

Dimensionamento das Ligações de um Mezanino em Estruturas de Madeira

Fernando Lucio de Faria Neto¹, Igor Charlls Siqueira Leite²

Centro Universitário Augusto Motta / Pós-Graduação em Engenharia Estrutural / fernanddolucio@yahoo.com.br

Centro Universitário Augusto Motta / Pós-Graduação em Engenharia Estrutural / igor.leite@unisuam.edu.br

Resumo

Percebe-se no Brasil uma escassez e grande dificuldade em encontrar bibliografias que abordem o dimensionamento e detalhamento de ligações de estruturas de madeira de forma abrangente e aprofundada, do ponto de vista do que é, de fato, utilizado na prática, em suas mais diversas formas. Este trabalho tem o propósito de demonstrar o processo de cálculo de ligações em estruturas de madeira, demonstrando todo o processo, tendo como base um mezanino totalmente modelado e dimensionado em madeira no software Cype3D. A partir deste modelo, verificou-se os esforços resultantes da edificação e a partir desse resultado, foi realizado o dimensionamento, permitindo, desta forma, que o respectivo projeto sirva como base para outros projetos estruturais em madeira. Após o dimensionamento da estrutura, será demonstrado, ao longo do desenvolvimento deste trabalho, o roteiro dos cálculos e verificações necessárias, tendo como base, majoritariamente, normas que embasam os cálculos em estruturas de madeira e aço (ABNT NBR 7190:1997 e ABNT NBR 8800:2008), uma vez que as ligações são compostas e resistidas pela atuação conjunta destes dois materiais. Após as verificações pertinentes, o detalhamento é demonstrado ao final do trabalho, após todo o processo de cálculo.

Palavras-chave

Ligação; Detalhamento; Projeto Estrutural; Dimensionamento; Estruturas de Madeira.

Introdução

Em um projeto estrutural de estruturas compostas por materiais pré-fabricados, como a madeira e o aço, uma das etapas mais importantes, devido ao seu grau de importância no comportamento estrutural, é a do dimensionamento das ligações. Como são responsáveis por assegurar a união e a transmissão de esforços entre os elementos de uma estrutura, estão diretamente relacionadas à segurança da construção, tendo, portanto, importância fundamental no projeto. Além disso, estão relacionadas também ao aspecto financeiro da obra, uma vez que as ligações podem ser preponderantes no custo final do projeto na medida em que, dependendo da sua complexidade, pode representar um aumento de três vezes ou mais em relação a uma ligação mais simples (BELLEI, 2008).

Somado a isso, temos o fato de, no geral, as ligações serem o ponto mais fraco de uma estrutura, o que acaba demandando cuidados e atenção ainda maiores neste aspecto específico de elementos estruturais ligados.

Dada a importância do tema abordado e a carência de obras referentes ao processo de cálculo, dimensionamento e detalhamento de ligações em estruturas de madeira disponíveis para consulta e embasamento para futuros trabalhos similares, este material tem como objetivo fomentar o desenvolvimento do tema por outros autores, além, dele mesmo, servir como referência.

Estrutura e geometria do modelo

A estrutura que irá servir de base para o cálculo das ligações consiste em um mezanino com as dimensões indicadas na Figura 1 e cujos elementos estruturais foram previamente dimensionados através do software Cype3D.

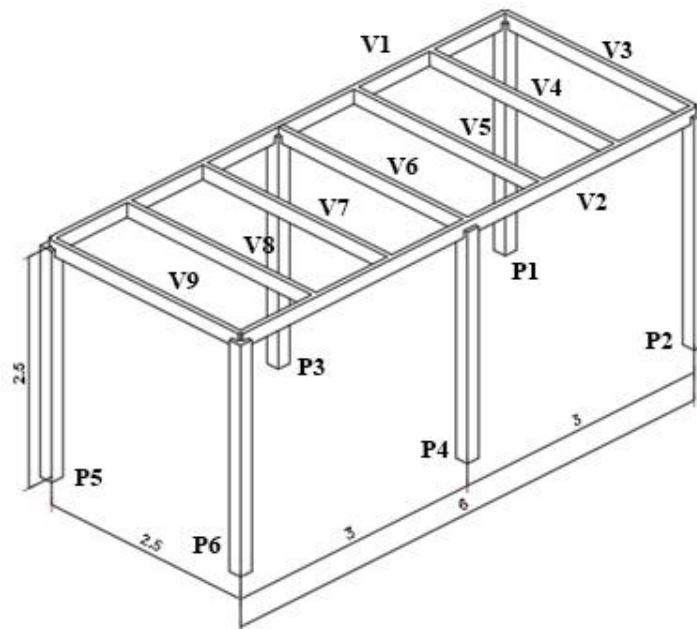


Figura 1 - Modelo 3D da estrutura do mezanino e identificação dos elementos

Todas as vigas possuem seção comercial de 6x12cm e os pilares possuem seção comercial de 15x15cm. Em relação à vinculação das barras do modelo estrutural, todos os nós da estrutura são do tipo rotulados, inclusive a ligação do pilar com o bloco de fundação.

Materiais

Os materiais componentes da estrutura são: a madeira, no que diz respeito aos elementos estruturais que terão as ligações calculadas e analisadas; e o aço, que abrange os parafusos, pinos e chapas que compõem os elementos de ligação.

A madeira utilizada é da espécie Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), da categoria dicotiledônea, classe de resistência C40 e isenta de defeitos (PFEIL, 2003).

Em relação ao aço, nas ligações parafusadas, a conexão será feita através de parafusos comuns, de especificação ASTM A307. Como a especificação ASTM A307 não indica tensão de escoamento para este aço, necessária ao cálculo de sua resistência nas ligações, é tomado o valor nominal de 310 MPa, que é considerado conservador (PFEIL, 2003 apud BREYER, 1999). Já a tensão máxima de ruptura é de 415 MPa. Para as chapas, serão usados aço ASTM A36, com resistências nominais de 250 MPa para a resistência ao escoamento e 400 MPa para resistência à ruptura.

Metodologia e parâmetros de cálculo

Serão dimensionados os seguintes tipos de ligação: ligação viga-viga, ligação viga-pilar e ligação de base dos pilares. Todas as ligações serão do tipo parafusada. Os carregamentos foram levados em consideração a partir do estabelecido na NBR 6120:2020. Já a metodologia de cálculo dos elementos estruturais, de madeira e das ligações, será embasada segundo as normas NBR 7190:1997 e NBR 8800:2008.

A carga a ser suportada pelo mezanino é de 200kgf/m². A cidade do Rio de Janeiro foi usada como base para a escolha da madeira e a determinação do seu k_{mod} , que será calculado considerando um carregamento de longa duração e classe 2 de umidade. Na Figura 2 é possível verificar o modelo estrutural utilizado para o trabalho.

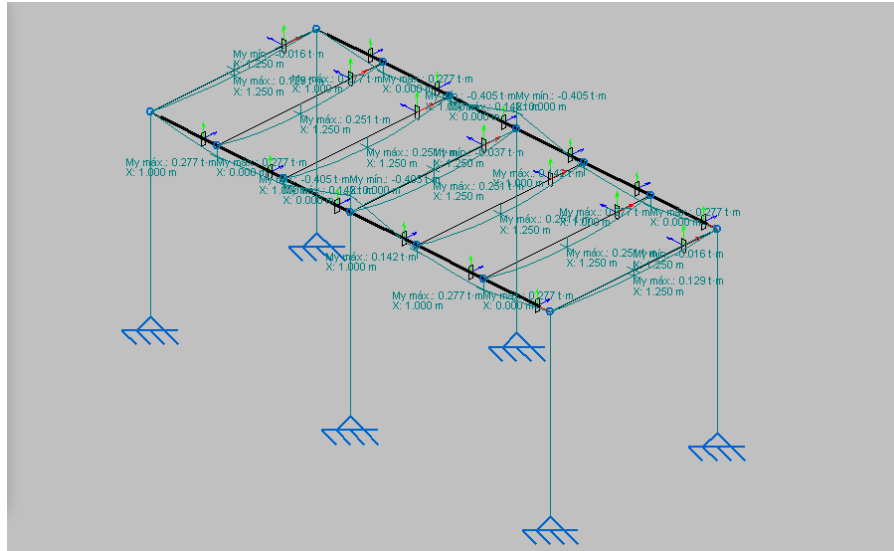


Figura 2- Modelo estrutural considerado no trabalho

Ligação viga-viga

Será tomada como base a ligação entre as vigas V1 e V7. A solução será, então, adotada para as demais ligações do mesmo tipo, uma vez que, neste caso, especificamente, todas estão sujeitas ao mesmo esforço de cálculo. Primeiramente, calculam-se os parâmetros iniciais segundo a NBR 7190:1997, de acordo com as Eq. 1 e 2:

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

$$k_{\text{mod}} = 0,7 \cdot 0,9 \rightarrow k_{\text{mod}} = 0,63$$

$$f_{c0,k} = 0,7 f_{c0} \quad (2)$$

$$f_{c0,k} = 0,7 \cdot 62 \rightarrow f_{c0,k} = 43,4 \text{ Mpa}$$

Tensão resistente ao embutimento normal às fibras

Como, na ligação viga-viga, o embutimento da madeira em ambos os elementos ocorre no sentido normal às fibras (Equação 3), o modo de falha se dá nesse sentido. Portanto:

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

$$f_{e90,d} = 0,25 \cdot 0,63 \cdot \frac{43,4}{1,4} \cdot 1,95 \rightarrow f_{e90,d} = 9,52 \text{ Mpa}$$

Resistência do parafuso em apoio na madeira

Segundo a NBR 7190:1997, a resistência total de um pino de ligação é dada pela soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte. Além disso, os parafusos devem ter diâmetro não menor do que 10mm e resistência característica de escoamento, f_{yk} de, pelo menos, 240 MPa. Além disso, o valor de cálculo da resistência de um pino em referente a uma única seção de corte é dado por (Equação 4):

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (4)$$

Onde t é a espessura da madeira e d é o diâmetro do pino, tendo, como limite (Equação 5):

$$\beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (5)$$

Para $\beta \leq \beta_{\text{lim}}$, ocorre embutimento na madeira e a resistência se dá pela seguinte expressão (Equação 6):

$$R_d = 0,4 \cdot f_{ed} \cdot t \cdot d \quad (6)$$

Para $\beta > \beta_{\text{lim}}$, ocorre flexão do pino e a resistência se dá pela seguinte expressão (Equação 7):

$$R_d = 0,5 \cdot d^2 \sqrt{f_{ed} \cdot f_{yd}} \quad (7)$$

Aplicando-se a Equação 5, tem-se, portanto:

$$\beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{310/1,1}{9,52}} = 6,8$$

Viga secundária

Como será usado o sistema de cantoneiras duplas, os parafusos da viga transversal estarão sujeitos a corte duplo. Portanto, de acordo com a Equação 4, tem-se: $\beta = \frac{60}{2 \cdot 9,5} = 3,16$

Como $\beta \leq \beta_{\text{lim}}$, o mecanismo de falha se dá por embutimento da madeira. Aplicando-se a Equação 6:

$$R_d = 0,4 \cdot 9,52 \cdot \frac{60}{2} \cdot 9,5 = 1085\text{N} = 1,09\text{kN}$$

Como a resistência é dada pelas somas das respectivas seções de corte, tem-se que a resistência dos pinos é igual a: $R_d = 2 \cdot 1,09 = 2,18\text{ kN}$

Viga principal

Os parafusos que compõem a ligação na viga lateral estão submetidos a corte simples, uma vez que, apesar de serem usadas 2 cantoneiras, ambas estão conectadas ao mesmo lado da viga. Conforme a Eq. 4: $\beta = \frac{60}{9,5} = 6,32$

Com $\beta \leq \beta_{\text{lim}}$, tem-se: $R_d = 0,4 \cdot 9,52 \cdot \frac{60}{2} \cdot 9,5 = 1,09\text{ kN}$

Resistência do parafuso em apoio na chapa de aço

De acordo com a NBR 8800:2008, para um plano de corte:

$$R_d = \Phi \cdot 3 \cdot d \cdot t \cdot f_u \quad (8)$$

Onde: $\Phi = 0,75$; t é a espessura da chapa e f_u é a resistência à ruptura da chapa de aço.

Para cada uma das vigas ligadas, serão adotados parafusos de $\varnothing 9,5\text{mm}$. Além disso, será usado o perfil cantoneira de abas iguais, com $t = 6,35\text{mm}$, conforme especificação da tabela de perfis comerciais da Gerdau.

Como os parafusos da viga secundária estão submetidos a corte duplo, tem-se:

$$R_d = 0,75 \cdot 3 \cdot 0,95 \cdot 0,635 \cdot 40 \cdot 2 = 109 \text{ kN}$$

Já na viga principal, os parafusos estão sujeitos a corte simples. Logo, será utilizada a Equação 8:

$$R_d = 0,75 \cdot 3 \cdot 0,95 \cdot 0,635 \cdot 40 = 54 \text{ kN}$$

Resistência ao corte de um parafuso

Segundo a NBR 8800:2008, para um plano de corte, aplica-se a seguinte expressão (Equação 9):

$$R_d = \Phi \cdot (0,7 \cdot A_g) \cdot (0,6 \cdot f_u) \quad (9)$$

Onde: $\Phi = 0,60$; A_g é a área bruta do parafuso e f_u é a tensão de ruptura do parafuso.

Sendo assim, para a viga secundária, temos: $R_d = 0,6 \cdot (0,7 \cdot 0,71) \cdot (0,6 \cdot 41,5) \cdot 2 = 14,85 \text{ kN}$

Para a viga principal: $R_d = 0,6 \cdot (0,7 \cdot 0,71) \cdot (0,6 \cdot 41,5) = 7,43 \text{ kN}$

Quantidade necessária de parafusos

Para ambas as vigas, a resistência da ligação é determinada pela resistência ao embutimento da madeira, que possui o menor valor entre os demais valores de resistência referentes à ligação parafuso-chapa de aço.

A solicitação de esforço cortante de projeto para a viga secundária vale $V_d = 4,43 \text{ kN}$. Já para a viga principal, o esforço vale $V_d = 6,05 \text{ kN}$, conforme a envoltória de esforços encontrada durante o dimensionamento prévio. Com isso, tem-se a quantidade necessária de parafusos para ambos os elementos:

$$\text{Para a viga secundária: } \frac{4,43}{2,18} = 2,03 \approx 2 \text{ parafusos}$$

$$\text{Para a viga principal: } \frac{6,05}{1,09} = 5,55 \approx 6 \text{ parafusos (3 em cada cantoneira)}$$

Verificação da cantoneira

A cantoneira da ligação deve ser verificada quanto ao escoamento da seção bruta e à ruptura da seção com furos. Adotando o perfil de 4" comercial da Gerda, a verificação se dá conforme abaixo:

Escoamento da seção bruta

Segundo a NBR 8800:2008, a resistência da seção bruta é obtida através da expressão a seguir (Equação 10):

$$R_d = \frac{A_g \cdot f_y}{1,1} \quad (10)$$

Como serão utilizadas 2 cantoneiras, tem-se: $R_d = 2 \cdot \frac{12,51 \cdot 25}{1,1} = 569 \text{ kN}$

Ruptura da seção com furos

A área líquida é a área bruta descontada das áreas dos furos contidos na linha de ruptura da seção reta (PFEIL, 2008). A Figura 2.a indica como será realizado o detalhamento da ligação. Como é possível notar, a seção transversal da cantoneira contém 2 furos na linha de ruptura (Figura 2.b). A visualização fica mais fácil ao fazer o rebatimento de uma das abas da cantoneira (Figura 2.c).

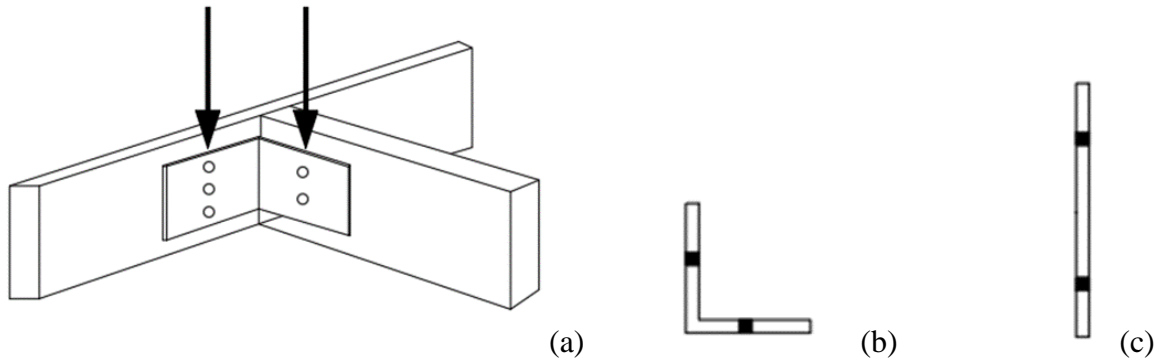


Figura 3- Modelo de ligação viga-viga e demonstração da linha de ruptura

Para a determinação da área líquida, tem-se (Equação 11):

$$A_n = A_g - (n \cdot dt \cdot t) \quad (11)$$

Onde n é a quantidade de parafusos na linha de ruptura e dt é o diâmetro total do furo, que é igual ao diâmetro do parafuso mais uma folga de 3,5mm. Com isso, tem-se: $A_n = 12,51 - (2 \cdot 1,3 \cdot 0,635) = 10,9 \text{ cm}^2$

Para o cálculo da resistência da seção líquida, segundo a NBR 8800:2008 (Equação 12):

$$R_d = \frac{A_n \cdot f_u}{1,35} \quad (12)$$

Como serão utilizadas duas cantoneiras, então: $R_d = 2 \cdot \frac{10,9 \cdot 40}{1,35} = 646 \text{ kN}$

Como $S_d < R_d$, o perfil atende aos critérios de verificação da NBR 8800:2008.

Ligação viga-pilar

Para a ligação viga-pilar, será tomada, como base de cálculo, a ligação correspondente ao ponto de maior sollicitação na estrutura referente à união viga-pilar, entre uma viga secundária e um pilar, e está será replicada às demais ligações do mesmo tipo. Diferentemente da viga, o embutimento no pilar ocorre no sentido paralelo às fibras. A NBR 7190:1997 indica a seguinte relação (Equação 13):

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (13)$$

Tem-se, portanto: $f_{e0,d} = 0,63 \cdot \frac{43,4}{1,4} = 19,5 \text{ kN}$

Logo, no caso do pilar, a resistência do parafuso apoiado na madeira se dá por: $\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{310/1,1}{19,5}} = 4,75$

Com $\beta \leq \beta_{lim}$, ocorre embutimento na madeira. No pilar, o parafuso está submetido a corte simples, logo:

$$R_d = 0,4 \cdot 19,5 \cdot \frac{60}{2} \cdot 9,5 = 2,22 \text{ kN}$$

Como dito anteriormente, o parafuso no pilar está sujeito à corte simples. Sendo assim, os demais valores de resistência são os mesmos calculados previamente na ligação viga-viga para a viga principal, também em corte simples. No caso da viga que se liga ao pilar, as resistências calculadas anteriormente também são válidas para esta ligação. Desta forma, o fator determinante para o dimensionamento da ligação viga-pilar também é a resistência ao embutimento na madeira, que é o menor valor entre as resistências calculadas.

A solicitação de projeto para o esforço cortante, de acordo com o dimensionamento, é: $V_d = 4,43 \text{ kN}$. A quantidade de parafusos necessária à ligação é, portanto:

$$\text{Para a viga secundária: } \frac{4,43}{2,18} = 2,03 \approx 2 \text{ parafusos}$$

$$\text{Para o pilar: } \frac{4,43}{2,22} = 1,995 \approx 2 \text{ parafusos}$$

Para a mesma cantoneira e a mesma quantidade de furos na linha de ruptura da ligação viga-viga, sabe-se que o perfil resiste aos esforços solicitantes com folga.

Ligação de base

Para a ligação de base dos pilares, será utilizada uma chapa metálica ancorada a um bloco de concreto. A parte externa da chapa será parafusada ao pilar, de forma a garantir o desempenho da ligação rotulada pré-determinada no modelo estrutural. A Figura 3 ilustra o modelo da ligação a ser dimensionada.

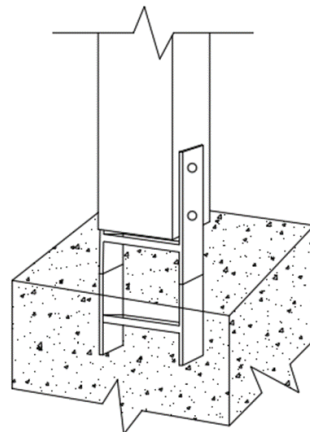


Figura 4- Modelo de ligação de base

Será usada uma chapa de aço ASTM A36, com 10mm de espessura e 100mm de largura. Os parafusos serão os mesmos das ligações anteriores, ou seja, $\varnothing 9,5 \text{ mm}$. Verifica-se, então, a resistência da chapa e, em seguida a do parafuso. Ao final, determina-se o comprimento de ancoragem da chapa metálica no bloco de concreto.

Verificação da chapa metálica

Para a verificação do escoamento da seção bruta, conforme já visto na Eq. 10: $R_d = \frac{(10 \cdot 1) \cdot 25}{1,1} = 227,3 \text{ kN}$

Verificação da ruptura da área líquida (Equação 11):

$$\begin{aligned} dt &= 9,5 + 3,5 = 13 \text{ mm} = 1,3 \text{ cm} \\ A_n &= 10 - (1 \cdot 1,3) \cdot 1 = 8,7 \text{ cm}^2 \\ R_d &= \frac{8,7 \cdot 40}{1,35} = 257,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

A carga de projeto, no pilar mais carregado (centro), vale: 16,77kN (valor oriundo da envoltória obtida durante o processo de dimensionamento). A chapa, portanto, atende com folgas às solicitações de projeto.

Verificação dos parafusos

Para a verificação da resistência dos parafusos, a NBR 8800:2008 fornece a seguinte expressão (Eq.14):

$$R_d = \frac{0,4 \cdot A_g \cdot f_u}{1,35} \quad (14)$$

Para parafusos A307, a resistência à ruptura f_u é igual a 415Mpa. ou 41,5kN/cm².

$$A_g = \frac{\pi \cdot 0,95^2}{4} = 0,71 \text{ cm}^2 \text{ e, logo: } R_d = \frac{0,4 \cdot 0,71 \cdot 41,5}{1,35} = 8,73 \text{ kN}$$

Usando 2 parafusos, tem-se que: $R_d = 17,46\text{kN} > S_d = 16,77 \text{ kN}$

Portanto, 2 parafusos com Ø 9,5mm suportam a carga de projeto na ligação.

Comprimento de ancoragem da chapa

O comprimento de ancoragem necessário é dado por (Equação 15):

$$L_{bnec} = \frac{N_d}{1,4 \cdot f_{ck} \cdot t} \quad (15)$$

Para um concreto de $f_{ck} = 30\text{Mpa}$ (considerado neste dimensionamento), tem-se: $L_{bnec} = \frac{16,77}{1,4 \cdot 3 \cdot 1} = 4 \text{ cm}$

O comprimento mínimo de ancoragem é dado por $12 \cdot t$. Logo: $L_{b\text{mín}} = 12 \cdot 1 = 12 \text{ cm}$

Adota-se, portanto, o comprimento de ancoragem de 12cm.

Detalhamento

O detalhamento das ligações foi feito de acordo com o que determina o item 8.6.1 da NBR 7190:1997. Abaixo, são apresentados os detalhes de cada ligação do projeto (Figuras 5, 6 e 7).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Detalhamento da ligação viga-viga

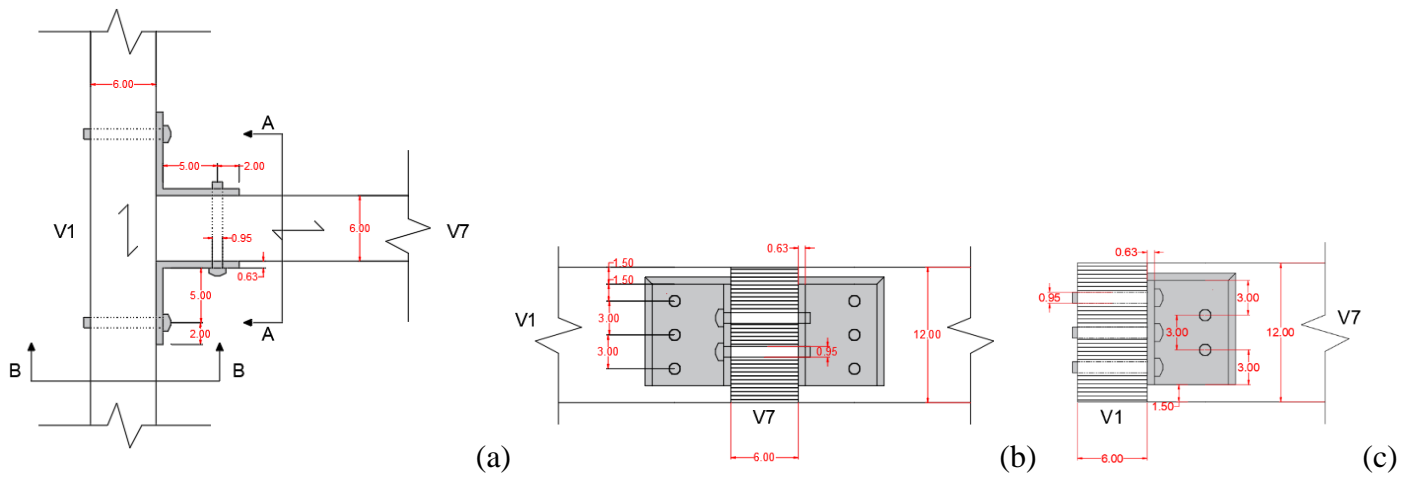


Figura 5 - Ligação viga-viga: (a) Vista superior. Detalhe; (b) Corte A-A; (c) Corte B-B

Detalhamento da ligação viga-pilar

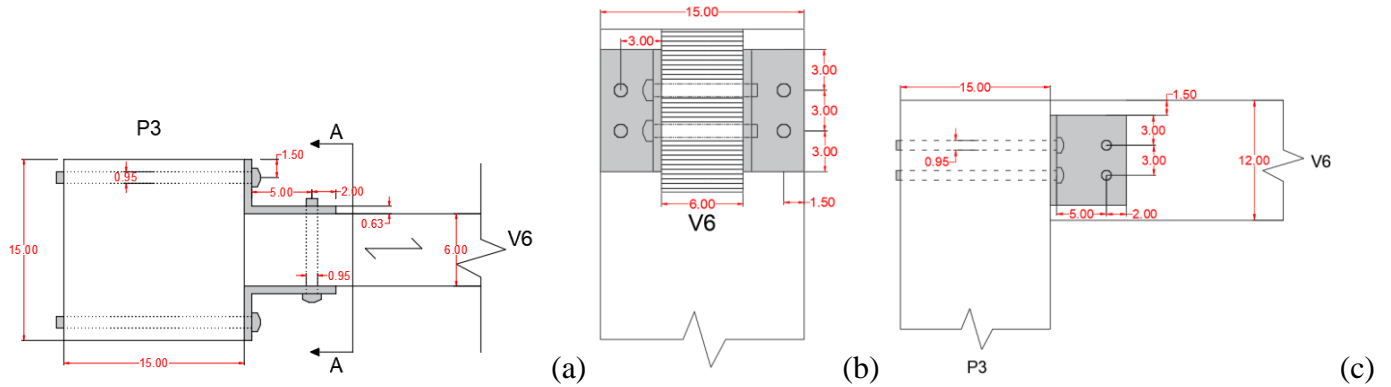


Figura 6- Ligação viga-pilar: (a) Vista superior. Detalhe; (b) Corte A-A; (c) Vista lateral

Detalhamento da ligação de base

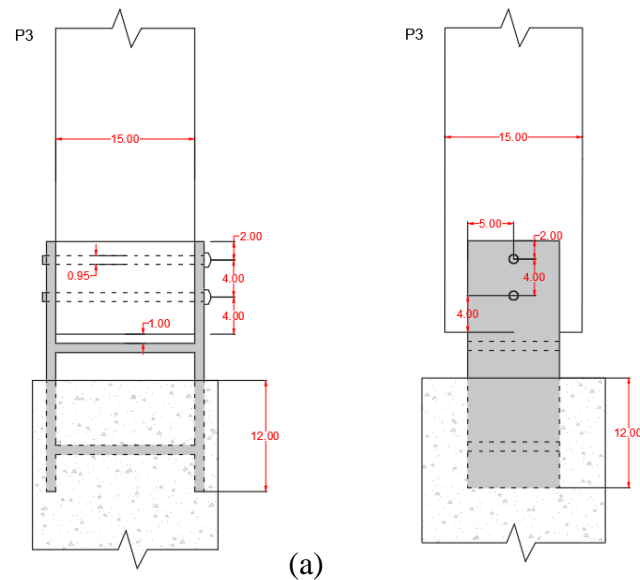


Figura 7- Ligação de base: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal

Conclusões

O trabalho buscou desenvolver as metodologias de cálculo para o dimensionamento de ligações em estruturas de madeira, que englobam também cálculos de elementos em aço, uma vez que são os dois materiais agindo de forma conjunta que compõem as ligações de fato. Para isso, foram apresentadas e seguidas as normas que norteiam o estudo e a execução dos cálculos. Verificou-se que, para que se tenha um dimensionamento seguro de tais ligações, é necessário que se façam adaptações entre os códigos brasileiros de estruturas de madeira e de estruturas metálicas laminadas a quente. Ressalta-se que a escassez de bibliografias que abordam o tema de forma aprofundada dificulta o desenvolvimento do estudo, mostrando que há, ainda, um vasto caminho a percorrer e enorme oportunidade de produzir-se materiais pioneiros sobre o assunto abordado a nível nacional, levando em consideração que já foram realizados diversos estudos no Brasil e no exterior sobre o dimensionamento de ligações de madeira – contudo, poucos trabalhos consolidam estes estudos de uma forma prática ao engenheiro de projetos.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120:2019 Ações para o Cálculo de Estruturas de Edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 60p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190:1997 Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:2008 Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237p.
- BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. Edifícios de Múltiplos Andares em Aço. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008. 556p.
- BREYER, D.; FRIDLEY, K.; COBEEN, K. Design of Wood Structures. ASD 4th ed. McGraw-Hill, USA, 1999
- PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Aço: Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 357p.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Madeira. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224p.