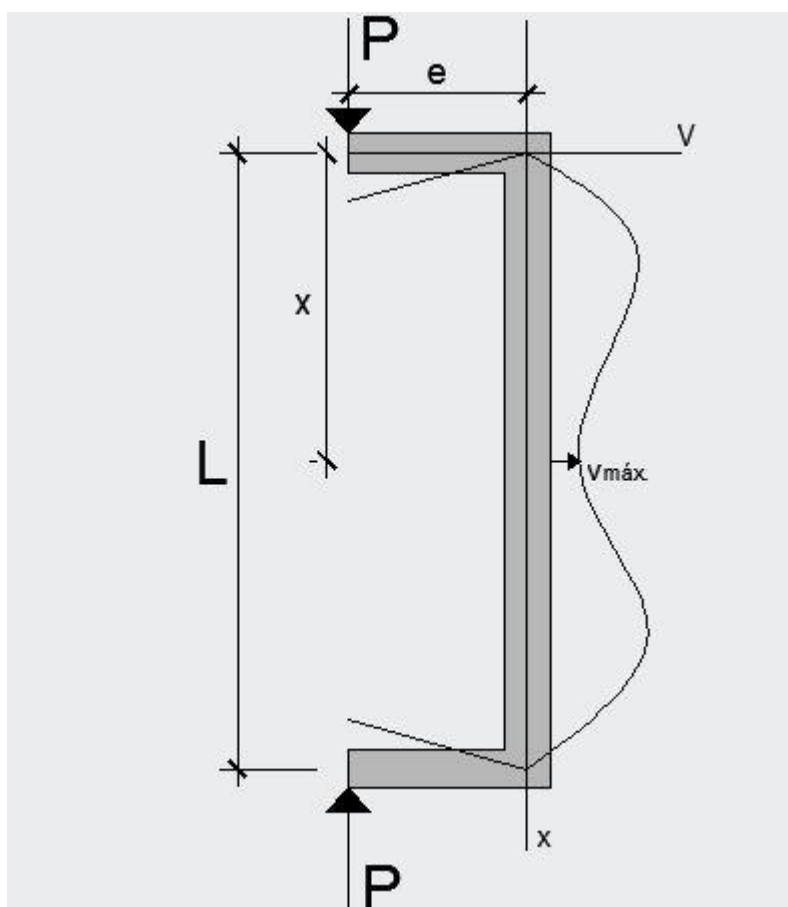


Figura 7 - Coluna submetida à carga excêntrica  
Fonte: Adaptado de HIBBELER (2010).

De acordo com Hibbeler (2010), pelo diagrama de corpo livre da seção arbitrária (figura 8) o momento interno na coluna é:

$$M = -P(e + v) \quad (10)$$

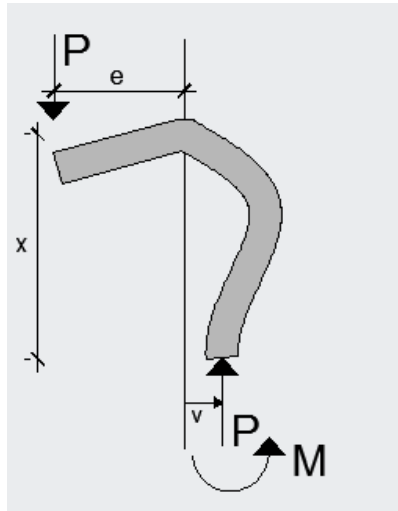


Figura 8 - Diagrama de corpo livre da seção arbitrária  
Fonte: Adaptado de HIBBELER (2010).

A equação diferencial para curva de deflexão é:

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = -P(e + v) \quad (11)$$

A partir da resolução desta equação diferencial linear homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes obtém-se a curva de deflexão:

$$v = e \left[ \tan \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} \frac{L}{2} \right) * \sin \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} x \right) + \cos \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} x \right) - 1 \right] \quad (12)$$

Segundo Hibbeler (2010), como as cargas são simétricas, a deflexão máxima e a tensão máxima ocorrem no ponto médio da coluna, desta maneira quando  $x=L/2$ ,  $v = v_{máx}$ . Assim, tem-se a equação 13:

$$v_{máx} = e \left[ \sec \left( \sqrt{\frac{P}{EI}} \frac{L}{2} \right) - 1 \right] \quad (13)$$

De acordo com Hibbeler (2010, p. 493):

“Se  $e$  tender a zero, então  $v_{m\acute{a}x}$  tende a zero. Todavia, se os termos entre colchetes tenderem a infinito quando  $e$  tender a zero, então  $v_{m\acute{a}x}$  terá um valor não nulo. Em termos matemáticos, isso representaria o comportamento de uma coluna com carga axial no momento da falha quando sujeita à carga crítica  $P_{cr}$ .”

Assim, para determinar  $P_{cr}$  é necessário que:

$$\left[ \sec \left( \sqrt{\frac{P_{cr} L}{EI}} \right) \right] = \infty$$

$$\left( \sqrt{\frac{P_{cr} L}{EI}} \right) = \frac{\pi}{2}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (14)$$

A tensão máxima na coluna é provocada pela carga axial e também pelo momento (figura 9 (a)). Como visto anteriormente, o momento máximo ocorre no ponto médio da coluna e seu valor é dado pelas equações 15 e 16:

$$M = |P(e + v_{m\acute{a}x.})| \quad (15)$$

$$M = Pe \left[ \sec \left( \sqrt{\frac{P L}{EI}} \right) \right] \quad (16)$$

Como apresenta a figura 9 (b), a tensão máxima na coluna é de compressão e seu valor é:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P}{A} + \frac{M_c}{I}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P}{A} + \frac{Pec}{I} \sec \left( \sqrt{\frac{P L}{EI}} \right) \quad (17)$$

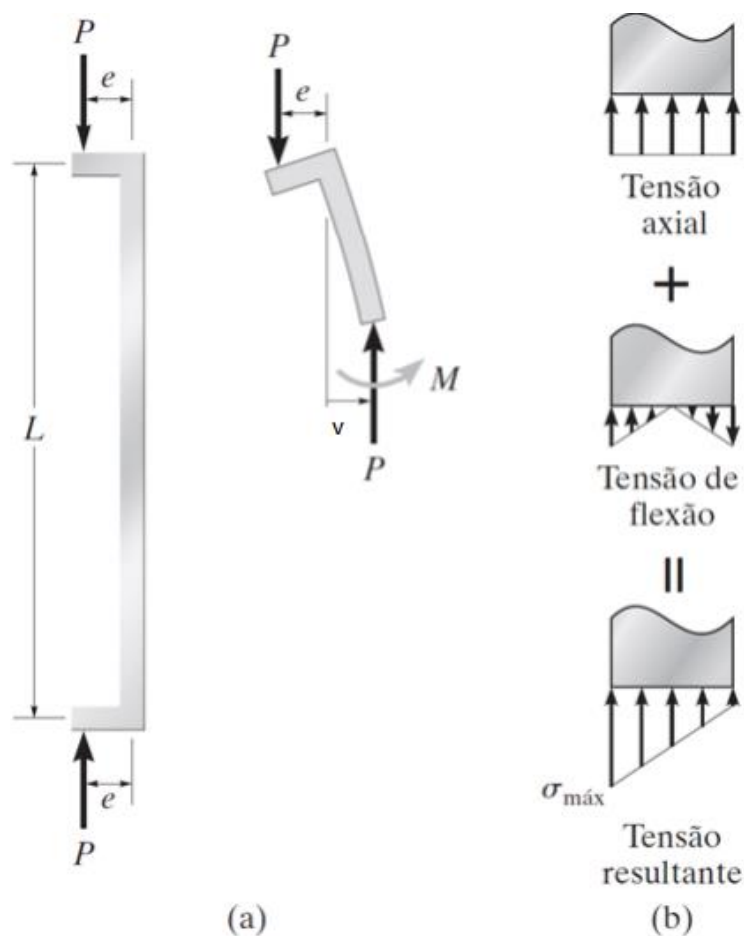


Figura 9 – Diagrama de corpo livre (a) e diagramas de tensões (b)  
Fonte: HIBBELER (2010).

Sendo o raio de giração definido por  $i = \sqrt{I/A}$ , a equação acima pode ser escrita em uma forma denominada **fórmula da secante**:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P}{A} \left[ 1 + \frac{ec}{r^2} \sec \left( \frac{L}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right] \quad (18)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  é a tensão elástica máxima na coluna, que ocorre no interior do lado côncavo no ponto médio da coluna. Essa tensão é de compressão;

$P$  é a carga vertical aplicada à coluna.  $P < P_{cr}$  a menos que  $e = 0$ , então  $P = P_{cr}$ ;



$e$  é a excentricidade da carga  $P$ , medida do eixo neutro da área da seção transversal da coluna até a linha de ação de  $P$ ;

$c$  é a distância do eixo neutro até a fibra externa da coluna onde ocorre a tensão de compressão máxima  $\sigma_{m\acute{a}x}$ ;

$A$  é a área da seção transversal da coluna;

$L$  é o comprimento não apoiado da coluna no plano de flexão;

$E$  é o módulo de elasticidade para o material;

$i$  é o raio de giração,  $i = \sqrt{I/A}$ , onde  $I$  é calculado em torno do eixo neutro ou de flexão.

De acordo com Hibbeler (2010), a fórmula da secante indica que há uma relação não linear entre a carga e a tensão. Desta maneira, o princípio da superposição não é aplicável e, portanto, as cargas têm de ser somadas antes de determinar a tensão, além disso, qualquer fator de segurança usado para a finalidade de projeto aplica-se à carga, e não à tensão.

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE MADEIRA COM SEÇÃO MACIÇA

De acordo com Miotto (2003) pilares de seção simples são aqueles formados por uma única peça. No Brasil, a NBR 7190 traz especificações para dimensionamento de elementos estruturais com esta característica e que estão submetidos a ações de compressão e flexocompressão.

A primeira norma brasileira desenvolvida para o cálculo das estruturas de madeira foi a "NB 11/51 - Cálculo e execução de estruturas de madeira" em 1951 que se fundamentava no método determinístico das tensões admissíveis, e a qual serviu de base para a publicação da NBR 7190 em 1982, sendo esta idêntica à NB 11/51. Em 1997, a NBR 7190 passou a adotar o método semiprobabilístico dos estados limites para verificação da segurança estrutural, sendo que esta versão está em vigor atualmente (MIOTTO, 2003).

Além da adoção do método semiprobabilístico dos estados limites para a verificação da segurança estrutural, novos critérios foram introduzidos na revisão de

1997, a citar: conceitos de excentricidade accidental mínima, consideração da fluência da madeira e amplificação de excentricidades.

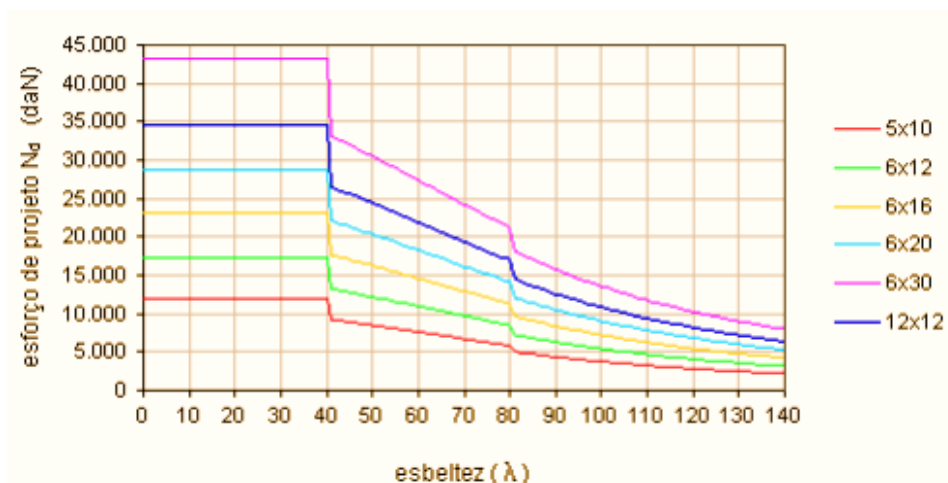
Logo que publicada, Miotto (2003) comenta que surgiram muitas críticas ao método de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas, essas críticas eram devidas a dois pontos basicamente:

1. Descontinuidades nos diagramas de resistência x esbeltez;
2. Complexidade de algumas expressões.

Miotto (2003) explica que o fato de o critério de dimensionamento considerar as excentricidades e a fluência de forma diferenciada para cada faixa de esbeltez, causa degraus no diagrama representativo da resistência de cálculo em função da esbeltez da peça.

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), as excentricidades são consideradas em virtude das imperfeições geométricas das peças e das excentricidades inevitáveis dos carregamentos. Já a fluência representa um acréscimo nas excentricidades de peças esbeltas (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Segundo Alvim e Veloso (2002) a fluência é o processo pelo qual certo material apresenta um aumento gradual das deformações ao longo do tempo quando submetido a um carregamento constante. O modelo de fluência da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) utiliza a teoria linear de fluência que independe da tensão aplicada, porém para que essa hipótese seja válida, é necessário que as tensões na madeira sejam baixas (ALVIM; VELOSO, 2002).

Segundo Miotto e Dias (2006) autores como Baraldi e Logsdon (1998), Cordovil (1998) e Santos et. al. (2002) encontraram problemas de descontinuidade abrupta no diagrama de variação da resistência de cálculo de acordo com diferentes índices de esbeltez. A figura 10 mostra estas descontinuidades para peças de seção transversal retangular simples e madeira folhosa classe C60.



**Figura 10 - Curvas de resistência à compressão segundo os critérios da NBR 7190/97**  
**Fonte: MIOTTO; DIAS (2006).**

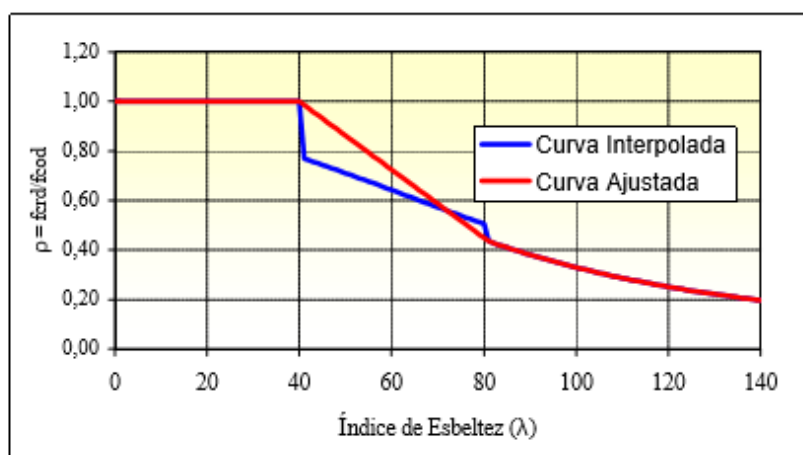
Baraldi e Logsdon (1998) realizaram uma comparação entre o método de dimensionamento da versão de 1997 e o método da versão de 1982, encontrando principalmente dois problemas.

O primeiro problema, segundo os autores, são as descontinuidades abruptas na transição entre as peças curtas e as medianamente esbeltas quando aplicado o método da NBR 7190 (1997) no diagrama de força x esbelteza. Já o segundo é a incompatibilidade da hipótese adotada na transição entre os tipos de peça quando se deseja obter um dimensionamento da seção mínima necessária para um elemento estrutural utilizando a NBR 7190 (1997).

Ao analisar o método de dimensionamento de peças comprimidas da NBR 7190 (1997), Cordovil (1998) destaca alguns aspectos que poderiam ser melhorados, entre eles, a importância de considerar a excentricidade mínima devido às imperfeições geométricas para as peças curtas e o fato de a esbelteza ser condicionada apenas ao raio de giro mínimo, pois há situações de projeto em que pode ocorrer um contraventamento que impeça a flambagem em torno do eixo de menor inércia. Em relação à descontinuidade entre as peças curtas e medianamente esbeltas ( $\lambda=40$ ), o autor propõe que as peças curtas, com carregamento centrado na condição de projeto, sejam verificadas de acordo com os mesmos critérios das peças medianamente esbeltas.

De acordo com Santos et. al. (2002) os novos critérios introduzidos na revisão de 1997 tornaram difícil avaliar analiticamente a resistência à compressão paralela às fibras de uma barra, desta forma o dimensionamento só se torna

possível por meio de uma série de tentativas que podem transformar o simples cálculo de um pilar em uma tarefa longa e cansativa. Em seu trabalho os autores propõem um método para corrigir as discontinuidades geradas nas curvas de resistência segundo as recomendações da NBR 7190 (1997), ilustrado na figura 11.



**Figura 11 - Ajuste da curva de resistência à compressão para peças de seção retangular em madeira folhosa nas classes de umidade 1 e 2**  
**Fonte: SANTOS et. al. (2002).**

O método proposto consiste em, a partir das curvas de resistência à compressão para barras de seção retangular em madeira folhosa nas classes de umidade 1 e 2, criar um parâmetro para a resistência ( $\rho$ ) quando a esbeltez for maior que 40, com isso as curvas para as peças em madeira folhosa C20, C30, C40 E C60, tornam-se coincidentes. Desta maneira, com um erro máximo de 5,5% é possível interpolar uma curva para substituir todas elas.

As discontinuidades podem ser eliminadas ajustando a reta que descreve o comportamento das barras medianamente esbeltas, esse ajuste é feito igualando o ponto final do trecho horizontal com o início da curva válida para as peças esbeltas. Conhecido o parâmetro  $\rho$  a resistência de cálculo à compressão pode ser calculada por:

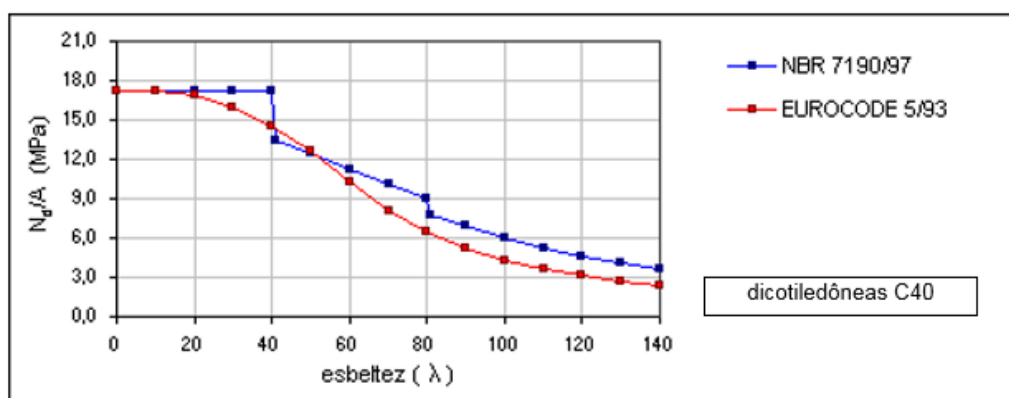
$$R_d = A * \rho * f_{c0,d} \quad (19)$$

Nas simulações numéricas efetuadas pelos autores, os resultados alcançados mostram um ganho de resistência para as peças com esbeltez imediatamente superior a 40 de cerca de 24% em relação a NBR 7190/97, “o que era previsível, uma vez que a curva ajustada não apresenta a perda de resistência

que caracteriza as curvas obtidas com os critérios da norma” (SANTOS et al., 2002, p. 9).

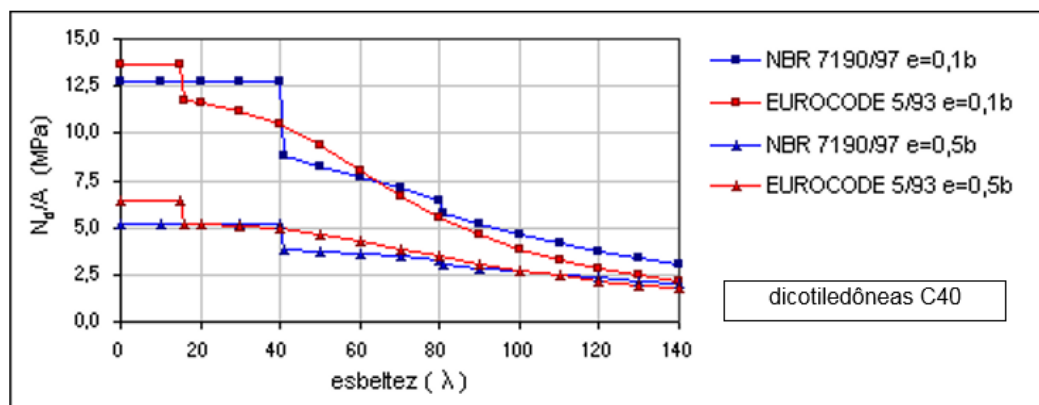
Miotto (2003) em sua dissertação de mestrado, através do cálculo de peças com seção transversal e vinculações frequentes nos projetos estruturais de madeira e sujeitas às solicitações de compressão e flexocompressão, aferiu o modelo da norma brasileira, confrontando os resultados alcançados e a objetividade do método adotado pela norma brasileira com os métodos utilizados por normas internacionais como a DIN 1052 (1988) (norma alemã), AS 1720.1 (1997) (norma australiana), CSA 086.1-94 (1989) (norma canadense), EUROCODE 5 (1993) (norma da Comunidade Europeia), NDS (1991) e AF&PA/ASCE 16-95 (1996) (normas norte americanas).

Ao confrontar a norma brasileira com a norma da Comunidade Europeia para o caso de peças comprimidas com carga centrada, por exemplo, Miotto (2003) obteve os diagramas para as folhosas da classe C40 indicados na figura 12.



**Figura 12 - Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97 para folhosas de classe C40 submetidas à compressão centrada**  
**Fonte: MIOTTO (2003).**

A figura 13 mostra os resultados de simulações teóricas para peças flexocomprimidas, utilizando a NBR 7190 (1997) e o EUROCODE 5 (1993).



**Figura 13 - Comparação entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97 para folhosas de classe C40 submetidas à flexocompressão**  
**Fonte: MIOTTO (2003).**

Observando os diagramas acima se notam as descontinuidades comentadas anteriormente justamente quando há mudança de peças curtas para peças medianamente esbeltas e destas para as esbeltas. Para as peças comprimidas Miotto (2003) observa que o EUROCODE 5 (1993) é demasiadamente conservador quando comparado à norma brasileira, uma vez que apenas “nas coníferas de classe C20, com esbelteza igual a 80, em que se manifestou um valor de  $N_d$  cerca de 106% superior àquele devido à norma europeia” (MIOTTO, 2003, p. 129).

No caso das peças flexocomprimidas, Miotto (2003) observou que nas peças sujeitas a uma excentricidade inicial equivalente a  $0,1*b$ , com “b” sendo a menor largura da seção transversal retangular, os dados obtidos com a aplicação dos critérios do EUROCODE 5/93 superam em até 7%, aproximadamente, aqueles obtidos com norma brasileira, para esbelteza menor que 15. Acima disso, dados calculados pela NBR 7190 (1997) excedem aqueles calculados pelo EUROCODE 5 (1993), em praticamente todo o intervalo analisado.

Quando se aumenta a excentricidade para  $0,5*b$ , Miotto (2003) destaca que ocorre uma alternância entre os desempenhos obtidos pelas normas brasileira e europeia. No trecho referente às peças curtas, os resultados obtidos pelo EUROCODE 5 (1993) superam em 23% os calculados pela norma brasileira tanto para as coníferas como para as folhosas, já no trecho referente às peças medianamente esbeltas a norma da comunidade europeia voltam a exceder em 24% os valores da norma brasileira para as coníferas de classe C20 e folhosas de classe C40. No restante dos trechos prevaleceu a NBR 7190 (1997) superando o EUROCODE 5 (1993).

Na verificação das peças flexocomprimidas Miotto (2003) ainda observa que o diagrama gerado pelo EUROCODE 5 (1993) apresenta descontinuidades devido a imposição de diferentes condições de verificação, conforme o índice de esbeltez, porém as recomendações da norma europeia são de fácil aplicação, diferentemente das da norma brasileira.

Desta forma, a partir de estudos realizados a cerca do tema, em 2011 formulou-se o projeto de norma da NBR 7190, a qual sugere o método de dimensionamento apresentado nas próximas seções.

4.4.1 Dimensionamento de elementos comprimidos e flexocomprimidos com seção maciça segundo o projeto de norma NBR 7190 (2011).

#### 4.4.1.1 Parâmetros de Resistência

De acordo com NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), os esforços resistentes das peças estruturais de madeira devem ser determinados com a hipótese de comportamento elastofrágil do material, isso quer dizer que o diagrama de tensão deformação é linear até a ruptura tanto na compressão quanto na tração paralela às fibras.

No caso de elementos estruturais submetidos à flexocompressão, a norma indica que os esforços resistentes podem ser calculados com a hipótese de comportamento elastoplástico da madeira na compressão paralela às fibras (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

O valor de projeto da resistência à compressão paralela às fibras é calculado pela expressão:

$$f_{c0,d} = K_{mod} \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} \quad (20)$$

Onde:

$f_{c0,d}$  é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{c0,k}$  é o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras;  
 $\gamma_w$  é coeficiente de minoração das propriedades da madeira. A NBR 7190 (2011) adota o valor de  $\gamma_w = 1,4$  para a compressão paralela às fibras;  
 $K_{mod}$  são os coeficientes de modificação relacionados com as condições de uso do material.

O valor característico da resistência à compressão é fornecido pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) por meio das tabelas 1 e 2 de acordo com a classe da madeira.

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

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

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

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

Folhosas (valores na condição padrão de referência U = 12%)				
Classes	$f_{c0k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{aparente}$ (kg/m <sup>3</sup> )
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).

Os valores de  $k_{mod}$  são obtidos pela combinação de três parcelas: uma delas que considera a classe de carregamento da estrutura ( $k_{mod1}$ ), outra que leva em conta a classe de umidade admitida ( $k_{mod2}$ ) e outra que leva em conta o critério de classificação e a quantidade de defeitos presentes nas peças ( $k_{mod3}$ ).

O quadro 1 indica valores para o coeficiente  $k_{mod1}$  em função do tipo do material e das classes de carregamento.



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 1 - 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 1, são indicados no quadro 2 a seguir.

Classes de carregamento	Exemplos
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 2 - Exemplos práticos das classes de carregamento**  
**Fonte: Adaptado Porteous e Kermani (2007).**

A tabela 3 apresenta os valores para o coeficiente  $k_{mod2}$ , o qual considera o tipo de madeira e a classe de umidade do material.

Tabela 3 - Valores do  $k_{mod2}$ 

Classes de umidade	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira roliça Madeira laminada colada Madeira compensada	
(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  $k_{mod2} = 0,65$ .

As classes de umidade estão definidas na NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) por meio da tabela 4.

Tabela 4 - 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).

Por fim, 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	0,80
	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	0,90
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 (21). Quando a peça for reta, o  $k_{mod3} = 1,0$ .

$$k_{mod3} = 1 - 2000 \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^2 \quad (21)$$

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.

#### 4.4.1.2 Parâmetros de Rigidez

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) indica que nas verificações dos estados limites últimos ou de utilização que dependem da rigidez da madeira, o módulo de elasticidade paralelamente às fibras deve ser tomado com o valor efetivo, visto que:

$$E_{c0,ef} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \cdot E_{c0,m} \quad (22)$$

O valor de  $E_{c0,m}$  é dado nas tabelas 1 e 2 dependendo da classe de resistência.

Para o cálculo da esbeltez relativa necessita-se estimar o módulo de elasticidade característico medido na direção paralela às fibras da madeira ( $E_{0,05}$ ), que segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), considerando distribuição normal de probabilidade e desvio padrão de 18%, pode ser considerado igual a:

$$E_{0,05} = 0,7E_{c0,m} \quad (23)$$

#### 4.4.1.2 Parâmetros Geométricos

De acordo com a norma brasileira, as exigências referentes ao dimensionamento dos elementos estruturais submetidos à compressão ou à flexocompressão dependem da esbeltez da peça, definida pelo seu índice de esbeltez:

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (24)$$

Onde:

$L_0$  é comprimento de flambagem;

$I$  é o momento de inércia na direção analisada;




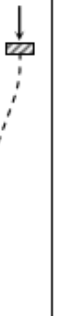







$A$  é a área da seção.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) especifica que as condições que resultem em uma menor resistência para a peça devem ser investigadas, considerando as eventuais contribuições de contraventamentos existentes nas peças nas diferentes direções. Além disso, independentemente da direção analisada, as peças sujeitas à compressão axial ou à flexocompressão não devem ter esbeltez maior que 140 (Estado Limite de Serviço).

A norma ainda define o comprimento de flambagem através da equação (25), a qual utiliza um coeficiente adimensional ( $K_E$ ), que depende das condições de vinculação das extremidades das barras.

$$L_0 = K_E L \quad (25)$$

Os valores de  $K_E$  são definidos na norma por meio da figura 14:

<b>Modos de flambagem</b>						
<b>Valores de projeto para <math>K_E</math></b>	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
<b>Código das condições de extremidade</b>		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

**Figura 14 - Valores de  $K_E$**   
**Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).**

A esbeltez relativa utilizada na verificação da estabilidade das peças flexocomprimidas é definida na norma por meio das equações (26):

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad \text{e} \quad \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (26)$$

Onde:

$\lambda_{rel,x}$  e  $\lambda_{rel,y}$  são as esbeltezes relativas correspondentes à flexão em relação aos eixos x e y, respectivamente;

$\lambda_x$  e  $\lambda_y$  representam as esbeltezes segundo os eixos x e y, respectivamente;

$E_{0,05}$  é o módulo de elasticidade medido na direção paralela às fibras da madeira;

#### 4.4.1.3 Condições de alinhamento das peças

De acordo com a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) para peças em que a instabilidade lateral pode ocorrer, o desvio no alinhamento axial da peça, medido na metade da distância entre os apoios, deverá ser limitado em:

- L/300: para peças de madeira serrada ou roliça.
- L/500: para peças de madeira laminada colada.

As peças com imperfeições geométricas maiores que os limites anteriores devem ser dimensionadas à flexocompressão.

#### 4.4.1.4 Peças Comprimidas com Carga Centrada

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) nas peças curtas comprimidas por carga centrada aplicada paralelamente às fibras a condição de segurança é expressa por:

$$\sigma_{cod} \leq f_{cod} \quad (27)$$

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) permite ignorar a influência de eventual inclinação das fibras da madeira em relação ao eixo longitudinal da peça comprimida até um ângulo  $\alpha = 6^\circ$ . Para inclinações maiores, é preciso considerar a redução de resistência, fazendo-se:  $f_{cd} \leq f_{c\alpha,d}$ , sendo que  $f_{c\alpha,d}$  pode ser calculado por:

$$f_{c\alpha} = \frac{f_{c0}f_{c90}}{f_{c0}\text{sen}^2(\alpha) + f_{c90}\text{cos}^2(\alpha)} \quad (28)$$

Em relação à verificação da condição de instabilidade da peça, para a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) quando ambos os valores de rigidez relativa  $\lambda_{rel,x}$  e  $\lambda_{rel,y}$  forem iguais ou menores do que 0,3 ( $\lambda_{rel,x} \leq 0,3$  e  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ ) a tensão deve satisfazer a condição imposta na equação 27.

Em todos os outros casos, as tensões devem satisfazer as seguintes condições:

$$\frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cx}f_{c0,d}} \leq 1 \quad \text{e} \quad \frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cy}f_{c0,d}} \leq 1 \quad (29)$$

Com:

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad \text{e} \quad k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (30)$$

Em que:

$$k_x = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2 \right] \quad \text{e} \quad k_y = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2 \right] \quad (31)$$

Nas equações acima, o fator  $\beta_c$  para peças dentro dos limites de divergência de alinhamento definidos anteriormente, assumem os valores:

- a) para madeira maciça serrada e peças roliças:  $\beta_c = 0,2$
- b) para madeira laminada colada e madeira microlaminada (LVL):  $\beta_c = 0,1$

#### 4.4.1.5 Peças Flexocomprimidas com Carga excêntrica

De acordo com a norma brasileira a condição de segurança relativa à resistência das seções transversais submetidas à flexocompressão é expressa pela mais rigorosa das duas expressões seguintes, aplicadas ao ponto mais solicitado da borda mais comprimida, considerando-se uma função quadrática para a influência das tensões devidas à força normal de compressão.

$$\left( \frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \text{e} \quad \left( \frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (32)$$

Onde:

$\sigma_{c0,d}$  é o valor de cálculo da tensão normal devida ao esforço de compressão;

$\sigma_{Mx,d}$  é a tensão máxima devida à componente de flexão atuante, segundo a direção x;



$\sigma_{My,d}$  é a tensão máxima devida à componente de flexão atuante, segundo a direção  $y$ ;

$K_M$  é o coeficiente de correção, que pode assumir os seguintes valores:  $K_M = 0,7$  para seções transversais retangulares e  $K_M = 1,0$  para as demais seções transversais.

A tensão normal devida ao esforço de compressão é definida por:

$$\sigma_{c0,d} = \frac{N_d}{A} \quad (33)$$

Onde:

$N_d$  é o valor de cálculo do esforço normal de compressão;

$A$  é a área da seção transversal.

No caso de peças com fibras inclinadas de ângulos  $\alpha = 6^\circ$ ,  $f_{c0,d}$  deve ser substituída por  $f_{c\alpha,d}$ .

Com relação à estabilidade de peças comprimidas e flexocomprimidas, quando ambos os valores de rigidez relativa  $\lambda_{rel,x}$  e  $\lambda_{rel,y}$  forem iguais ou menores do que 0,3 ( $\lambda_{rel,x} \leq 0,3$  e  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ ), então as tensões devem satisfazer às condições da flexocompressão expressa na equação 30.

Em todos os outros casos, as tensões devem satisfazer as seguintes condições:

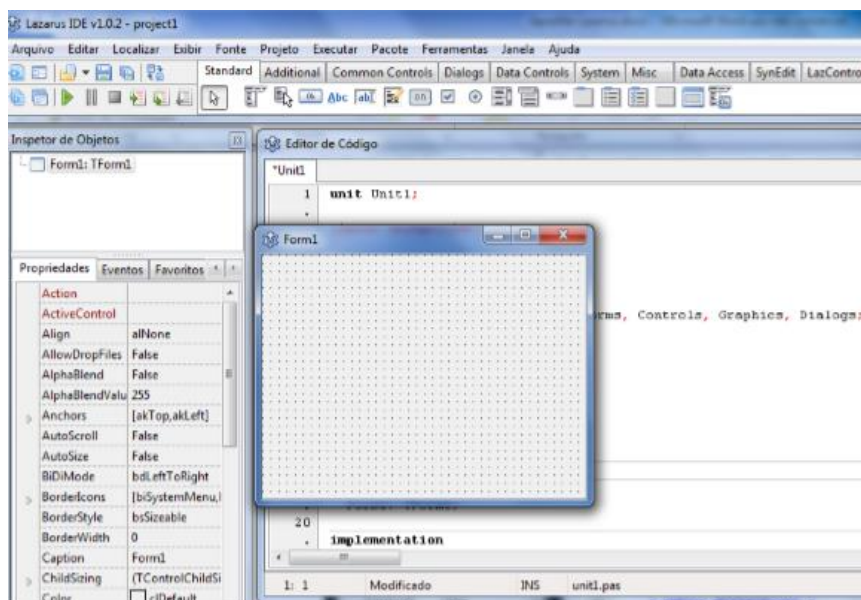
$$\frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \text{e} \quad \frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (34)$$

Os fatores  $k_{cx}$  e  $k_{cy}$  estão definidos na equação (30).

#### 4.5 LINGUAGEM UTILIZADA NO SOFTWARE

De acordo com Melo (2012), o Lazarus “é uma alternativa de código aberto (*open source*) ao Delphi®, com a grande vantagem de ser multiplataforma”. Possui como base a linguagem *Pascal* e o compilador *FreePascal*, o qual consiste em um compilador de código fonte aberto com elevada compatibilidade com Delphi e executável nos sistemas Windows, Mac e Linux.

O Lazarus, figura 15, consiste em um ambiente integrado de desenvolvimento - IDE (*Integrated Development Environment*) – o que permite editar os códigos, gerenciar os arquivos e montar os projetos (MELO, 2012).



**Figura 15 - Interface Lazarus**  
Fonte: MELO, 2012.

Atualmente funciona nos sistemas operacionais: Linux, FreeBSD, Win32 e Win64. Sua interface possui “um editor de código e um ambiente visual para criação de formulários, acompanhado de um gerenciador de pacotes, depurador de erros e uma completa integração da GUI com o compilador Free Pascal” (MELO, 2012).

## 5 DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do software foram consideradas as seguintes hipóteses:

- As peças a serem verificadas ficam restritas às condições de compressão paralela às fibras com carga centrada e à flexocompressão considerando aplicação de carga com excentricidade;
- O valor do esforço a ser inserido no software deverá ser o de cálculo, ou seja, já deverão ter sido realizadas as devidas combinações com os carregamentos aplicados;
- As condições de vinculação da estrutura serão limitadas em: Engaste-Engaste; Engaste - Apoio; Engaste - Engaste Móvel; Apoio - Apoio; Engaste - Extremidade Livre; Apoio - Engaste Móvel; Apoio - Apoio (com contraventamento no meio do comprimento) e Apoio - Apoio (com contraventamento a cada um terço do comprimento);
- Os cálculos considerarão inclinação das fibras da madeira até seis graus ( $6^\circ$ ).
- As imperfeições geométricas das estruturas deverão ser menores ou iguais aos limites apresentados no item 4.4.1.3.
- Os pilares em madeira deverão possuir seção maciça como o definido em 4.2.

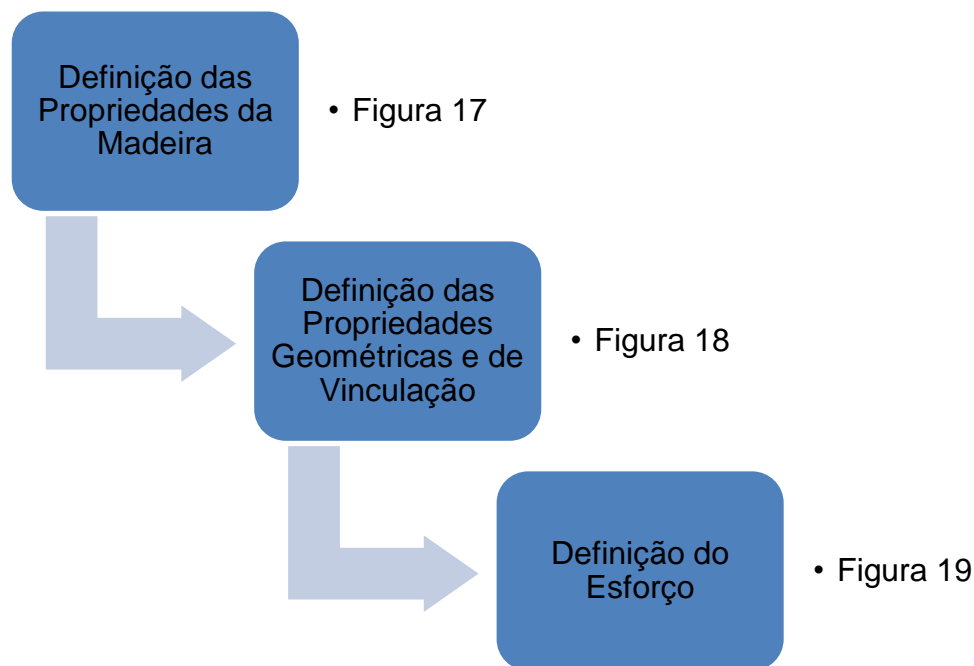
A partir destas considerações o software foi desenvolvido seguindo a lógica de programação apresentada no item 5.1.

### 5.1 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO

O funcionamento do programa consiste na entrada dos dados pelo usuário, cálculo das propriedades do material, cálculo das propriedades geométricas,

verificação do elemento à ruptura, verificação do elemento à estabilidade e por fim todos os resultados são indicados em relatório próprio.

A entrada de dados é realizada conforme as etapas apresentadas na figura 16:



**Figura 16 - Dados de entrada do programa**  
Fonte: Autoria Própria.

No item “Definição das Propriedades da Madeira”, o usuário deve definir qual a classe da madeira e a partir da seleção da classe do carregamento, do tipo de madeira, da classe de umidade da madeira, do tipo de classificação realizada e da classe para coníferas ou folhosas, o software definirá os coeficientes de modificação das propriedades de resistência ( $k_{mod1}$ ,  $k_{mod2}$  e  $k_{mod3}$ ) de acordo com que foi apresentado na seção 4.4.1.1. A figura 17 apresenta as possibilidades de seleção que constam no programa.

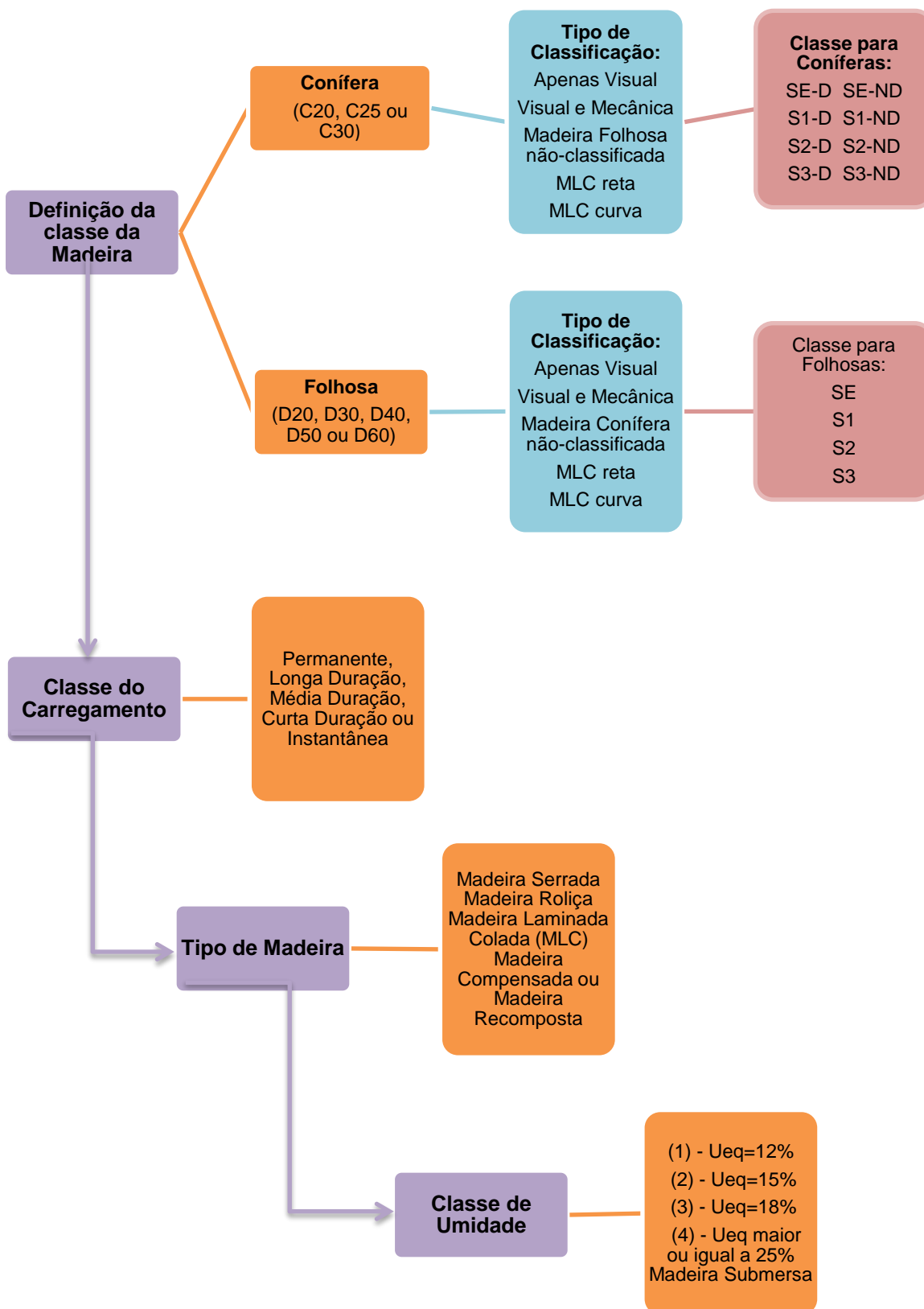


Figura 17 - Fluxograma da entrada de dados para as “Propriedades da Madeira”  
Fonte: Autoria Própria.

Para as propriedades geométricas e de vinculação o usuário deve definir a geometria da seção transversal, ou seja, se ela será circular ou retangular/quadrada, o comprimento do elemento estrutural, a vinculação referente à flambagem em torno do eixo x e a vinculação referente à flambagem em torno do eixo y. Após isso, são definidos pelo software os valores do coeficiente  $K_E$  tanto para o eixo x como para o eixo y, de acordo com o definido no item 4.4.1.2.

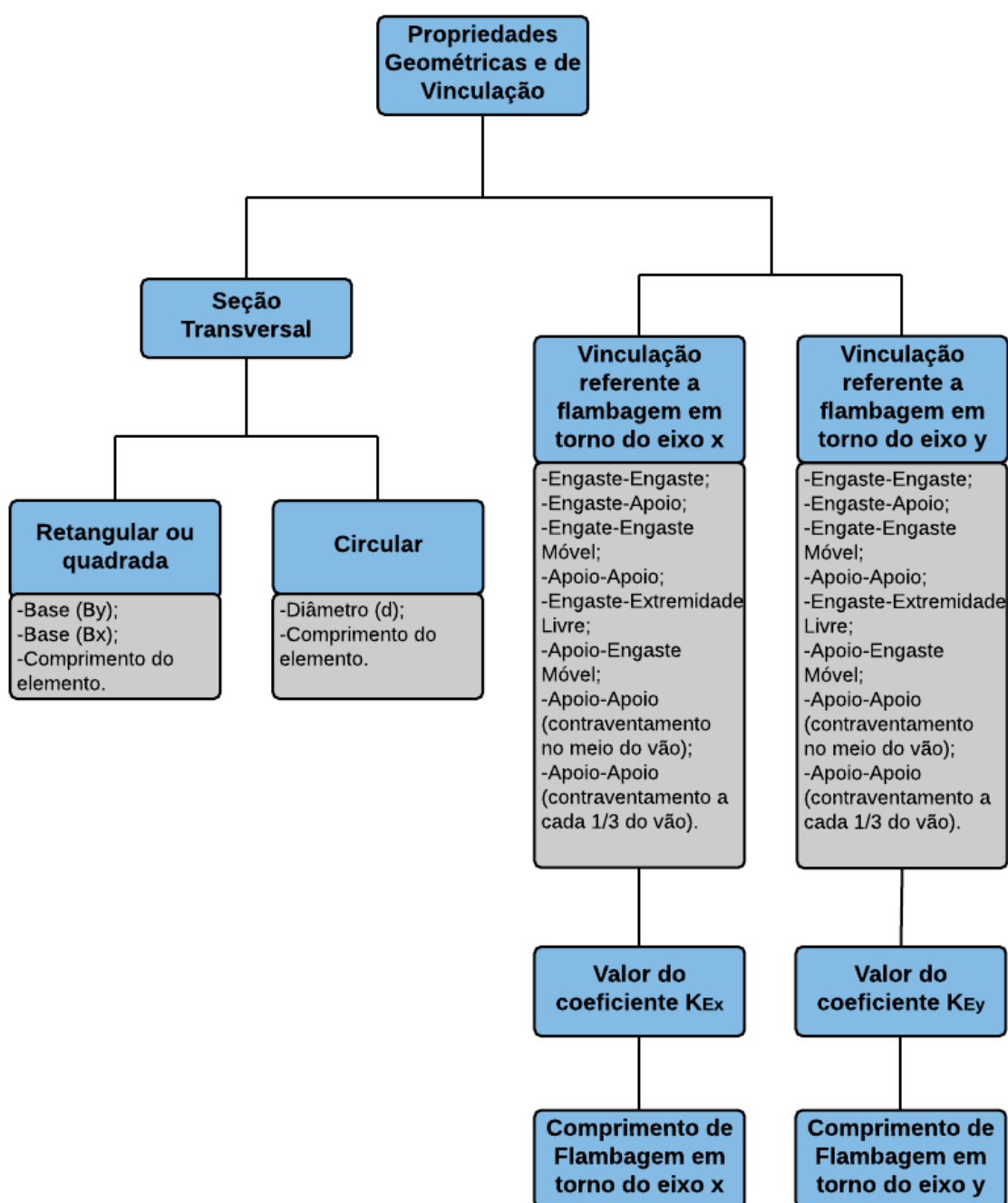
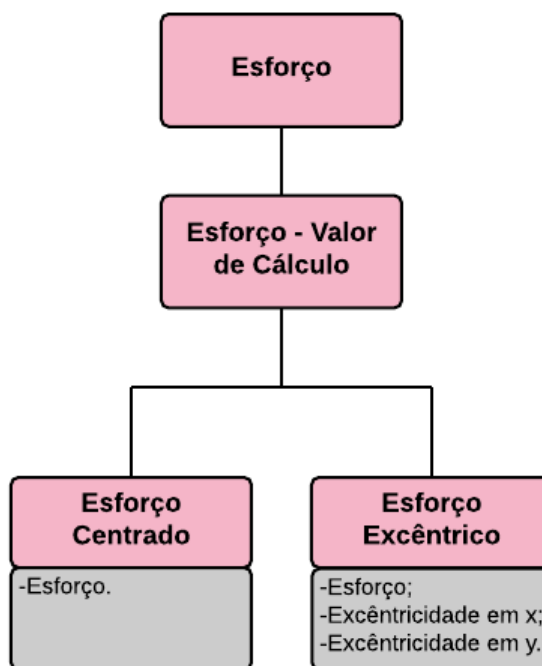


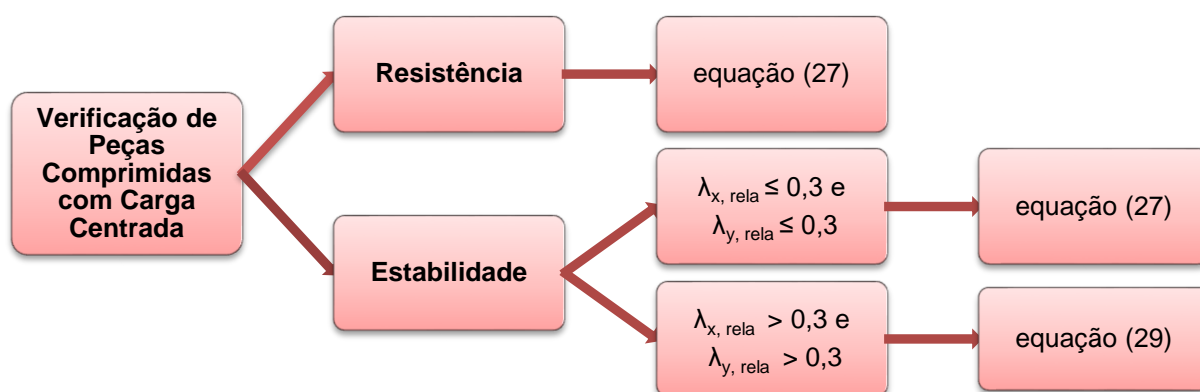
Figura 18 - Fluxograma referente às "Propriedades geométricas e de vinculação"  
Fonte: Autoria Própria.

A figura 19 fornece o fluxograma referente à “Definição do Esforço”. Neste item são considerados os valores de cálculo para o esforço e este poderá ser centrado ou excêntrico, sendo que neste caso além do valor do esforço o usuário deverá inserir os valores das excentricidades nos eixos x e/ou y.



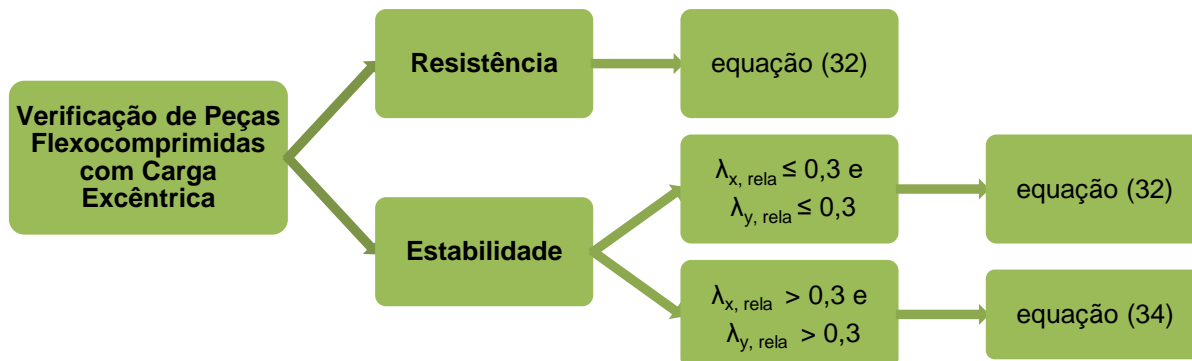
**Figura 19 - Fluxograma referente ao item "Definição do Esforço"**  
Fonte: Autoria Própria.

A figura 20 fornece o fluxograma referente à verificação do elemento estrutural para quando este é solicitado à compressão centrada. A figura apresenta os passos que são realizados para por fim verificar o elemento estrutural tanto para a resistência como para a estabilidade.



**Figura 20 - Verificação de Peças Comprimidas com Carga Centrada**  
 Fonte: Autoria Própria.

Já a figura 21 apresenta os passos que são realizados para o software verificar a estrutura tanto para a resistência quanto para a estabilidade quando essa é solicitada por uma carga excêntrica.



**Figura 21 - Verificação de Peças Flexocomprimidas com Carga Excêntrica**  
 Fonte: Autoria Própria.

As verificações são realizadas de acordo com as equações propostas pela proposta de norma da NBR 7190 (2011). Após os cálculos será apresentado um relatório no qual constam os valores de entrada, bem como os resultados das verificações.



## 5.2 CRIAÇÃO DA INTERFACE E COMPONENTES

O desenvolvimento do software foi realizado com o Lazarus, sendo composto basicamente por três fases:

- 1ª Fase: Desenvolvimento da interface software/usuário, onde o usuário deve inserir os dados de entrada para verificação da estrutura. Nesta fase foram inseridos os botões, caixas de texto e imagens, além da implementação das funções de cada campo;
- 2ª Fase: Implementação dos roteiros de cálculo utilizando variáveis criadas dentro do código computacional que são vinculadas com os elementos criados na interface, sendo assim, os valores informados pelo usuário são utilizados na verificação da resistência e estabilidade da estrutura;
- 3ª Fase: Desenvolvimentos dos relatórios de cálculo e do manual para o usuário.

## 5.3 REALIZAÇÃO DE TESTES PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

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

## 6 RESULTADOS

Como resultado deste trabalho obteve-se o software VeM (Verificações de Elementos em Madeira), o qual possui como objetivo realizar a verificação quanto a resistência e a estabilidade de elementos em madeira submetidos a compressão ou a flexocompressão.

Os cálculos e verificações realizados no software VeM estão de acordo com o projeto de norma da NBR 7190 (2011).

### 6.1 SOFTWARE VeM – VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS EM MADEIRA

O VeM foi desenvolvido com o intuito de criar uma ferramenta para auxiliar os estudantes e profissionais de engenharia a verificar estruturas de madeira submetidas à compressão ou à flexocompressão, tendo como diferencial dos softwares já existentes o método de cálculo, o qual é realizado de acordo com o projeto de norma da NBR 7190 (2011).

A figura 22 apresenta a “Página Inicial” do software, nela há o menu “Arquivo”, no qual o usuário poderá iniciar uma nova verificação ou sair do programa e o menu “Sobre”, pelo qual o usuário poderá obter ajuda sobre o software clicando no item “Ajuda” (figura 23) e consultando os manuais em PDF disponíveis.

Ainda na “Página Inicial”, pode-se verificar a presença de abas na parte superior da tela (destaque em verde), estas abas são as páginas de entrada de dados, o usuário poderá caminhar por estas para editar as informações fornecidas, porém de início estas abas serão desbloqueadas para edição gradualmente.

A aba referente às “Propriedades da Madeira” só está disponível para edição se o usuário iniciar uma verificação clicando no botão “Iniciar Verificação”, já as demais abas estão disponíveis para edição clicando no botão “Avançar”. Após liberada uma aba o usuário poderá retornar a ela e editá-la.



Figura 22 - Página inicial do software VeM

Fonte: Autoria Própria.



Figura 23 – Tela de "Ajuda"

Fonte: Autoria Própria.

Ao iniciar a verificação o usuário será direcionado à próxima página na qual ele deverá definir as propriedades da madeira (figura 24). Em “Propriedades da Madeira” deverá ser definida a classe da madeira e os parâmetros para determinação dos coeficientes de modificação da resistência.

VeM

Arquivo Sobre

Página Inicial Propriedades da Madeira Propriedades Geométricas e de Vinculação Esforço de Cálculo

Classe da Madeira

fc0,k:  (MPa) Ec0,m:  (MPa)

fv0,k:  (MPa) ρap:  (kg/m<sup>3</sup>)

**Coeficientes de Modificação das propriedades de resistência:**

Classe do Carregamento

Tipos de Madeira

Classe de umidade

Classe de Carregamento (Kmod1):

Classe de Umidade (Kmod2):

Qualidade da Madeira (Kmod3):

Avançar

**Figura 24 - Tela: "Propriedades da Madeira"**  
Fonte: Autoria Própria.

A depender da classe da madeira o software apresenta opções para o “Tipo de Classificação”, caso a madeira for conífera, serão apresentadas as seguintes opções destacadas em vermelho na figura 25:

VeM

Arquivo Sobre

Página Inicial Propriedades da Madeira Propriedades Geométricas e de Vinculação Esforço de Cálculo

Classe da Madeira: C-30

fc0,k: 30 (MPa) Ec0,m: 14500 (MPa)

fv0,k: 6 (MPa) pap: 600 (kg/m<sup>3</sup>)

**Coefficientes de Modificação das propriedades de resistência:**

Classe do Carregamento: Permanente

Tipos de Madeira: Madeira Serrada

Classe de umidade: (1) - Ueq=12%

Tipo de Classificação:

- Apenas Visual
- Visual e Mecânica
- Madeira Conífera não-classificada
- MLC reta
- MLC curva

Classe de Carregamento (Kmod1): 0,6

Classe de Umidade (Kmod2): 1,0

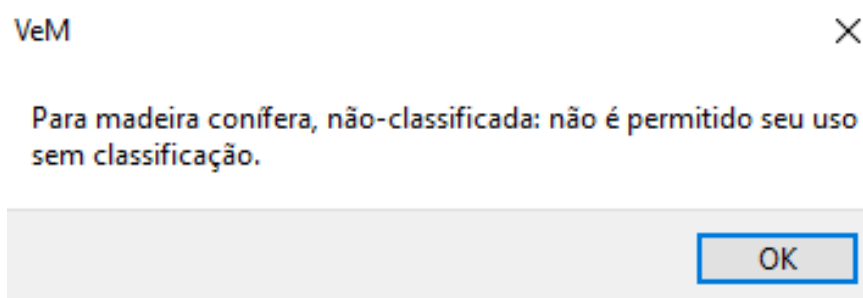
Qualidade da Madeira (Kmod3):

Avançar

**Figura 25 - Opções para o "Tipo de Classificação" para Coníferas**

Fonte: Autoria Própria.

Se o item "Madeira Conífera não classificada" for selecionado, o software alerta o usuário que de acordo com a norma não é permitido seu uso sem uma classificação (figura 26).



**Figura 26 - Mensagem para quando selecionado o item "Madeira Conífera não classificada"**

Fonte: Autoria Própria.

Caso a classe da madeira selecionada for de folhosas, são apresentadas as seguintes opções destacadas em verde na figura 27.

VeM

Arquivo Sobre

Página Inicial Propriedades da Madeira Propriedades Geométricas e de Vinculação Esforço de Cálculo

**Classe da Madeira** D-30

fc0,k: 30 (MPa) Ec0,m: 14500 (MPa)

fv0,k: 5 (MPa) rho:p: 800 (kg/m<sup>3</sup>)

**Coeficientes de Modificação das propriedades de resistência:**

Classe do Carregamento Permanente

Tipos de Madeira Madeira Serrada

Classe de umidade (1) - Ueq=12%

Tipo de Classificação

Apenas Visual  
Visual e Mecânica  
Madeira Folhosa não-classificada  
MLC reta  
MLC curva

Classe de Carregamento (Kmod1): 0,6

Classe de Umidade (Kmod2): 1,0

Qualidade da Madeira (Kmod3):

Avançar

**Figura 27 - Opções para o "Tipo de Classificação" para Folhosas**

Fonte: Autoria Própria.

Clicando em avançar surge a tela referente às “Propriedades Geométricas e de Vinculação” (figura 28), nesta parte o usuário informa o formato e as dimensões da seção transversal bem como o comprimento do elemento. Após isso, o usuário pode escolher o tipo de vinculação referente ao eixo x e ao eixo y para que o software aplique o valor do coeficiente  $K_E$  para cada eixo e calcule os respectivos valores dos comprimentos de flambagem.

VeM

Arquivo Sobre

Página Inicial Propriedades da Madeira Propriedades Geométricas e de Vinculação Esforço de Cálculo

Seção Transversal

Seção Retangular/Quadrada  Seção Circular

Comprimento do Elemento (L):  (mm)

Tipo de vinculação referente ao eixo x:

Tipo de vinculação referente ao eixo y:

Valor do coeficiente  $K_{e,x}$ :  Valor do coeficiente  $K_{e,y}$ :

Comprimento de Flambagem em torno do eixo xx:  (mm) Comprimento de Flambagem em torno do eixo yy:  (mm)

Avançar

**Figura 28 - Tela: "Propriedades Geométricas e de Vinculação"**

Fonte: Autoria Própria.

Caso o usuário selecione a "Seção Retangular/Quadrada", ele deverá informar às dimensões da base ( $B_x$ ) e da base ( $B_y$ ) da seção transversal (figura 29).

VeM

Arquivo Sobre

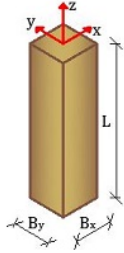
Página Inicial Propriedades da Madeira Propriedades Geométricas e de Vinculação Esforço de Cálculo

Seção Transversal  
 Seção Retangular/Quadrada  Seção Circular

Dimensões da Seção Transversal:  
 Base (Bx):  (mm) Base (By):  (mm)  
 Comprimento do Elemento (L):  (mm)

Tipo de vinculação referente ao eixo x:

Tipo de vinculação referente ao eixo y:



Valor do coeficiente  $K_{e,x}$ :  Valor do coeficiente  $K_{e,y}$ :   
 Comprimento de Flambagem em torno do eixo xx:  (mm) Comprimento de Flambagem em torno do eixo yy:  (mm)

Avançar

**Figura 29 - Tela para seção transversal retangular/quadrada**

Fonte: Autoria Própria.

Já se o usuário escolher a seção transversal circular deverá informar o diâmetro do elemento em madeira (figura 30).



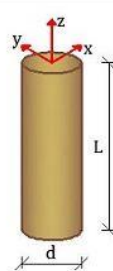
VeM

Arquivo Sobre

Página Inicial Propriedades da Madeira Propriedades Geométricas e de Vinculação Esforço de Cálculo

Seção Transversal  
 Seção Retangular/Quadrada  Seção Circular

**Dimensões da Seção Transversal:**  
 Diâmetro (d):  (mm)  
 Comprimento do Elemento (L):  (mm)



Tipo de vinculação referente ao eixo x:

Tipo de vinculação referente ao eixo y:

Valor do coeficiente  $K_{e,x}$ :  Valor do coeficiente  $K_{e,y}$ :

Comprimento de Flambagem em torno do eixo xx:  (mm) Comprimento de Flambagem em torno do eixo yy:  (mm)

Avançar

**Figura 30 - Tela para seção transversal circular**

Fonte: Autoria Própria.

Para o cálculo do comprimento de flambagem o usuário deve indicar qual o tipo de vinculação referente a cada eixo, sendo que o software possui os tipos de vinculações destacadas em vermelho na figura 31:

VeM

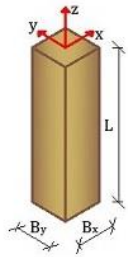
Arquivo Sobre

Página Inicial Propriedades da Madeira Propriedades Geométricas e de Vinculação Esforço de Cálculo

Seção Transversal  
 Seção Retangular/Quadrada  Seção Circular

Dimensões da Seção Transversal:  
 Base (By):  (mm) Base (Bx):  (mm)  
 Comprimento do Elemento (L):  (mm)

Tipo de vinculação referente ao eixo x:



Tipo de vinculação referente ao eixo y:

Valor do coeficiente  $K_{e,x}$ :  Valor do coeficiente  $K_{e,y}$ :

Comprimento de Flambagem em torno do eixo xx:  (mm) Comprimento de Flambagem em torno do eixo yy:  (mm)

Avançar

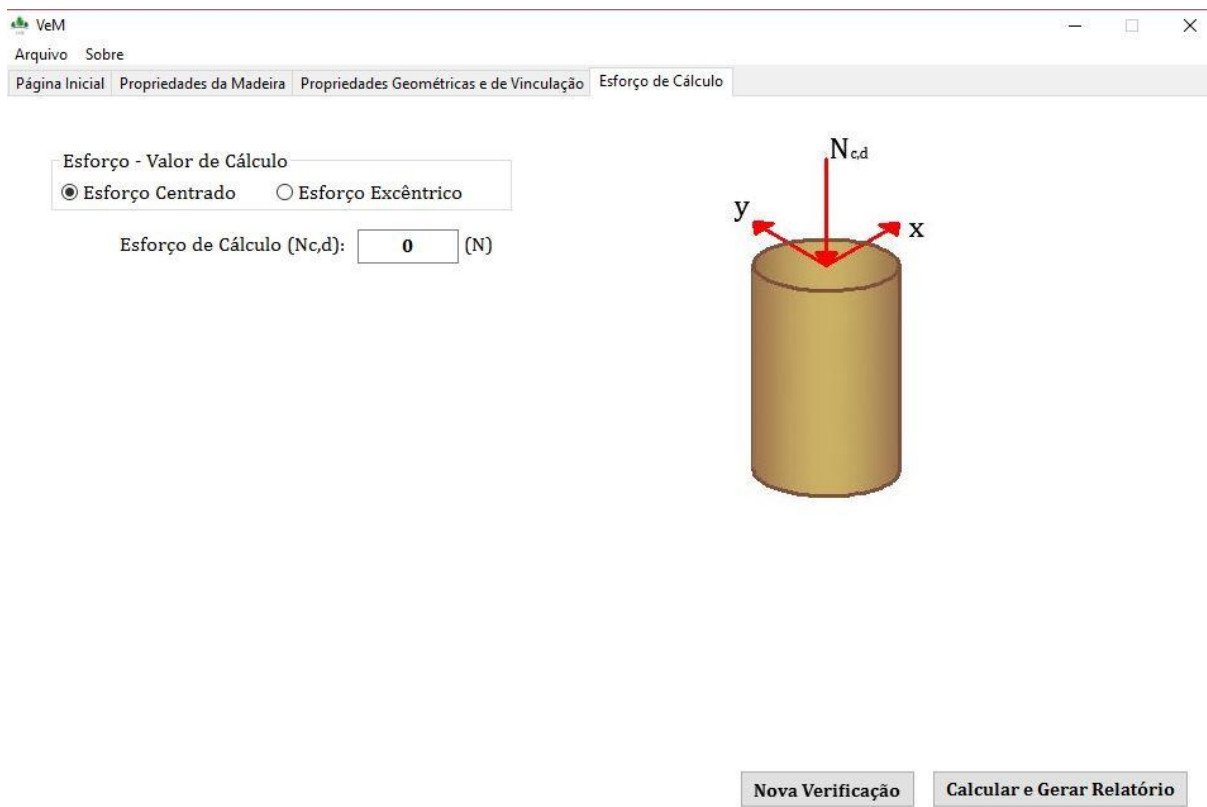
**Figura 31 - Opções de vinculações disponibilizadas pelo software**  
 Fonte: Autoria Própria.

A próxima etapa é o usuário informar o esforço de cálculo o qual o pilar está submetido. Este esforço pode ser centrado, quando for aplicado no centroide da seção transversal, ou excêntrico, quando for aplicado a uma distância do centroide.



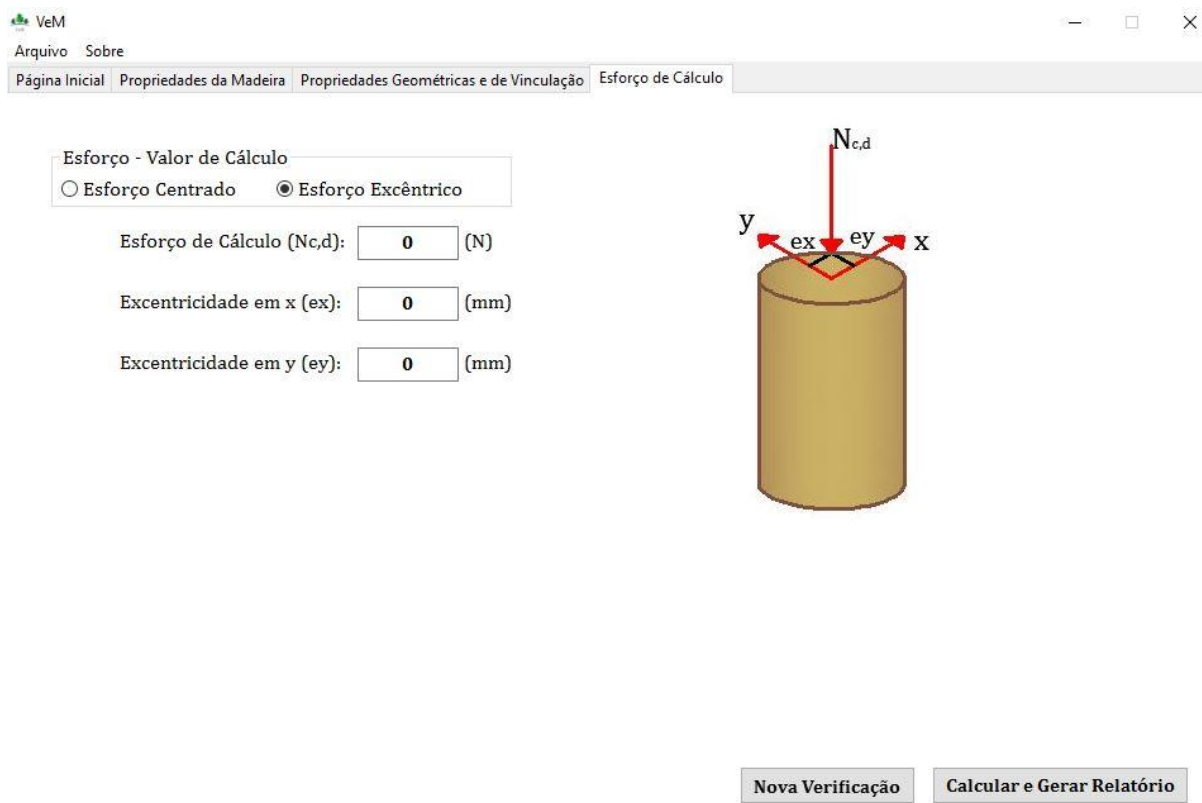
**Figura 32 - Tela: "Esforço de Cálculo"**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Se o esforço ao qual o pilar está submetido for centrado o usuário deverá informar apenas o valor de cálculo deste esforço (figura 33).



**Figura 33 - Tela para "Esforço Centrado"**  
Fonte: Autoria Própria.

Porém se o esforço selecionado for o excêntrico, além do valor do esforço de cálculo o usuário deve informar as excentricidades das direções x e/ou y (figura 34).



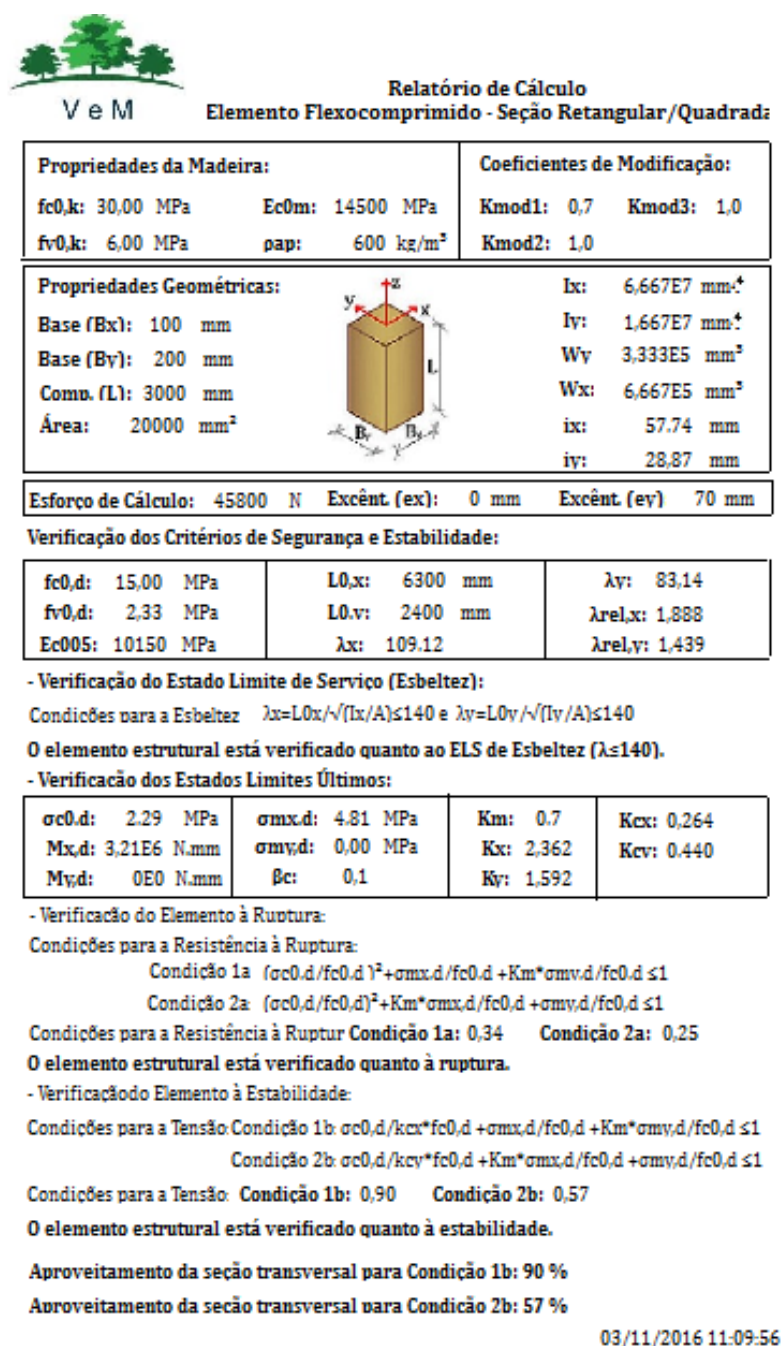
**Figura 34 - Tela para "Esforço Excêntrico"**

**Fonte: Autoria Própria.**

Após definidos todos os dados de entrada, ao clicar no botão “Calcular e Gerar Relatório” o software realiza os cálculos e verificações de acordo com o projeto de norma da NBR 7190 (2011) e gera um relatório final de dimensionamento apresentado como exemplo na figura 35. Neste relatório o usuário tem acesso aos dados de entrada que ele inseriu no software e as verificações realizadas. Outra informação importante é o aproveitamento da seção transversal, a partir desta informação o usuário pode realizar uma otimização da seção transversal, o que significa chegar ao máximo aproveitamento desta.

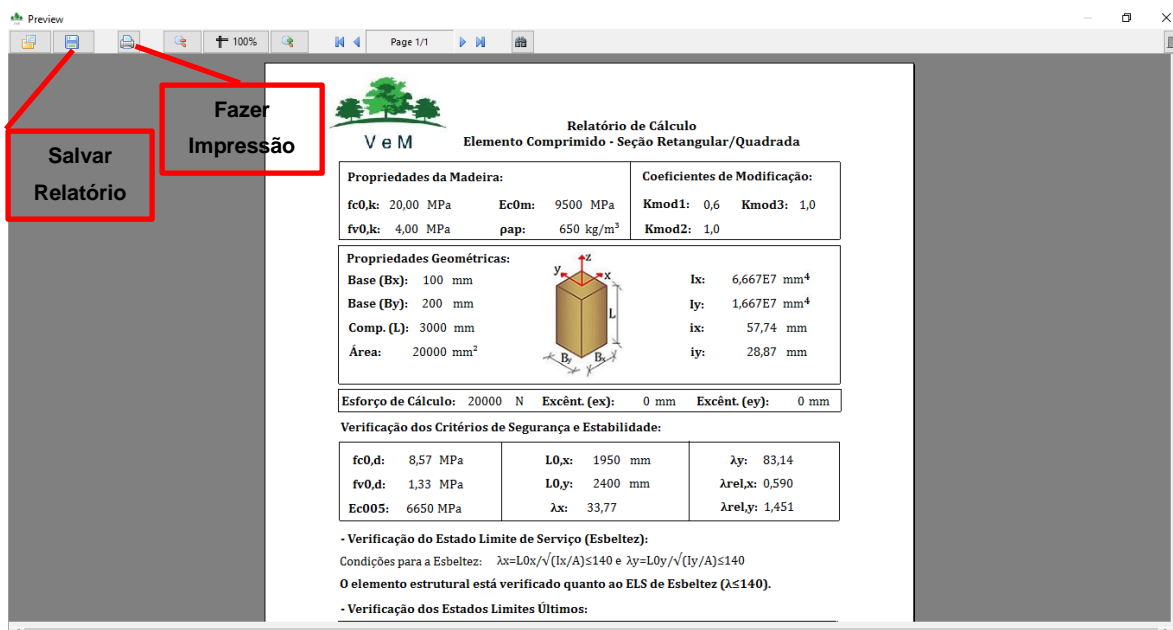
A otimização da seção transversal dá-se pela verificação referente à estabilidade do elemento, na qual a depender da esbelteza relativa, as tensões deverão atender a determinadas condições apresentadas nas equações 25, 27, 30 e 32. Quanto mais próximo de 1 (um) o valor encontrado nas equações mais otimizada está a seção transversal, ou seja, há um melhor aproveitamento. Caso estes valores sejam muito menores que 1 (um) o usuário poderá diminuir a seção transversal, por exemplo, ou realizar outras modificações que façam com que o valor obtido nas equações sejam mais próximos o possível de 1 (um). No software o usuário pode

realizar esta otimização, fechando o atual relatório e através da navegação pelas abas superiores indicadas na figura 22, alterar os parâmetros pertinentes e gerar um novo relatório.



**Figura 35 - Modelo de relatório gerado pelo software**  
Fonte: Autoria Própria.

Ainda na tela do relatório, o usuário pode salvar este arquivo em PDF ou ainda realizar a impressão do mesmo.



**Figura 36 - Tela: "Relatório de Cálculo"**  
Fonte: Autoria Própria.

Ao sair da tela do "Relatório de Cálculo" o usuário poderá clicar no botão "Nova Verificação", pelo qual será redirecionado à página inicial do software e os dados anteriormente adicionados serão apagados.

## 6.2 – TESTES DE VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

Para validação do software foram resolvidos exercícios manualmente que foram comparados aos resultados fornecidos em relatório pelo software.

No apêndice A deste trabalho são encontrados exercícios que contemplam os seguintes casos:

1. Pilar em Madeira Laminada Colada (MLC), com seção transversal quadrada, submetido a esforço centrado;
2. Pilar em Madeira Laminada Colada (MLC), com seção retangular, submetido a esforço excêntrico;
3. Pilar em Madeira Serrada, com seção transversal circular, submetido a esforço centrado.

Não houve divergência nos resultados obtidos manualmente aos obtidos pelo software.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do trabalho alcançou-se o objetivo do mesmo, que era o desenvolvimento um software para dimensionamento de pilares em madeira com seção maciça, submetidos à compressão ou à flexocompressão de acordo com o projeto de norma da ABNT NBR 7190 (2011).

Ao comparar os resultados obtidos pelo software com os obtidos manualmente não foram encontrados desvios, o que garante a aceitabilidade da ferramenta em aplicações como auxílio em estudos.

O aprimoramento contínuo do código é um fator comum no ramo da programação. Desta forma, sugere-se que sejam feitos trabalhos futuros com alguns melhoramentos do software, tais como: implementação de mais opções de seções transversais (seção composta de peças roliças, seção composta de peças serradas com ligação contínua ou ainda seção composta de peças serradas ligadas por peças intermediárias descontínuas), adição do cálculo do esforço de cálculo, pois atualmente o usuário deve entrar com o valor do esforço já considerando os devidos coeficientes, além da correção de eventuais possíveis falhas do sistema comumente encontradas pelos usuários no decorrer do tempo.

## REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALVIM, R.C.; VELOSO, L.A.C.M. (2002). Sobre o modelo de fluência da NBR 7190 para barras comprimidas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. Anais... Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 1 CD-ROM.

ARAÚJO, Tereza.: **Notas de Aula – Construção de Edifícios 1: Estruturas de Madeira.** Universidade Federal do Ceará, 2003. Disponível em: <[http://www.geocities.ws/tereza\\_denyse/madeira.pdf](http://www.geocities.ws/tereza_denyse/madeira.pdf)> Acesso em: 18 mai. 2016.

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

BARALDI, L.T.; LOGSDON, N.B. (1998). **Dimensionamento de elementos estruturais submetidos à compressão paralela – uma discussão da NBR 7190/97.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis, UFSC-IBRAMEM. v.2, p.157-168.

CARDOSO, P. A. **Interdisciplinaridade na prática: A experiência da aplicação do software Preactor como ferramenta de integração curricular no curso de graduação em Engenharia de Produção.** Anais do XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 2006.

CORDOVIL, F. A. B. (1998). Peças comprimidas segundo a NBR-7190/96. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis, UFSC-IBRAMEM. v.1, p.65-76.

DUARTE, Juliana. Uma casa de respeito. **Revista Construir mais por menos.** Portal Casa e Cia, 2010. Fotos: Alessandro Guimarães. Disponível em: <<http://construirmaispormenos.uol.com.br/escm/economia-obra/10/artigo226932-1.asp>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

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

FOGAÇA, Bianca Jagher; REIS, Leonardo Dias dos. **Elaboração de uma ferramenta computacional para dimensionamento de pilares de madeira com seção composta.** 2014.50f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de

Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. .  
Disponível em:  
<[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2588/1/CT\\_EPC\\_2013\\_2\\_04.PDF](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2588/1/CT_EPC_2013_2_04.PDF)>. Acesso em: 14 mai. 2016.

HANDBOOK 1. **Timber structures**. Leonardo da Vinci Pilot Projects, 1 ed, 2008.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HOFFMANN, Alessandra Corsato; PELEGRINI, Sandra de Cássia Araújo. **A técnica de se construir em madeira: um legado do patrimônio cultural para a cidade de Maringá**. IV Congresso Internacional de História, Maringá, 2009. Disponível em:  
<<http://www.pph.uem.br/cih/anais/trabalhos/732.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

MEIRELLES, Célia Regina M. **Considerações sobre o uso da madeira do Brasil em Construções Habitacionais**. III Fórum de Pesquisa FAU, Mackenzie, 2007.  
Disponível em:  
<[http://www.mackenzie.com.br/fileadmin/Graduacao/FAU/Publicacoes/PDF\\_IIIForum\\_a/MACK\\_III\\_FORUM\\_CELIA\\_REGINA.pdf](http://www.mackenzie.com.br/fileadmin/Graduacao/FAU/Publicacoes/PDF_IIIForum_a/MACK_III_FORUM_CELIA_REGINA.pdf)>. Acesso em: 16 mai. 2016.

MELLO, Evandro de Castro. **Free Pascal Lazarus**. Universidade Federal de Viçosa, 2012. Disponível em:< <http://www.evandro.eng.br/Apostila-Lazarus.pdf>>. Acesso em: 14 mar 2016.

MIOTTO, José Luiz; DIAS, Antonio Alves. **Avaliação dos critérios de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas de madeira**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 33, p. 53-81, 2006.  
Disponível em:  
<[http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova\\_versao/pdf/cee33\\_53.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee33_53.pdf)>. Acesso em: 21 mai. 2016.

MIOTTO, J.L. (2003). **Avaliação dos critérios de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas de madeira**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NICOLAS, Elias Antonio. **Estudo de ligações em estruturas mistas de concreto-madeira**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2001. Disponível em:  
<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000232694>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

PETRUCCI, Eládio Geraldo Requião. **Materiais de Construção**. 11ª ed - São Paulo: Globo, 1998.

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.

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

SANTOS, L. B.; MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R. (2002). **Algumas considerações sobre os critérios propostos pela NBR 7190/97 para a verificação da segurança em pilares de madeira**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. Anais... Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia. 1 CD-ROM.

SILVA, L. M. F.; PINTO, M. G. & SUBRAMANIAN, A. **Utilizando o software Arena como ferramenta de apoio ao ensino em engenharia de produção**. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXVII ENEGEP, 2007, Foz do Iguaçu-PR. Anais... Foz do Iguaçu, 2007. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj7-4HOzpvQAhVDEJAKHVI9AkQQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fxa.yimg.com%2Fkq%2Fgroups%2F22929725%2F527828734%2Fname%2FENEGEP2007\\_TR660482\\_9236.pdf&usg=AFQjCNEypaq4yL7yxAe0Bkp6gQ8WdhwlMQ&sig2=UvveQrZGApTk2Kyvb4coVw](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj7-4HOzpvQAhVDEJAKHVI9AkQQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fxa.yimg.com%2Fkq%2Fgroups%2F22929725%2F527828734%2Fname%2FENEGEP2007_TR660482_9236.pdf&usg=AFQjCNEypaq4yL7yxAe0Bkp6gQ8WdhwlMQ&sig2=UvveQrZGApTk2Kyvb4coVw)>. Acesso em: 18 mai. 2016.

SZÜCS, C. A. et al. **Estruturas de Madeira**. Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://www.giem.ufsc.br/upload/20090317173248.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

## APÊNDICE A – EXEMPLOS PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

Exemplo 1: O pilar de uma residência unifamiliar é construído em Madeira Laminada Colada, classe C30, com teor de umidade classe 1, possui o pé-direito de 4 m e a seção transversal do pilar é quadrada de lado igual a 15 cm. O pilar pode ser considerado biarticulado nas extremidades e submetido a uma carga permanente devido ao peso próprio de elementos de Madeira Laminada Colada igual a 20 kN e também a uma carga concentrada de 20 kN referente às condições de uso normais de um edifício residencial. As forças estão concentradas no centro geométrico da seção transversal do pilar. Considerar que o pilar está contraventado em um dos eixos, conforme ilustrado nas figuras. Verifique o pilar.

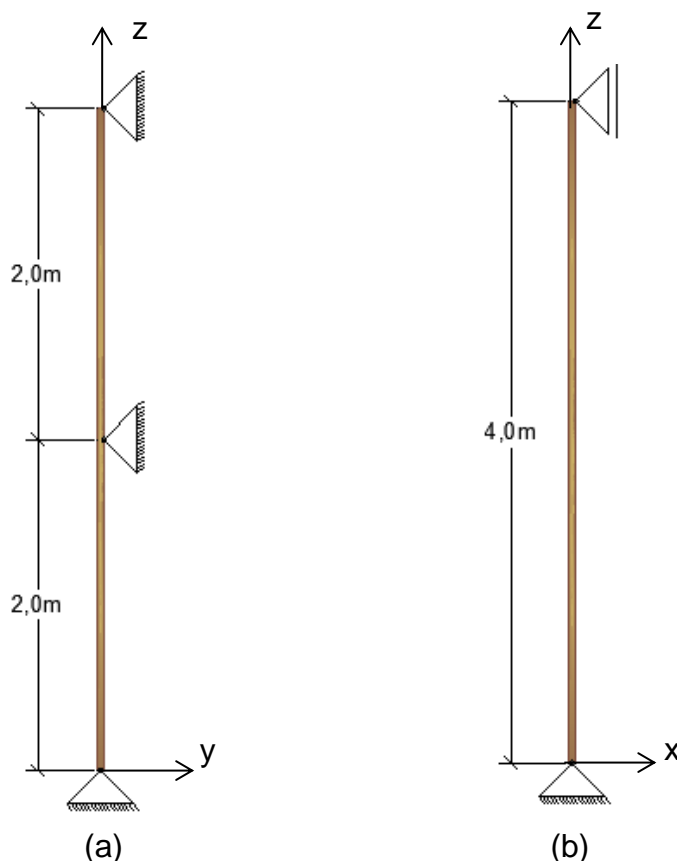


Figura A.1 - Flambagem em torno do eixo xx (a) e flambagem em torno do eixo yy (b)  
Fonte: Autoria Própria.

Resolução:

1. Dados do exercício:

- MLC Classe C30, U = Classe 1;
- Seção transversal (15 x 15 cm);
- Carga Permanente aplicada no centro da seção transversal devido ao peso próprio da madeira:  $P_{\text{mad}} = 20 \text{ kN}$ ;
- Carga Acidental devido às condições de uso normais de um edifício residencial (geral):  $P_{\text{acid}} = 20 \text{ kN}$ .

## 2. Combinações dos esforços em ELU

- ELU Permanente:

$$N_{c,d} = 1,2 * (20000) = 24000 \text{ N}$$

- ELU Média Duração:

$$N_{c,d} = 1,2 * (20000) + 1,5 * (20000) = 54000 \text{ N}$$

- Verificação da combinação mais crítica:

- ELU Permanente:

$$N_{c,d,cri} = \frac{N_{c,d}}{k_{mod1}} = \frac{24000}{0,6} = 40000 \text{ N}$$

- ELU Média Duração:

$$N_{c,d,cri} = \frac{N_{c,d}}{k_{mod1}} = \frac{54000}{0,8} = 67500 \text{ N}$$

Portanto, a combinação mais crítica é a de Média Duração.

## 3. Propriedades da Madeira

O valor de projeto da resistência à compressão paralela às fibras é calculado pela expressão 18, na qual os valores de  $k_{mod1}$ ,  $k_{mod2}$ ,  $k_{mod3}$  são respectivamente 0,8, 1,0 e 1,0.

$$f_{c0,d} = 0,8 * 1,0 * 1,0 * \frac{30}{1,4} = 17,14 \text{ MPa}$$

Já o módulo de elasticidade característico medido na direção paralela às fibras da madeira ( $E_{0,05}$ ) é calculado pela equação 21.

$$E_{0,05} = 0,7 * E_{c0,m} = 0,7 * 14500 = 10150 \text{ MPa}$$

#### 4. Propriedades Geométricas da Seção Transversal

$$A = 150 * 150 = 22500 \text{ mm}^2$$

$$I_{xx} = I_{yy} = 42187500 \text{ mm}^4$$

$$W_{xx} = W_{yy} = 562500 \text{ mm}^3$$

#### 5. Verificação do Estado Limite de Serviço de Esbeltez

A esbeltez deve ser calculada por meio da equação 22, considerando as diferentes vinculações em cada um dos planos.

$$\lambda_x = \frac{1,0 * 200}{\sqrt{\frac{4218,75}{225}}} = 46,19$$

Como  $\lambda_x < 140$ , então OK.

$$\lambda_y = \frac{1,0 * 400}{\sqrt{\frac{4218,75}{225}}} = 92,38$$

Como  $\lambda_y < 140$ , então OK.

O elemento está verificado quanto ao ELS de Esbeltez.

#### 6. Verificação dos Estados Limites Últimos

- Verificação da Resistência à Ruptura:

A verificação da resistência à ruptura, para elementos submetidos à compressão centrada é feita por meio da equação 25.

$$\sigma_{cod} \leq f_{cod}$$

Para a Combinação de Média Duração tem-se:

$$\sigma_{co,d} = \frac{F}{A} = \frac{54000}{22500} = 2,4 \frac{N}{mm^2} = 2,4 MPa$$

Como  $f_{co,d} = 17,14 MPa$ , o elemento está verificado quanto à resistência à ruptura.

- Verificação da Estabilidade:

Cálculo da esbeltez relativa de acordo com a equação 25.

$$\lambda_{rel,x} = \frac{46,19}{\pi} \sqrt{\frac{30}{10150}} = 0,799$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{92,38}{\pi} \sqrt{\frac{30}{10150}} = 1,599$$

Como os valores da esbeltez relativa em ambos os eixos são maiores que 0,3, as tensões deverão satisfazer as condições impostas nas condições da equação 27.

Assim, para a Combinação de Média Duração, tem-se para o eixo xx:

$$\frac{2,4}{0,896 \cdot 17,1} \leq 1$$

$0,16 \leq 1$ , portanto a estabilidade em relação ao eixo xx está verificada.

Já para o eixo yy, tem-se:

$$\frac{2,4}{0,362 \cdot 17,1} \leq 1$$

$0,39 \leq 1$ , portanto a estabilidade em relação ao eixo yy está verificada.

Logo, o elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade.

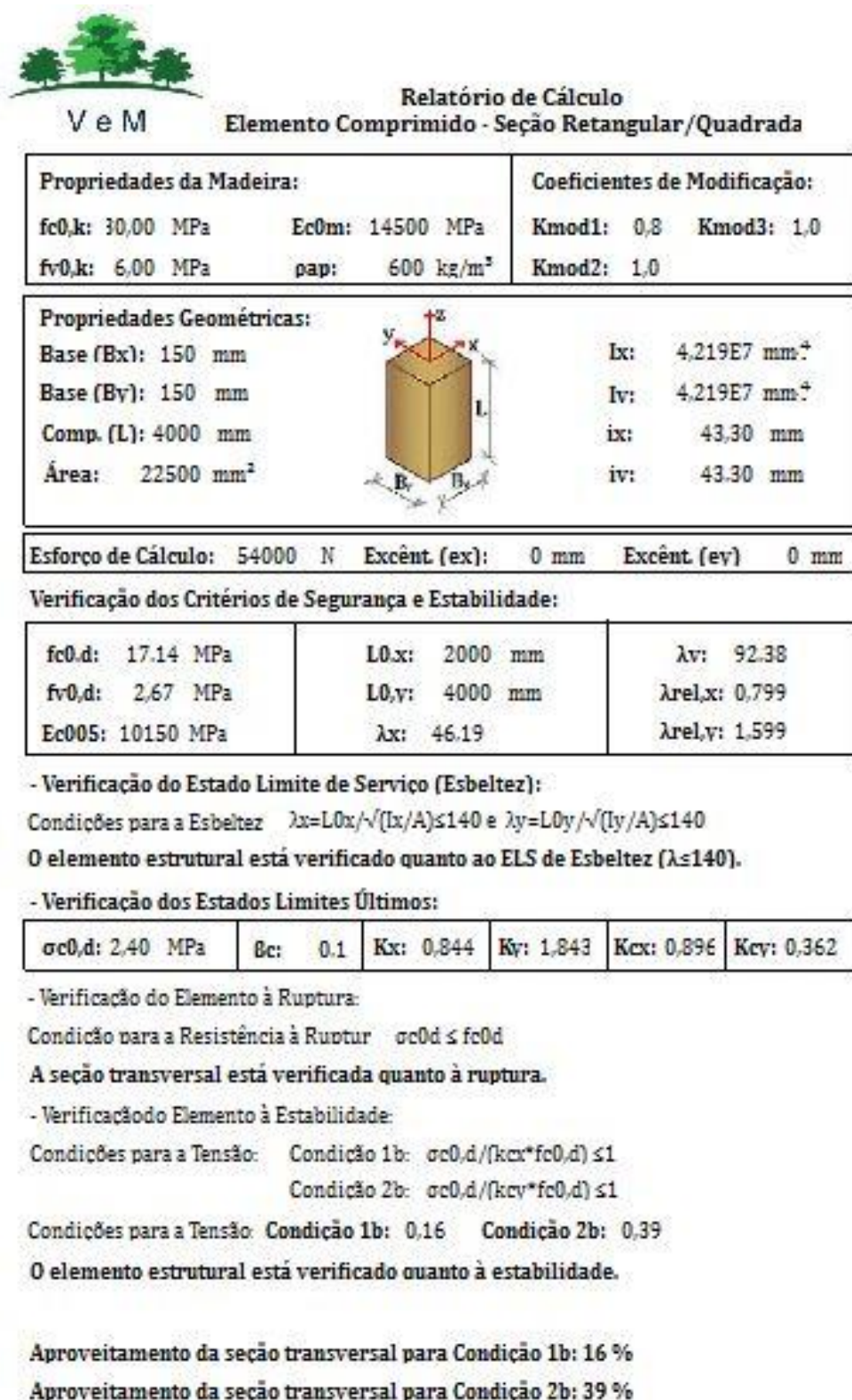


## 7. Resumo das Verificações

ELS	$\lambda_x=46,19$ $\lambda_y=92,38$	$\leq 140$	OK!
ELU <sub>resistência</sub>	$\sigma_{c0,d}=2,4\text{MPa}$	$\leq f_{c0,d}=17,14\text{MPa}$	OK!
ELU <sub>estabilidade</sub>	0,39	$\leq 1$	OK!

**Quadro A.1- Resumo das Verificações do Exemplo 1****Fonte: Autoria Própria.**

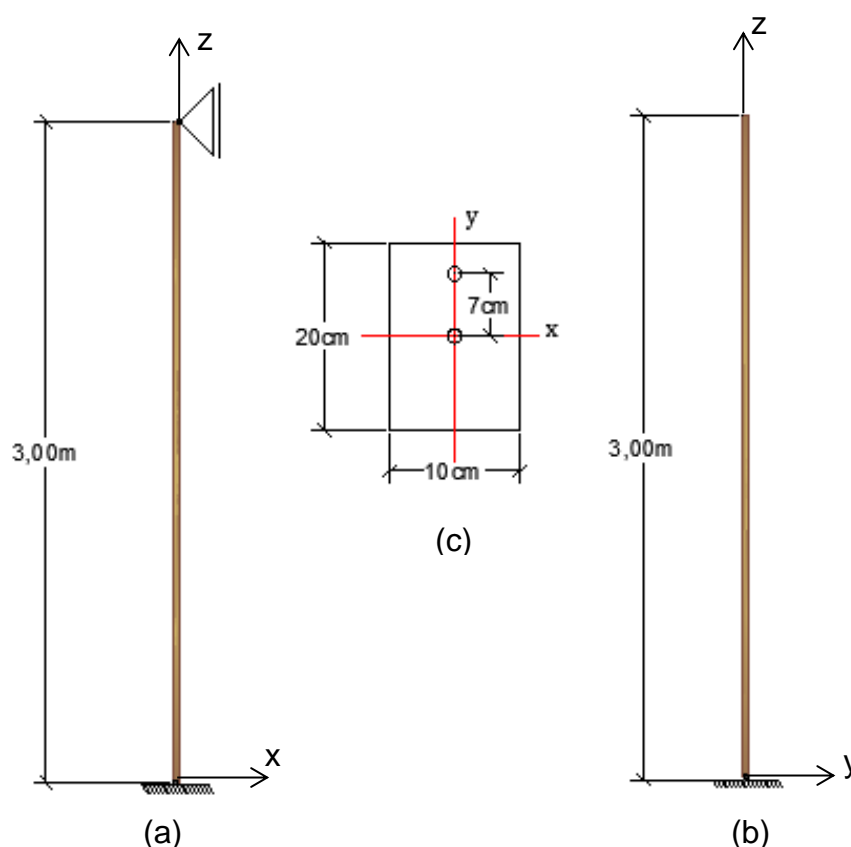
Utilizando o software VeM, obteve-se o seguinte relatório:



03/11/2016 11:04:19

Figura A.2 - Relatório gerado pelo Software VeM (Exemplo 1)  
 Fonte: Autoria Própria.

Exemplo 2: O pilar de uma edificação comercial é construído em Madeira Laminada Colada, classe C30, com teor de umidade classe 1, possui o pé-direito de 3 m e a seção transversal do pilar é retangular (10x20cm). O pilar está solicitado por força concentrada excêntrica de 45,8 kN (valor de cálculo de longa duração) conforme indicado na figura 39-c. O pilar possui, em seu topo, um dispositivo que impede a translação apenas na direção do eixo x, contribuindo para a redução de uma possível instabilidade do pilar em torno do eixo y.



**Figura A.3 - Flambagem em torno do eixo yy (a), flambagem em torno do eixo xx (b) e seção transversal (c).  
Fonte: Autoria Própria.**

Resolução:

1. Dados do exercício:

- MLC Classe C30, U = Classe 1;
- Seção transversal (10 x 20 cm);
- Determinação estática de engaste fixo na direção de maior inércia e engaste e apoio em relação ao eixo de menor inércia (figura 39);

- Carga concentrada de  $P_d = 45,8$  kN (valor de cálculo)
- Excentricidade inicial de 7 cm no eixo y.

## 2. Combinações dos esforços em ELU

O enunciado informou que o valor de  $N_{c,d} = 45800$ N.

## 3. Propriedades da Madeira

O valor de projeto da resistência à compressão paralela às para carregamento de longa duração é calculado pela expressão 18, na qual os valores de  $k_{mod1}$ ,  $k_{mod2}$ ,  $k_{mod3}$  são respectivamente 0,7, 1,0 e 1,0.

$$f_{c0,d} = 0,7 * 1,0 * 1,0 * \frac{30}{1,4} = 15 \text{ MPa}$$

Já o módulo de elasticidade característico medido na direção paralela às fibras da madeira ( $E_{0,05}$ ) é calculado pela equação 21.

$$E_{0,05} = 0,7 * E_{c0,m} = 0,7 * 14500 = 10150 \text{ MPa}$$

## 4. Propriedades Geométricas da Seção Transversal

$$A = 100 * 200 = 20000 \text{ mm}^2$$

$$I_{xx} = 6666,7 * 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_{yy} = 1666,7 * 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{xx} = 666,7 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{yy} = 333,3 * 10^3 \text{ mm}^3$$

## 5. Verificação do Estado Limite de Serviço (Esbeltez)

A esbeltez deve ser calculada por meio da equação 22, considerando as diferentes vinculações em cada um dos planos.

$$L_{o,x} = K_E * L = 2,1 * 300 = 630 \text{ cm}$$

$$L_{o,y} = K_E * L = 0,8 * 300 = 240 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = \frac{630}{\sqrt{\frac{6666,7}{200}}} = 109,12$$

Como  $\lambda_x < 140$ , então OK.

$$\lambda_y = \frac{240}{\sqrt{\frac{1666,7}{200}}} = 83,14$$

Como  $\lambda_y < 140$ , então OK.

O elemento está verificado quanto ao ELS de Esbeltez.

## 6. Verificação dos Estados Limites Últimos

- Verificação da Resistência à Ruptura:

A verificação da resistência à ruptura, para elementos submetidos à flexocompressão é feita por meio da equação 30.

Cálculo da Tensão:

$$\sigma_{c0,d} = \frac{F}{A} = \frac{45800}{20000} = 2,29 \frac{N}{mm^2} = 2,29 MPa$$

$$\sigma_{Mx,d} = \frac{M_{x,d}}{W_{xx}} = \frac{45800 \cdot 70}{666,7 \cdot 10^3} = 4,81 \frac{N}{mm^2} = 4,81 MPa$$

Verificação da resistência:

$$\left(\frac{2,29}{15}\right)^2 + \frac{4,81}{15} \leq 1$$

$0,34 < 1$ , portanto a resistência em relação ao eixo xx está verificada.

$$\left(\frac{2,29}{15}\right)^2 + 0,7 * \frac{4,81}{15} \leq 1$$

$0,25 < 1$ , portanto a resistência em relação ao eixo yy está verificada.

- Verificação da Estabilidade:

Cálculo da esbeltez relativa de acordo com a equação 25.

$$\lambda_{rel,x} = \frac{109,1}{\pi} \sqrt{\frac{30}{10150}} = 1,888$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{83,1}{\pi} \sqrt{\frac{30}{10150}} = 1,438$$

Como os valores da esbelteza relativa em ambos os eixos são maiores que 0,3, as tensões deverão satisfazer as condições impostas nas condições da equação 32.

Assim:

$$K_x = 0,5 * [1 + \beta_c(\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2];$$

Com  $\beta_c = 0,1$  (Madeira Laminada Colada).

$$K_x = 0,5 * [1 + 0,1(1,888 - 0,3) + 1,888^2] = 2,362$$

$$K_{cx} = \frac{1}{2,362 + \sqrt{2,362^2 - 1,888^2}} = 0,264$$

$$K_y = 0,5 * [1 + 0,1(1,438 - 0,3) + 1,438^2] = 1,590$$

$$K_{cy} = \frac{1}{1,590 + \sqrt{1,590^2 - 1,438^2}} = 0,441$$

Verificação da estabilidade:

$$\frac{2,29}{0,264 * 15} + \frac{4,81}{15} + 0,7 * \frac{0}{15} \leq 1$$

$0,90 < 1$ , portanto a estabilidade em relação ao eixo xx está verificada.

$$\frac{2,29}{0,441 * 15} + 0,7 * \frac{4,81}{15} + \frac{0}{15} \leq 1$$

$0,57 < 1$ , portanto a estabilidade em relação ao eixo yy está verificada.

Logo, o elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade.

## 7. Resumo das Verificações

ELS	$\lambda_x=109,1$ $\lambda_y=83,1$	$\leq 140$	OK!
ELU <sub>resistência</sub>	0,34	$\leq 1$	OK!
ELU <sub>estabilidade</sub>	0,90	$\leq 1$	OK!

**Quadro A.2 - Resumo das Verificações do Exemplo 2**

Fonte: Autoria Própria.

Utilizando o software VeM, obteve-se o seguinte relatório:

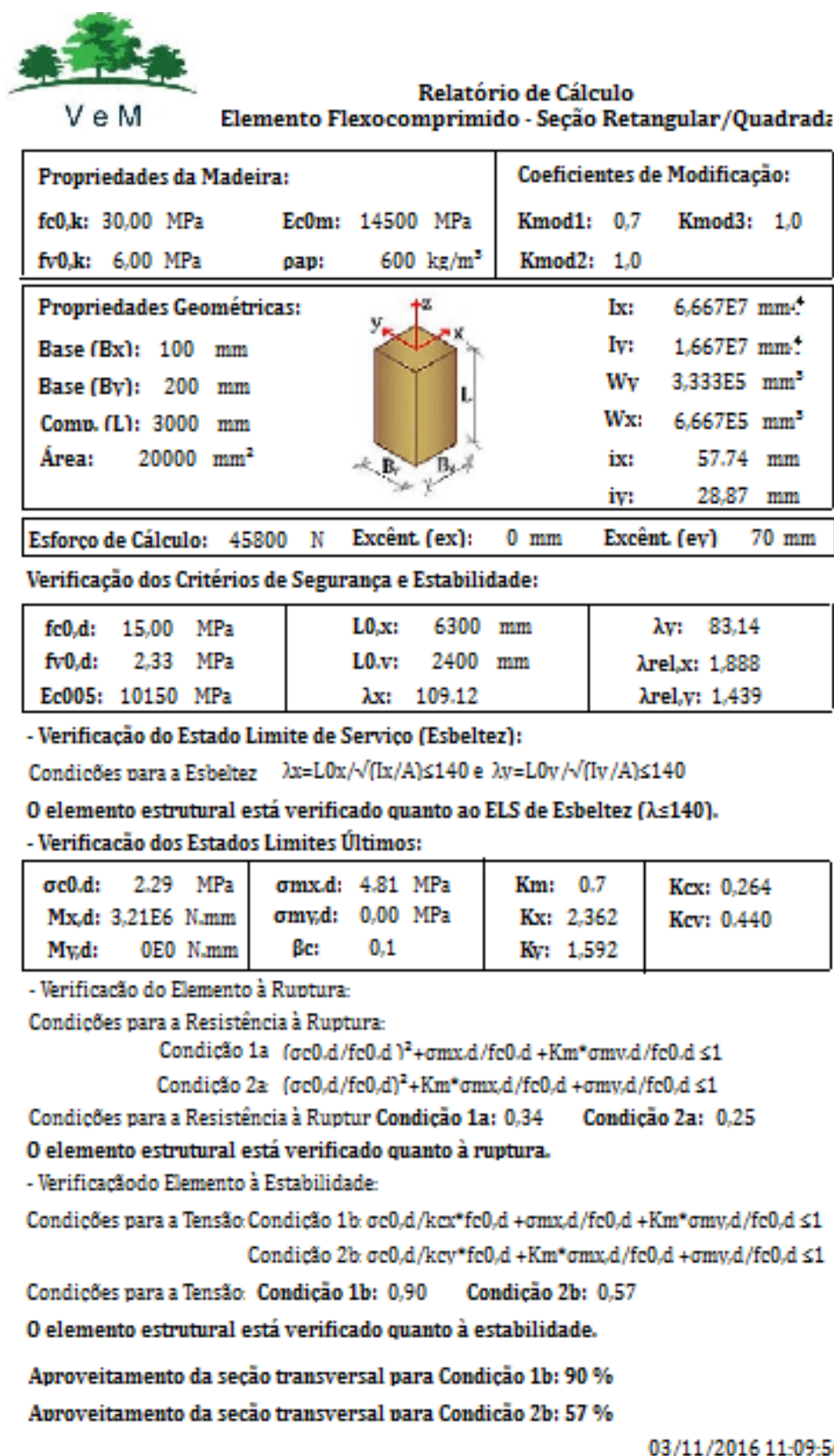


Figura A.4 - Relatório gerado pelo Software VeM (Exemplo 2)  
 Fonte: Autoria Própria.



Exemplo 3: Um pier de madeira será construído em Florianópolis-SC, tornando-se um local para a realização de feiras e eventos sociais em geral, com alta aglomeração de pessoas. Os cálculos anteriores indicam os seguintes esforços normais de compressão no topo do pilar (estaca) mais solicitada:  $P_{p,k} = 50 \text{ kN}$  e  $P_{a,k} = 110 \text{ kN}$ . Os pilares de eucalipto roliço, com 30 cm de diâmetro a 1/3 da base menor, são cravados no leito do oceano de forma que o engaste possa ser considerado na base. No topo pode-se considerar apoio móvel que permite somente translação vertical. Pode-se considerar madeira serrada de classe D40, classificada visualmente (SE). O pé-direito é de 11 m. Pede-se verificar se o pilar é adequado para o projeto.

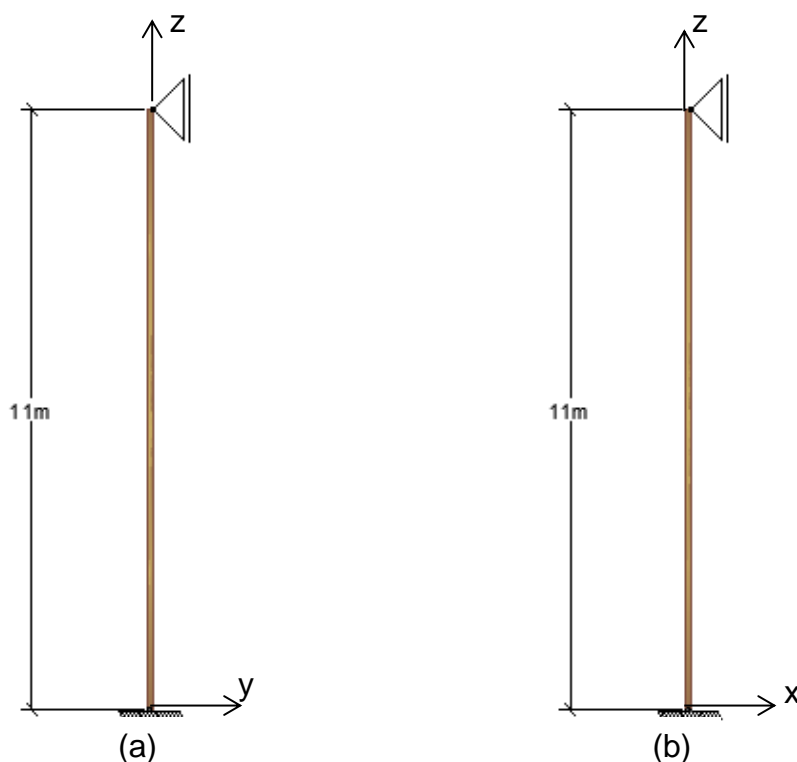


Figura A.5 - Flambagem em torno do eixo xx (a) e flambagem em torno do eixo yy (b)  
Fonte: Autoria Própria.

Resolução:

1. Dados do exercício:

- Madeira serrada Classe D40, submersa, classificada visualmente (SE);
- Seção transversal ( $D = 30 \text{ cm}$ );

- Determinação estática engastado na base e articulado na extremidade superior;
- Carga Permanente aplicada no centro da seção transversal:  $P_{p,k} = 50 \text{ kN}$
- Carga Acidental devido às condições de uso normais de um edifício residencial (geral):  $P_{a,k} = 110 \text{ kN}$

## 2. Combinações dos esforços em ELU

- ELU Permanente:

$$N_{c,d} = 1,3 * (50) = 65000 \text{ N}$$

- ELU Média Duração:

$$N_{c,d} = 1,3 * (50) + 1,5 * (110) = 230000 \text{ N}$$

- Verificação da combinação mais crítica:

- ELU Permanente:

$$N_{c,d,cri} = \frac{N_{c,d}}{k_{mod1}} = \frac{65000}{0,6} = 108333,33 \text{ N}$$

- ELU Média Duração:

$$N_{c,d,cri} = \frac{N_{c,d}}{k_{mod1}} = \frac{230000}{0,8} = 287500 \text{ N}$$

Portanto, a combinação mais crítica é a de Média Duração.

## 3. Propriedades da Madeira

O valor de projeto da resistência à compressão paralela às fibras para a combinação de média duração é calculado pela expressão 18, na qual os valores de  $k_{mod1}$ ,  $k_{mod2}$ ,  $k_{mod3}$  são respectivamente 0,8, 0,65 e 0,9.

$$f_{c0,d} = 0,8 * 0,65 * 0,9 * \frac{40}{1,4} = 13,4 \text{ MPa}$$

Já o módulo de elasticidade característico medido na direção paralela às fibras da madeira ( $E_{0,05}$ ) é calculado pela equação 21.

$$E_{0,05} = 0,7 * E_{c0,m} = 0,7 * 19500 = 13650 \text{ MPa}$$

#### 4. Propriedades Geométricas da Seção Transversal

$$A = \pi * R^2 = 70685,83 \text{ mm}^2$$

$$I_{xx} = I_{yy} = 3,976 * 10^8 \text{ mm}^4$$

#### 5. Verificação do Estado Limite de Serviço (Esbeltez)

A esbeltez deve ser calculada por meio da equação 22:

$$L_0 = K_E * L = 0,8 * 11 \text{ m} = 8,8 \text{ m} = 880 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_0}{i} = \frac{880}{7,5} = 117,33$$

Como  $\lambda < 140$ , então OK.

O elemento está verificado quanto ao ELS de Esbeltez.

#### 6. Verificação dos Estados Limites Últimos

- Verificação da Resistência à Ruptura:

A verificação da resistência à ruptura, para elementos submetidos à compressão é feita por meio da equação 25.

$$\sigma_{c0,d} \leq f_{c0,d}$$

Cálculo da Tensão:

- Combinação de Média Duração:

$$\sigma_{c0,d} = \frac{F}{A} = \frac{230000}{70685,83} = 3,25 \text{ MPa}$$

Como  $f_{c0,d} = 13,4 \text{ MPa}$ , o elemento está verificado quanto à resistência à ruptura.

- Verificação da Estabilidade:

Cálculo da esbeltez relativa de acordo com a equação 25, além disso, como a seção transversal do pilar é circular a verificação da instabilidade pode ser realizada em apenas um dos eixos principais.

$$\lambda_{rel,x} = \frac{117,3}{\pi} \sqrt{\frac{40}{13650}} = 2,02$$

Como o valor da esbeltez relativa é maior que 0,3, as tensões deverão satisfazer as condições impostas nas condições da equação 27.

Assim:

$$K_{cx} = \frac{1}{K_x + \sqrt{K_x^2 - \lambda_{rel,x}^2}}$$

Sendo que,

$$K_x = 0,5 * [1 + \beta_c(\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2]$$

Com  $\beta_c = 0,2$  (Madeira Roliça).

$$K_x = 0,5 * [1 + 0,2(2,02 - 0,3) + 2,02^2] = 2,71$$

$$K_{cx} = \frac{1}{2,71 + \sqrt{2,71^2 - 2,02^2}} = 0,221$$

Verificação da estabilidade:

$$\frac{230000}{\pi * 150^2 * 0,221 * 13,4} \leq 1$$

$1,10 > 1$ , portanto deve-se realizar uma intervenção no projeto.

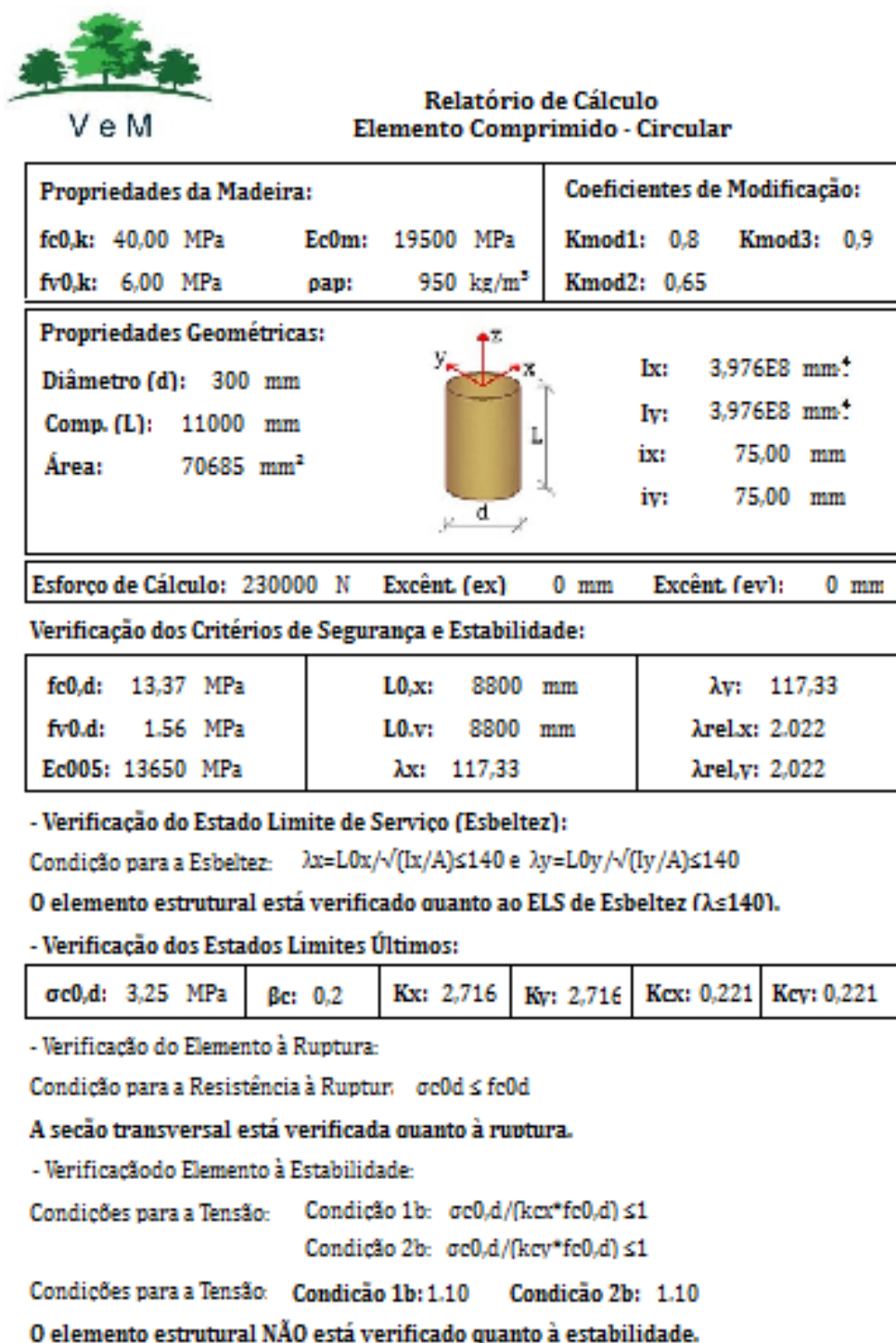
Logo, o elemento estrutural não está verificado quanto à estabilidade.

## 7. Resumo das Verificações

ELS	$\lambda=117,3$	$\leq 140$	OK!
ELU <sub>resistência</sub>	$\sigma_{c0,d}=3,25$ MPa	$\leq f_{c0,d}=13,4$ MPa	OK!
ELU <sub>estabilidade</sub>	1,10	$\leq 1$	NÃO OK!

**Quadro A.3 - Resumo das Verificações do Exemplo 3**  
Fonte: Autoria Própria.

Utilizando o software VeM, obteve-se o seguinte relatório:



03/11/2016 11:13:38

Figura A.6 - Relatório gerado pelo Software VeM (Exemplo 3)  
 Fonte: Autoria Própria.

## APÊNDICE B– Software VeM – Código de implementação do roteiro de cálculo

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
  {--- VAR PROPRIEDADES DO MATERIAL ---}
  fc0d , fv0d, e005, kmod1, kmod2, kmod3, fc0k, fv0k, ec0m, kex,key, L, F, ex, ey: double;
  {--- VAR DA ÁREA ---}
  a_c, a_r, b, h,d : double;
  {--- VAR DA INÉCIA ---}
  lnx_r, lnx_c, lny_r, lny_c :double;
  {--- VAR DO RAIO DE GIRAÇÃO ---}
  ix_r, ix_c,iy_r, iy_c : double;
  {--- VAR DO COMPRIMENTO DE FLAMBAGEM ---}
  L0_x, L0_y : double;
  {--- VAR DA ESBELTEZ ---}
  lambx_r,lamby_r, lambx_c,lamby_c : double;
  {--- VAR DA ESBELTEZ RELATIVA ---}
  lambr_xr, lambr_yr, lambr_xc, lambr_yc : double;
  {--- VAR DA VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ---}
  wx_r, wy_r, wx_c, wy_c, Tc0d :double;
  kx, ky, kcx, kcy, comb1_cx, comb1_cy, comb2_cx, comb2_cy :double;
  comb1_ex, comb2_ex, comb1_ey, comb2_ey, bc, Mx, My, Tmx, Tmy , km, resist_x, resist_y: double;
  verificacao_esb, verificacao_estab, verificacao_resist, porcent, porcent2 :string;
  data : string;
begin

  data:=DateTimeToStr(now);
  if RadioGroup1.ItemIndex = -1 then
  begin
    ShowMessage('Selecione o tipo de Esforço de Cálculo!');
    Exit;
  end;

  if ((Edit15.Text = "") or (Edit15.Text = '0')) and (Edit15.Visible) then
  begin
    ShowMessage('Insira o valor do Esforço de Cálculo!');
    Edit15.SetFocus;
    exit;
  end;

```

```

end;

if ((Edit11.Text = "") or (Edit11.Text = '0')) and (Edit11.Visible) then
begin
    ShowMessage('Insira o valor da Excêntrica em x!');
    Edit15.SetFocus;
    exit;
end;

if ((Edit14.Text = "") or (Edit14.Text = '0')) and (Edit14.Visible) then
begin
    ShowMessage('Insira o valor da Excêntrica em y!');
    Edit15.SetFocus;
    exit;
end;

{--- DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL ---}
fc0d :=0;
fv0d :=0;
e005 :=0;
kmod1:= StrToFloat(editkmod5.Text);
kmod2:= StrToFloat(edit16.Text);
kmod3:= StrToFloat(editkmod4.Text);

fc0k:= StrToFloat(edit1.Text);
fv0k:= StrToFloat(edit2.Text);
ec0m:= StrToFloat(edit3.Text);

kex:= StrToFloat(edit9.Text);
key:= StrToFloat(edit10.Text);
L:= StrToFloat(edit7.Text);
F := StrToFloat(edit15.Text);
ex := StrToFloat(edit11.Text);
ey := StrToFloat(edit14.Text);

fc0d:=((kmod1*kmod2*kmod3*fc0k)/1.4);
fv0d:=((kmod1*kmod2*kmod3*fv0k)/1.8);
e005:=0.7*ec0m;

```



```

{--- PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS ---}

{--- RETANGULO/QUADRADO ---}

if(RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
begin
  b:=StrToFloat(edit5.Text);
  h:=StrToFloat(edit6.Text);
  {ÁREA}
  a_r := b*h;
  {INÉRCIA}
  Inx_r := (b*h*h*h)/12;
  Iny_r := (h*b*b*b)/12;
  {RAIO DE GIRAÇÃO}
  ix_r := sqrt(Inx_r/a_r);
  iy_r := sqrt(Iny_r/a_r);
  {MÓDULO DE RESISTÊNCIA}
  wx_r := (b*h*h)/6;
  wy_r := (h*b*b)/6;

end;

{--- CÍRCULO ---}

```

```

if(RadioGroup2.ItemIndex = 1) then
begin
  d:=StrToFloat(Edit19.Text);
  {ÁREA}
  a_c := ((3.141592654*(d*d))/4);
  {INÉRCIA}
  Inx_c := ((3.141592654*(d*d*d*d))/64);
  Iny_c := ((3.141592654*(d*d*d*d))/64);
  {RAIO DE GIRAÇÃO}
  ix_c := sqrt(Inx_c/a_c);
  iy_c := sqrt(Iny_c/a_c);

```

```
{MÓDULO DE RESISTÊNCIA}
wx_c := (3.141592654*(d*d*d))/32;
wy_c := (3.141592654*(d*d*d))/32;

end;

{--- CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE FLABANGEM EM X-X ---}

if(comboBox2.ItemIndex = 0) then
begin
kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
L := StrToFloat(Edit7.Text);
L0_x:=kex*L;

end;

if(comboBox2.ItemIndex = 1) then
begin
kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
L := StrToFloat(Edit7.Text);
L0_x:=kex*L;

end;

if(comboBox2.ItemIndex = 2) then
begin
kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
L := StrToFloat(Edit7.Text);
L0_x:=kex*L;

end;

if(comboBox2.ItemIndex = 3) then
begin
kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
L := StrToFloat(Edit7.Text);
L0_x:=kex*L;

end;

if(comboBox2.ItemIndex = 4) then
begin
```

```

    kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
    L := StrToFloat(Edit7.Text);
    L0_x:=kex*L;
end;

```

```

    if(comboBox2.ItemIndex = 5) then
begin
    kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
    L := StrToFloat(Edit7.Text);
    L0_x:=kex*L;
end;

```

```

    if(comboBox2.ItemIndex = 6) then
begin
    kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
    L := StrToFloat(Edit7.Text);
    L0_x:=kex*L;
end;

```

```

    if(comboBox2.ItemIndex = 7) then
begin
    kex:=StrToFloat(Edit9.Text);
    L := StrToFloat(Edit7.Text);
    L0_x:=kex*L;
end;

```

{--- CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE FLABANGEM EM Y-Y ---}

```

    if(comboBox4.ItemIndex = 0) then
begin
    key:=StrToFloat(Edit10.Text);
    L := StrToFloat(Edit7.Text);
    L0_y:=key*L;
end;

```

```

    if(comboBox4.ItemIndex = 1) then
begin
    key:=StrToFloat(Edit10.Text);
    L := StrToFloat(Edit7.Text);
    L0_y:=key*L;

```

```
end;
```

```
    if(comboBox4.ItemIndex = 2) then  
begin  
    key:=StrToFloat(Edit10.Text);  
    L := StrToFloat(Edit7.Text);  
    L0_y:=key*L;  
end;
```

```
    if(comboBox4.ItemIndex = 3) then  
begin  
    key:=StrToFloat(Edit10.Text);  
    L := StrToFloat(Edit7.Text);  
    L0_y:=key*L;  
end;
```

```
    if(comboBox4.ItemIndex = 4) then  
begin  
    key:=StrToFloat(Edit10.Text);  
    L := StrToFloat(Edit7.Text);  
    L0_y:=key*L;  
end;
```

```
    if(comboBox4.ItemIndex = 5) then  
begin  
    key:=StrToFloat(Edit10.Text);  
    L := StrToFloat(Edit7.Text);  
    L0_y:=key*L;  
end;
```

```
    if(comboBox4.ItemIndex = 6) then  
begin  
    key:=StrToFloat(Edit10.Text);  
    L := StrToFloat(Edit7.Text);  
    L0_y:=key*L;  
end;
```

```
    if(comboBox4.ItemIndex = 7) then  
begin
```

```

key:=StrToFloat(Edit10.Text);
L := StrToFloat(Edit7.Text);
LO_y:=key*L;
end;

```

```
{--- CÁLCULO DA ESBELTEZ E ESBELTEZ RELATIVA ---}
```

```
if(RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
```

```
begin
```

```
  lambx_r:=LO_x/ix_r;
```

```
  lamby_r:=LO_y/iy_r;
```

```
  lambr_xr := (lambx_r/3.141592654)*sqrt(fc0k/e005);
```

```
  lambr_yr := (lamby_r/3.141592654)*sqrt(fc0k/e005);
```

```
end;
```

```
if(RadioGroup2.ItemIndex = 1) then
```

```
begin
```

```
  lambx_c:=LO_x/ix_c;
```

```
  lamby_c:=LO_y/iy_c;
```

```
  lambr_xc := (lambx_c/3.141592654)*sqrt(fc0k/e005);
```

```
  lambr_yc := (lamby_c/3.141592654)*sqrt(fc0k/e005);
```

```
end;
```

```
if RadioGroup2.ItemIndex = 0 then
```

```
begin
```

```
  if ( lambx_r > 140 ) or ( lamby_r > 140 ) then
```

```
  begin
```

```
    ShowMessage('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto ao ELS de Esbeltez  
( $\lambda > 140$ ).');
```

```
    EXIT;
```

```
  end
```

```
  else begin
```

```
    verificacao_esb := ('O elemento estrutural está verificado quanto ao ELS de Esbeltez  
( $\lambda \leq 140$ ).');
```

```
  end;
```

```
end
```

```
else begin
```

```
  if ( lambx_c > 140 ) or ( lamby_c > 140 ) then
```

```
  begin
```

```

        ShowMessage('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto ao ELS de Esbeltez
( $\lambda > 140$ ). ');
        EXIT;
    end
    else begin
        verificacao_esb := ('O elemento estrutural está verificado quanto ao ELS de Esbeltez
( $\lambda \leq 140$ ). ');
        end;
    end;
end;

```

```
{--- VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA - CARGA CENTRADA - RETANGULO ---}
```

```

if(RadioGroup1.ItemIndex = 0) and (RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
    begin
        F:=StrToFloat(edit15.Text);
        {TENSÃO}
        Tc0d:=F/a_r;

        if Tc0d<=fc0d then
            begin
                verificacao_resist:='A seção transversal está verificada quanto à ruptura.';
            end
        else
            begin
                verificacao_resist:='A seção transversal NÃO está verificada quanto à ruptura.';
            end;
        end;
    end;

```

```
{--- VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE - CARGA CENTRADA - RETANGULO ---}
end;
```

```

if(RadioGroup1.ItemIndex = 0) and (RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
    begin
        F:=StrToFloat(edit15.Text);
        {TENSÃO}
        Tc0d:=F/a_r;
        if(comboBox5.ItemIndex = 0) or (comboBox5.ItemIndex = 1) then
            begin
                bc := 0.2;
            end;
        end;
    end;

```

```

end
else
begin
    bc := 0.1;
end;

kx:=0.5*(1+bc*(lambr_xr-0.3)+(lambr_xr*lambr_xr));
ky:=0.5*(1+bc*(lambr_yr-0.3)+(lambr_yr*lambr_yr));
kcx:=1/(kx+sqrt((kx*kx)-(lambr_xr*lambr_xr)));
kcy:=1/(ky+sqrt((ky*ky)-(lambr_yr*lambr_yr)));

if(lambr_xr<=0.3) and (lambr_yr<=0.3) then
begin
    comb1_cx := (Tc0d/fc0d);

    IF (comb1_cx <=1) then
begin
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade');
    percent := ('Aproveitamento da seção transversal: ' + FormatFloat('#,##0',comb1_cx *
100)+ ' %');
end
else
BEGIN
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à estabilidade.');
```

```

end;
end

else
Begin
    comb2_cx:=(Tc0d/(kcx*fc0d));
    comb2_cy:=(Tc0d/(kcy*fc0d));

    IF (comb2_cx <=1 ) AND (comb2_cy <=1 )then
begin
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade.');
```

```

    percent := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 1b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_cx * 100)+ ' %');
    percent2 := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 2b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_cy * 100)+ ' %');
end
end

```

```

else
begin
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à
estabilidade.');
```

```

end;
end;
end;
```

{--- VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA - CARGA EXCÊNTRICA - RETANGULO ---}

```

if(RadioGroup1.ItemIndex = 1) and (RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
```

```

begin
```

```

    F:=StrToFloat(edit15.Text);
    ex := StrToFloat(edit11.Text);
    ey := StrToFloat(edit14.Text);
    Mx := F*ey;
    My:=F*ex;
```

```

    {TENSÃO}
```

```

    Tc0d := F/a_r;
    Tmx := Mx/wx_r;
    Tmy:=My/wy_r;
```

```

    if(comboBox5.ItemIndex = 0) or (comboBox5.ItemIndex = 1) then
```

```

    begin
```

```

        bc := 0.2;
```

```

    end
```

```

    else bc := 0.1;
```

```

    kx:=0.5*(1+bc*(lambr_xr-0.3)+(lambr_xr*lambr_xr));
```

```

    ky:=0.5*(1+bc*(lambr_yr-0.3)+(lambr_yr*lambr_yr));
```

```

    kcx:=1/(kx+sqrt((kx*kx)-(lambr_xr*lambr_xr)));
```

```

    kcy:=1/(ky+sqrt((ky*ky)-(lambr_yr*lambr_yr)));
```



```

if(RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
  begin
    km:=0.7;
  end
else
  begin;
    km:=1;
  end;

  resist_x := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+(Tmx/fc0d)+(km*(Tmy/fc0d));
  resist_y := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+(Tmy/fc0d)+(km*(Tmx/fc0d));

IF (resist_x <=1) and (resist_y <=1) then
  begin
    verificacao_resist := ('O elemento estrutural está verificado quanto à ruptura.');
```

end

```

  else
  BEGIN
    verificacao_resist := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à ruptura.');
```

end;

{--- VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE - CARGA EXCENTRICA - RETANGULO ---}

```

end;

if(RadioGroup1.ItemIndex = 1) and (RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
  begin
    F:=StrToFloat(edit15.Text);
    ex := StrToFloat(edit11.Text);
    ey := StrToFloat(edit14.Text);
    Mx := F*ey;
    My:=F*ex;

    {TENSÃO}
    Tc0d := F/a_r;
    Tmx := Mx/wx_r;
    Tmy:=My/wy_r;
    if(comboBox5.ItemIndex = 0) or (comboBox5.ItemIndex = 1) then
      begin
```

```

    bc := 0.2;
end
else bc := 0.1;

kx:=0.5*(1+bc*(lambr_xr-0.3)+(lambr_xr*lambr_xr));
ky:=0.5*(1+bc*(lambr_yr-0.3)+(lambr_yr*lambr_yr));
kcx:=1/(kx+sqrt((kx*kx)-(lambr_xr*lambr_xr)));
kcy:=1/(ky+sqrt((ky*ky)-(lambr_yr*lambr_yr)));

if(lambr_xr<=0.3) and (lambr_yr<=0.3) then
begin
    if(RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
begin
    km:=0.7;
end
else
begin;
    km:=1;
end;

comb1_ex := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+(Tmx/fc0d)+(km*(Tmy/fc0d));
comb1_ey := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+(Tmy/fc0d)+(km*(Tmx/fc0d));

IF (comb1_ex <=1) and (comb1_ey <=1) then
begin
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade. ');
    percent := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 1b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb1_ex * 100)+ ' %');
    percent2 := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 2b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb1_ey * 100)+ ' %');
end
else
BEGIN
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à
estabilidade. ');
end;

```

```

    end
  else
  begin
    comb2_ex:= ((Tc0d/(kcx*fc0d))+(Tmx/fc0d)+(km*(Tmy/fc0d)));
    comb2_ey:= ((Tc0d/(kcy*fc0d))+(Tmy/fc0d)+(km*(Tmx/fc0d)));
  end;

  IF (comb2_ex <=1 ) AND (comb2_ey <=1 )then
  begin
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade. ');
    percent := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 1b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_ex * 100)+ ' %');
    percent2 := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 2b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_ey * 100)+ ' %');
  end
  else
  begin
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à
estabilidade. ');
  end;

end;

```

{--- VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA - CARGA CENTRADA - CÍRCULO ---}

```

if(RadioGroup1.ItemIndex = 0) and (RadioGroup2.ItemIndex = 1) then
  begin
    F:=StrToFloat(edit15.Text);
    {TENSÃO}
    Tc0d:=F/a_c;

    if Tc0d<=fc0d then
      begin
        verificacao_resist:=( 'A seção transversal está verificada quanto à ruptura. ');
      end
    else
      begin

```

```

    verificacao_resist:=('A seção transversal NÃO está verificada quanto à ruptura.');
```

end;

```

end;
```

{--- VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE - CARGA CENTRADA - CÍRCULO ---}

```

if(RadioGroup1.ItemIndex = 0) and (RadioGroup2.ItemIndex = 1) then
  begin
    F:=StrToFloat(edit15.Text);
    {TENSÃO}
    Tc0d := F/a_c;
    if(comboBox5.ItemIndex = 0) or (comboBox5.ItemIndex = 1) then
      begin
        bc := 0.2;
      end
    else
      begin
        bc := 0.1;
      end;
    end;

    kx:=0.5*(1+bc*(lambr_xc-0.3)+(lambr_xc*lambr_xc));
    ky:=0.5*(1+bc*(lambr_yc-0.3)+(lambr_yc*lambr_yc));
    kcx:=1/(kx+sqrt((kx*kx)-(lambr_xc*lambr_xc)));
    kcy:=1/(ky+sqrt((ky*ky)-(lambr_yc*lambr_yc)));

    if(lambr_xc<=0.3) and (lambr_yc<=0.3) then
      begin
        comb1_cx := (Tc0d/fc0d);

        IF (comb1_cx <=1) then
          begin
            verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade.');
```

percent := ('Aproveitamento da seção transversal: ' + FormatFloat('#,##0',comb1\_cx \*  
100)+ ' %');

```

end
else
BEGIN
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à estabilidade. ');
end;
end

else
Begin
    comb2_cx:= (Tc0d/(kcx*fc0d));
    comb2_cy:= (Tc0d/(kcy*fc0d));

    IF (comb2_cx <=1 ) AND (comb2_cy <=1 )then
    begin
        verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade');
        percent := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 1b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_cx * 100)+ ' %');
        percent2 := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 2b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_cy * 100)+ ' %');
    end
    else
    begin
        verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à estabilidade. ');
    end;
end;
end;
end;

```

{--- VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA - CARGA EXCÊNTRICA - CÍRCULO ---}

```

if(RadioGroup1.ItemIndex = 1) and (RadioGroup2.ItemIndex = 1) then
begin
    F:=StrToFloat(edit15.Text);
    ex := StrToFloat(edit11.Text);
    ey := StrToFloat(edit14.Text);
    Mx := F*ey;
    My:=F*ex;

    {TENSÃO}

```

```

Tc0d := F/a_c;
Tmx := Mx/wx_c;
Tmy:=My/wy_c;
if(comboBox5.ItemIndex = 0) or (comboBox5.ItemIndex = 1 ) then
begin
    bc := 0.2;
end
else
begin
    bc := 0.1;
end;

```

```

kx:=0.5*(1+bc*(lambr_xc-0.3)+(lambr_xc*lambr_xc));
ky:=0.5*(1+bc*(lambr_yc-0.3)+(lambr_yc*lambr_yc));
kcx:=1/(kx+sqrt((kx*kx)-(lambr_xc*lambr_xc)));
kcy:=1/(ky+sqrt((ky*ky)-(lambr_yc*lambr_yc)));

```

```

if(RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
    begin
        km:=0.7;
    end
else
begin
    km:=1;
end;

```

```

resist_x := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+Tmx/fc0d+(km*(Tmy/fc0d));
resist_y := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+Tmy/fc0d+(km*(Tmx/fc0d));

```

```

IF (resist_x <=1) and (resist_y <=1) then

```

```

    begin
        verificacao_resist := ('O elemento estrutural está verificado quanto à ruptura.');
```

```

    end

```

```

else

```

```

    BEGIN

```

```

        verificacao_resist := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à ruptura.');
```

```

        end;
end;

{--- VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE - CARGA EXCENTRICA - CÍRCULO ---}

if(RadioGroup1.ItemIndex = 1) and (RadioGroup2.ItemIndex = 1) then
begin
    F:=StrToFloat(edit15.Text);
    ex := StrToFloat(edit11.Text);
    ey := StrToFloat(edit14.Text);
    Mx := F*ey;
    My:=F*ex;

    {TENSÃO}
    Tc0d := F/a_c;
    Tmx := Mx/wx_c;
    Tmy:=My/wy_c;
    if(comboBox5.ItemIndex = 0) or (comboBox5.ItemIndex = 1 ) then
begin
    bc := 0.2;
end
else
begin
    bc := 0.1;
end;

    kx:=0.5*(1+bc*(lambr_xc-0.3)+(lambr_xc*lambr_xc));
    ky:=0.5*(1+bc*(lambr_yc-0.3)+(lambr_yc*lambr_yc));
    kcx:=1/(kx+sqrt((kx*kx)-(lambr_xc*lambr_xc)));
    kcy:=1/(ky+sqrt((ky*ky)-(lambr_yc*lambr_yc)));

    if(lambr_xc<=0.3) and (lambr_yc<=0.3) then
begin
    if(RadioGroup2.ItemIndex = 0) then
begin

```

```

    km:=0.7;
  end
else
begin
  km:=1;
end;

comb1_ex := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+(Tmx/fc0d)+(km*(Tmy/fc0d));
comb1_ey := ((Tc0d/fc0d)*(Tc0d/fc0d))+(Tmy/fc0d)+(km*(Tmx/fc0d));

IF (comb1_ex <=1) and (comb1_ey <=1) then
  begin
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade. ');
    percent := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 1b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb1_ex * 100) + ' %');
    percent2 := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 2b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb1_ey * 100)+ ' %');

  end
else
  BEGIN
    verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à
estabilidade. ');
  end;
end
else
begin
  comb2_ex:= ((Tc0d/(kcx*fc0d))+(Tmx/fc0d)+(km*(Tmy/fc0d)));
  comb2_ey:= ((Tc0d/(kcy*fc0d))+(Tmy/fc0d)+(km*(Tmx/fc0d)));

  IF (comb2_ex <=1) and (comb2_ey <=1) then
    begin
      verificacao_estab := ('O elemento estrutural está verificado quanto à estabilidade ');
      percent := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 1b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_ex * 100)+ ' %');
      percent2 := ('Aproveitamento da seção transversal para Condição 2b: ' +
FormatFloat('#,##0',comb2_ey * 100)+ ' %');
    end
  else
    BEGIN

```



```
verificacao_estab := ('O elemento estrutural NÃO está verificado quanto à
estabilidade.');
```

```
end;
```

```
end;
```

```
end;
```

## **APÊNDICE C– Software VeM – Verificação de Elementos em Madeira**

O software VeM – Verificação de Elementos em Madeira desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso, é disponibilizado através de contato pelo e-mail [fscofani@gmail.com](mailto:fscofani@gmail.com), informando o seu nome completo, cidade, universidade e solicitando a versão atualizada.