

COMPARATIVO ENTRE LIGAÇÕES RÍGIDAS SIMÉTRICAS COM PERFIS T LAMINADOS (LT/LMTS) E LIGAÇÕES RÍGIDAS COM CHAPAS DE CABEÇA PARAFUSADAS ASSIMÉTRICAS (LMPA): ANÁLISE DE RESISTÊNCIA VERSUS PESO DE SEUS ELEMENTOS CONSTITUINTES

Tatiane Caetano Fernandes de Lima (Graduação – PUC Minas) E-mail: tatianecaetanofl@gmail.com
Paula Cristina de Lima Bastos (Graduação – PUC Minas) E-mail: pclbastos16@gmail.com
Lara de Paula Werneck (Graduação – PUC Minas) E-mail: larawerneck85@gmail.com
Mateus Viana de Nazaré (Graduação – PUC Minas) E-mail: mateusviana44@gmail.com
William Luiz Fernandes (Professor do Departamento de Engenharia Civil – PUC Minas) E-mail: wlfernandes13@gmail.com*

*Email para correspondência

Resumo: Neste trabalho foi realizado um comparativo entre a força resistente de cálculo (Momento Fletor, Força Nortante e Força Normal) para ligações metálicas do tipo rígidas simétricas com perfis “T” laminados (LT/LMTS) e rígidas com chapas de cabeça parafusada assimétricas (LMPA). Gráficos Resistência versus peso dos elementos que constituem a ligação foram elaborados. A formulação para cada tipo de ligação foi apresentada, e duas rotinas computacionais de cálculo foram implementadas em WxMaxima para obtenção dos esforços resistentes. As rotinas computacionais foram validadas com os exemplos de literatura.

Palavras-chave: Ligações Metálicas, WxMaxima, LMPA, LT/LMTS, dimensionamento.

COMPARISON BETWEEN SYMMETRIC RIGID STEEL CONNECTIONS WITH HOT-ROLLING WIDE-FLANGE T PROFILES (LT / LMTS) AND RIGID STEEL CONNECTIONS WITH ASYMMETRIC BOLTED EXTENDED END PLATES (LMPA): STRENGTH VERSUS WEIGHT ANALYSIS OF ITS ELEMENTS

Abstract: In this work, a comparison was made between the strength design (Bending Moment, Shear Force and Normal Force) for symmetric rigid steel connections with hot-rolling wide-flange T profiles (LT / LMTS) and rigid steel connections with asymmetric bolted extended end plates (LMPA). Strength versus weight graphs of the elements that make up the bond was elaborated. The formulation for each type of connection was presented, and two computational codes were implemented in WxMaxima to obtain the strength values. The computational routines were validated with the literature examples.

Keywords: Steel Connections, WxMaxima, LMPA, LT/LMTS, design.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Bellei e Pinho (2008), ligação é definida como a junção de dois membros ou peças de uma estrutura, em particular as de aço. Além disso, os referidos autores enfatizam que as ligações devem ser tratadas com cuidado, pois dependendo de sua complexibilidade, podem custar três vezes a mais que as usuais.

Bellei, Pinho (2008), bem como Fakury et al. (2017) afirmam que as ligações usuais em edifícios de múltiplos andares são: ligação entre vigas e pilares; ligação entre vigas; emenda de pilares; emenda de vigas. A Figura 1 ilustra uma das formas de ligação entre vigas,

no qual a viga de maior alma, e consequentemente maior inércia, suporta uma viga de menor seção.

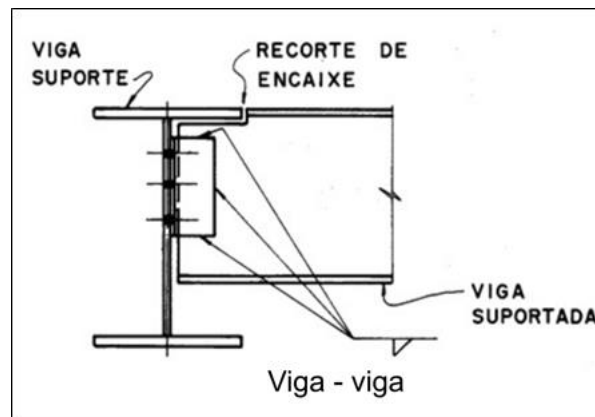


Figura 1: Ligação entre Vigas. Fonte: Vasconcellos (2011).

A Ligação de vigas e pilares, conforme apresentado na Figura 2, são ligações consideradas como flexíveis, ou seja, a rotação relativa entre as barras unidas, de perfis I ou H, variam consideravelmente. A Ligação entre vigas, também, na maioria das vezes, são ligações flexíveis, e assim como nas ligações de vigas e pilares, é recomendado projetar a altura dos elementos de ligação igual ou superior a metade da altura total do perfil da viga suportada.



Figura 2: Ligação entre Vigas e Pilares. Fonte: Fakury *et al* (2016).

A emenda de pilares, conforme ilustra a Figura 3, ocorre quando o pilar tem comprimento superior aos seus elementos isolados, por restrição de transporte ou de fábrica, ou então, quando ocorre restrição da seção transversal do pilar conforme o aumento da altura da edificação.

A emenda entre vigas ocorre quando a viga é composta por elementos menores que seu comprimento total, por restrição de transporte ou de fábrica. A Figura 4 apresenta desenho técnico de uma emenda entre vigas parafusada com talas (a) e uma emenda entre vigas de forma soldada (b).

Como as ligações, os conectores têm sua importância na estrutura. De acordo com Pfeil (2009), conector é um meio de união que trabalha através de furos feitos nas chapas.

Desse modo, em estruturas usuais, encontram-se os seguintes tipos de conectares: rebites, parafusos comuns e parafusos de alta resistência.

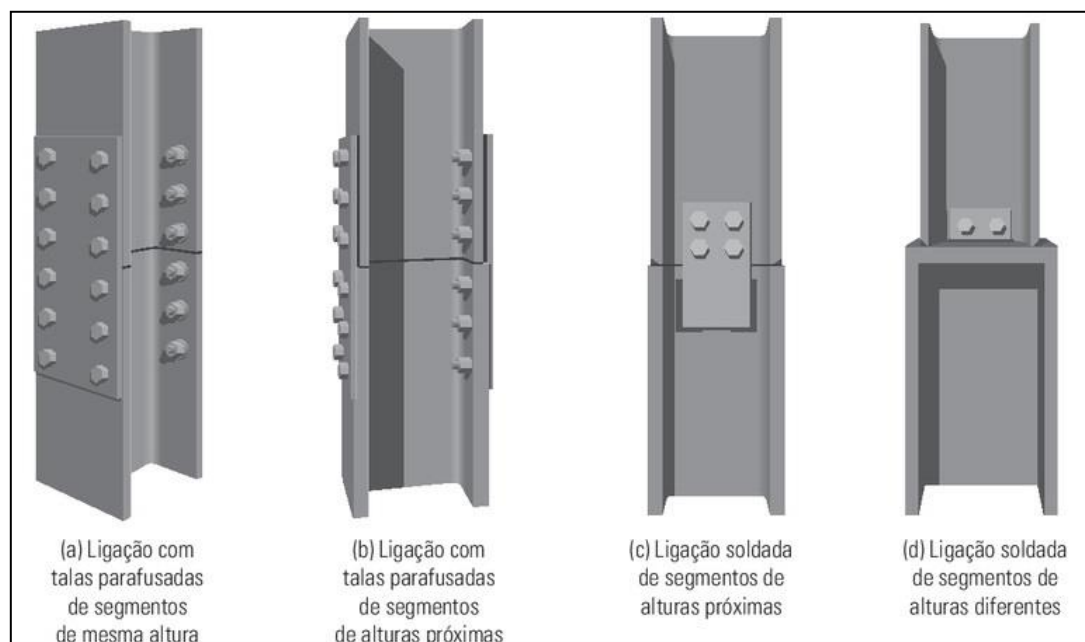


Figura 3: Emenda de Pilares. Fonte: Fakury *et al* (2016)

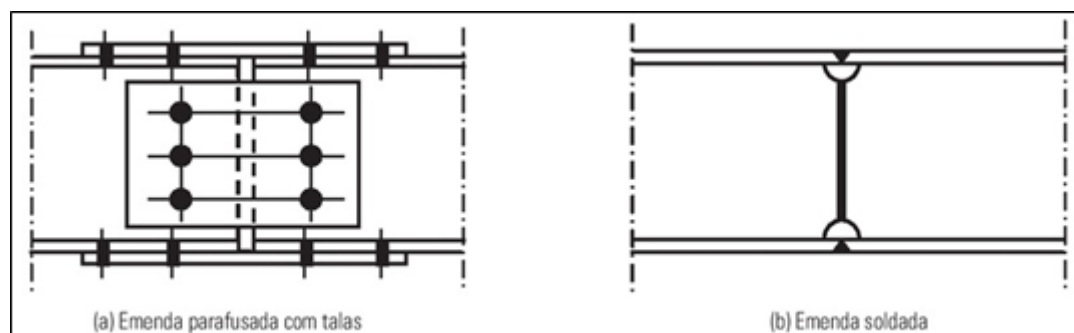


Figura 4: Emenda de Vigas. Fonte: Fakury *et al* (2016)

Rebites são conectores instalados a quente, o produto final apresenta duas cabeças. Pelo resfriamento, o rebite aperta as chapas entre si; o esforço de aperto é, entretanto, muito variável, não podendo garantir um valor mínimo a considerar nos cálculos.

Os parafusos comuns são forjados com aço-carbono de baixo teor de carbono. Eles têm numa extremidade uma cabeça quadrada ou sextavada e na outra uma rosca com porca. Os parafusos comuns são instalados com aperto, que mobiliza atrito entre as chapas. Entretanto, o aperto nas chapas é muito variável, não podendo garantir um valor mínimo a considerar nos cálculos. A Figura 5 apresenta dois tipos de parafusos, sendo de cabeça e porca hexagonais (a) e cabeça e porca quadradas (b).

Os parafusos de alta resistência, conforme detalhado na Figura 6, são feitos com aço tratados termicamente. O tipo mais usual é o ASTM A325, de aço-carbono temperado. Eles podem ser instalados com esforços de tração mínimos, os quais podem ser levados em conta nos cálculos. Nos casos em que se deseja impedir qualquer movimento entre as chapas de conexão, dimensionam-se os parafusos com um coeficiente de segurança contra o deslizamento, obtendo-se uma ligação do tipo atrito. Quando pequenos deslizamentos são

tolerados, os parafusos de alta resistência A325 podem ser usados em uma ligação do tipo apoio. Neste caso, os parafusos são instalados com aperto normal, sem controle da protensão inicial.

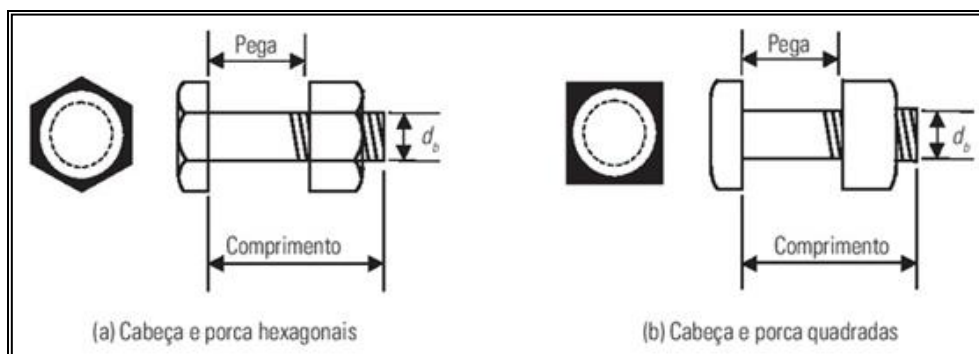


Figura 5: Parafusos comuns. Fonte: Fakury *et al* (2016).

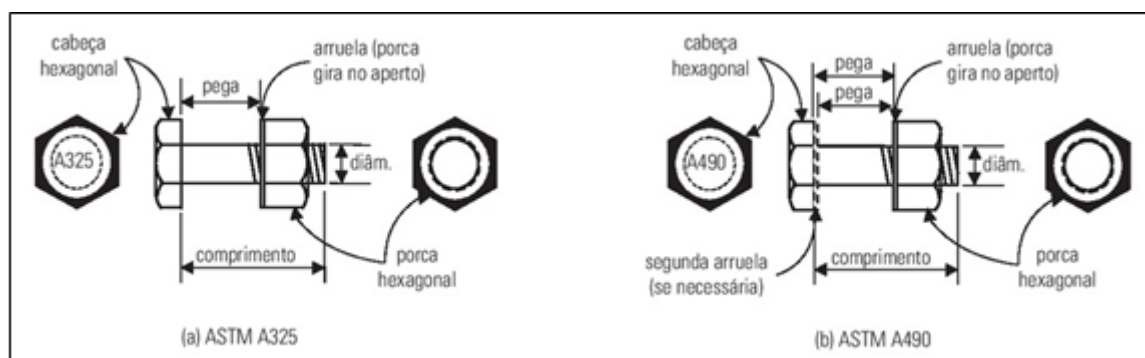


Figura 6: Parafusos de alta resistência. Fonte: Fakury *et al* (2016)

Dois tipos de ligação considerados usualmente em sistemas estruturais em aço que possuem ligações rígidas são as Ligações Rígidas Simétricas com perfis T laminados (LT/LMTS) e as Ligações Rígidas com Chapa de Cabeça Parafusadas Assimétricas (LMPA). Nos dois casos a ligação é capaz de resistir ao Momento Fletor e à Força Cortante podendo, usualmente, ser também solicitada à Força Normal de Tração. Cada uma delas possui seus elementos constituintes característicos como chapa de cabeça, parafusos, soldas, perfis T etc. Consequentemente, cada uma possui um peso dos elementos constituintes dependendo da viga que se deseja conectar.

Neste trabalho, o objetivo é realizar um comparativo entre a resistência de cada uma dessas ligações (Força Cortante, Momento Fletor e Força Normal) associada com o peso dos elementos que a constituem para vigas em perfis I laminados. Além disso, duas rotinas computacionais foram implementadas no programa WxMaxima para obtenção das forças resistentes de cálculo das referidas ligações. Um comparativo entre as resistências das ligações encontradas em literatura e aquelas determinadas pelas rotinas foi feito para validar as mesmas.

1.1. Ligações rígidas simétricas com perfis “T” laminados (LT/LMTS)

O objetivo dessas ligações é utilizar partes recortadas de Perfis Estruturais como elementos de uma ligação parafusada altamente adequada para processos automatizados de fabricação. A Figura 7 apresenta os componentes e a configuração de uma ligação LMTS.

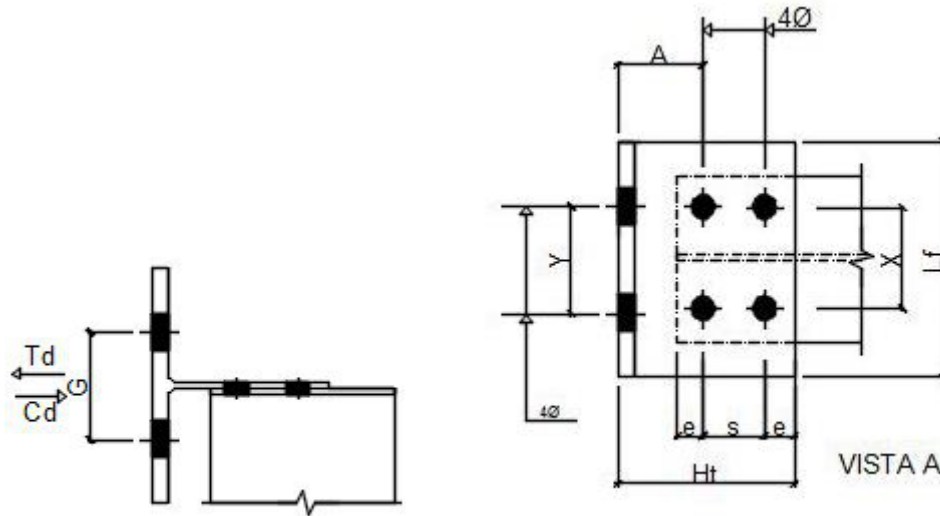


Figura 7: Disposição dos parafusos na LMPA. Fonte: Autores (2019)

A seguir apresenta-se a formulação para a determinação da resistência de ligações rígidas simétricas do tipo supracitado.

1.1.1. Resistência de cálculo da mesa do T à flexão considerando o efeito “prying action” (FR,nf)

A resistência de cálculo $F_{r,nf}$ da mesa do perfil laminado T, quando submetido à flexão e considerando-se o efeito pryingaction, é obtida a partir da seguinte formulação:

$$F_{r,nf} \leq \frac{(\delta M_{R,d} + M_{R,d})}{b'} N_{p2} \tag{1}$$

$$M_{R,d} = \frac{(pt_f^2 f_{yt})}{4,44} \tag{2}$$

$$a = \frac{(b_{ft} - G)}{2} \tag{3}$$

$$b_1 = \frac{b_{ft} - t_{wt}}{2} - a \tag{4}$$

$$b' = b_1 - 0,5d \tag{5}$$

$$a' = a + 0,5d \tag{6}$$

$$d' = d_b + 0,2 \quad (7)$$

$$p_1 = y \quad (8)$$

$$p_2 = 2(b_1 + 0,5d) \quad (9)$$

$$p_3 = \left(\frac{y}{2}\right) + x \quad (10)$$

$$p_4 = (b_1 + 0,5d) + x \quad (11)$$

onde p é o menor dos valores de p_1 a p_4 .

$$\delta = \frac{(p - d') \left(\frac{f_u}{1,35}\right)}{p \left(\frac{f_y}{1,1}\right)} \leq 1 \quad (12)$$

A descrição das variáveis na formulação compreendida entre as Eqs. (1) e (12) é apresentada abaixo:

a = distância entre os pontos de aplicação de N_d e T_d

b_{ft} = largura da mesa do Perfil T

d = altura do Perfil laminado

d_b = diâmetro do parafuso

f_u = limite de resistência a tração do aço da viga apoiada

f_y = limite de escoamento do aço da viga apoiada

f_{yt} = limite de escoamento do aço do Perfil T

G = gabarito de furação da mesa do Perfil T

$M_{R,d}$ = momento fletor resistente de cálculo

N_{p2} = número de parafusos na mesa do Perfil T

t_f = espessura da mesa

t_{wt} = espessura da alma do Perfil T

x = comprimento da região comprimida da placa de base; distância do furo até a extremidade do Perfil T

y = distância entre dois furos

1.1.2. Resistência de cálculo dos parafusos solicitados a corte $F_{R,npv}$

A resistência de cálculo $F_{R,npv}$ dos parafusos quando solicitados a corte é obtida conforme a formulação a seguir:

$$F_{R,npv} \leq \frac{0,4 A_b f_{ub} N_{p1}}{1,35} \quad (13)$$

Sendo que, N_{p1} é o número de parafusos na alma do Perfil “T”; A_b é a área bruta da seção do parafuso; f_{ub} é o limite de resistência a tração do aço do parafuso.

$$F_{R,npv} \leq \frac{1,2 \ell_f t_{wt} f_{ub} N_{p1}}{1,35} \quad (14)$$

$$F_{R,npv} \leq \frac{2,4 d t_{wt} f_{ub} N_{p1}}{1,35} \quad (15)$$

Sendo ℓ_f a distância livre, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou entre a borda do furo e a borda da parte ligada.

1.1.3. Resistência de cálculo dos parafusos tracionados considerando o efeito “prying action” ($F_{R,npt}$)

A resistência de cálculo $F_{R,npt}$ dos parafusos quando submetidos a tração e considerando o efeito de prying action é obtida a partir da seguinte formulação:

$$F_{R,npt} = \left[\frac{(F_{R,nt} a' + M_{R,d}) N_{p2}}{(a' + b')} \right] \quad (16)$$

$$F_{R,nt} = \frac{0,75 A_b f_{ub}}{1,35} * 0,67 \quad (17)$$

Onde: N_{p2} é o número de parafusos na mesa do Perfil T e $M_{R,d}$ é o momento fletor.

1.1.4. Resistência de cálculo da alma do Perfil T ao escoamento por tração ($F_{R,ny}$)

A resistência de cálculo $F_{R,ny}$ da alma do Perfil T, quando submetida ao escoamento por tração, é obtida segundo a formulação a seguir:

$$F_{R,ny} = \frac{f_{yt} L_T t_{wt}}{1,1} \quad (18)$$

Onde: L_T é o comprimento do Perfil T.

1.1.5. Resistência de cálculo da alma do Perfil T à ruptura por tração ($F_{R,nu}$)

A resistência de cálculo $F_{R,nu}$ da alma do Perfil T, quando submetido à ruptura por tração, é obtido conforme a formulação a seguir:

$$F_{R,nu} = \frac{f_{ut} [L_T - 2 (d_b + 0,2)] t_{wt}}{1,35} \quad (19)$$

onde: f_{ut} é o limite de resistência a tração do aço do Perfil.

1.1.6. Resistência de cálculo por rasgamento (“block shear”) da alma do Perfil “T” ($F_{R,nd}$)

A resistência de cálculo $F_{R,nd}$ da alma do perfil T, quando submetida à rasgamento (“block shear”), é obtida segundo a formulação seguinte:

Caso 1: Rasgando em dois blocos (nas extremidades)

$$F_{R,nd} \leq \frac{[0,06 A_{nvc} f_u + f_u A_{ntc}]}{1,35} \quad (20)$$

Caso 2: Rasgando em um bloco (na parte central)

$$F_{R,nd} \leq \frac{[0,06 A_{gvc} f_y + A_{ntc} f_u]}{1,35} \quad (21)$$

A_{nvc} = área líquida do elemento de ligação, sujeita a cisalhamento, para o cálculo do colapso por rasgamento (“block shear”).

A_{ntc} = área líquida do elemento de ligação, sujeita a tração, para o cálculo do colapso por rasgamento (“block shear”).

A_{gvc} = área bruta do elemento de ligação, sujeita a cisalhamento, para o cálculo do colapso por rasgamento (“block shear”).

1.2. Ligações rígidas com chapas de cabeça parafusada assimétricas (LMPA)

As Ligações Rígidas com Chapas de Cabeça Parafusada Assimétrica (LMPA) são utilizadas para unir a viga ao pilar sem elementos de ligação secundários. Elas são projetadas a fim de minimizar os efeitos de flexão na chapa de cabeça. A forma em que os parafusos são distribuídos permitem que os parafusos da parte superior sejam submetidos à tração (BAIÃO FILHO e SILVA, 2014).

De acordo com a American National Standards Institute (ANSI): Specification for Structural Steel Buildings (2016), caso for especificado no projeto que haja a possibilidade da inversão do momento fletor, essa ligação (LMPA) deve ser projetada de forma simétrica. Ou seja, os esforços atuantes na parte superior da chapa, devem ser considerados na parte inferior também, logo, é necessário que tenha a mesma quantidade de parafusos em ambas as partes.

A Figura 8 apresenta os componentes e a configuração com possível inversão do momento fletor da ligação tipo LMPA.

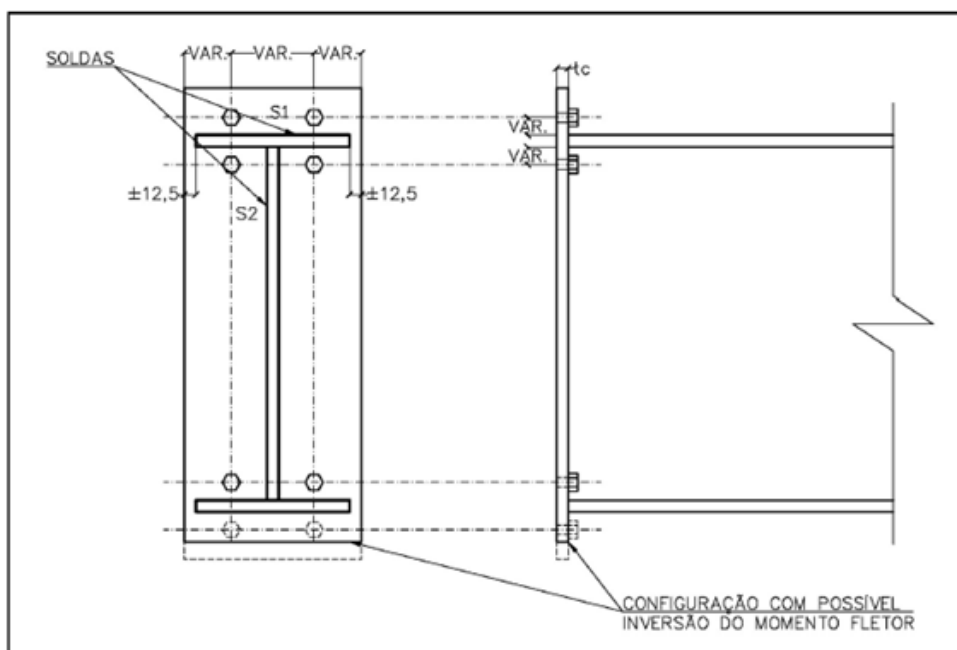


Figura 8: Disposição dos parafusos na ligação LMPA. Fonte: Silva *et al.* (2018).

A fim de obter os valores de momento fletor e força cortante que podem ser aplicados nos elementos estruturais que compõem a LMPA, é necessário seguir uma rotina de cálculo que seguem os requisitos da NBR 8800 (2008).

De acordo com o manual de Baião Filho e Silva (2014), a distância dos parafusos até a aresta devem ser de no mínimo 30 mm. A Tabela 1 apresenta as distâncias verticais medidas do eixo do parafuso até as fases da mesa.

Tabela 1: Distâncias verticais dos parafusos às mesas

Diâmetro do parafuso	Distância vertical (Eixo - face das mesas)
5/8"	30 mm
3/4"	30 mm
7/8"	35 mm
1"	40 mm

Fonte: Adaptado de Baião Filho e Silva (2014)

1.2.1. Resistência do Perfil ao momento fletor (NBR 8800:2008, item 5.4.2)

A resistência da viga quanto ao momento fletor deve ser obtida a partir do menor dos seguintes valores:

$$M_{Rd} \leq \frac{Z_x f_y}{1,1} \tag{22}$$

$$M_{Rd} \leq 1,50 W_x f_y / 1,1 \tag{23}$$

1.2.2. Limitação do momento devida à resistência dos parafusos à tração (NBR 8800:2008, item 6.3.3.1)

Conforme a fórmula seguinte, é definido o momento máximo devida à resistência dos parafusos à tração.

$$M_{Rd} \leq (N_{ps}/1,5)T(H-t_f) \quad (24)$$

T= Resistência de cálculo de um parafuso à tração.

1.2.3. Limitação do momento devida à flexão da chapa de cabeça

O momento fletor devido à resistência dos parafusos à tração deve ser obtido a partir da fórmula seguinte.

$$M_{Rd} \leq \frac{(H - t_f)f_y b_p t_c^2}{a_m P_e 1,1} \quad (25)$$

Onde: b_p é a largura da chapa de extremidade

$$a_m = c_a c_p \left(\frac{A_r}{A_w}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{p_e}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (26)$$

$c_a = 1,45$ (Steel Design Guide 4 - Extended End-Plate Moment Connections)

$$c_b = \left(\frac{b_r}{b_p}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$P_e = P_f - \left(\frac{d}{4}\right) - w \quad (28)$$

b_f = largura da mesa da viga

A_f = Área da mesa tracionada

A_w = Área da alma da viga

P_f = distância do centro do furo até a face mais próxima da mesa tracionada da viga

W_t = garganta da solda de filete ou do reforço da solda de penetração

1.2.4. Limitação do momento devida às soldas (NBR 8800:2008, item 6.2.5.1, Tab. 8)

Conforme a fórmula seguinte, é definido a limitação do momento devida às soldas.

$$M_{R,d} \leq \frac{2x0,6bf_y b_f (H - t_f)}{1,1} \quad (29)$$

em que: b é o filete de solda da mesa com a chapa de extremidade

1.2.5. Corte dos parafusos (NBR 8800:2008, item 6.3.3.2)

A resistência dos parafusos quanto á força cortante deve ser obtida a partir da fórmula subseqüente.

$$V_{R,d} \leq \frac{0,4f_{ub}A_bN_{ps}}{1,35} \quad (30)$$

1.2.6. Corte combinado com tração nos parafusos (NBR 8800:2008, item 6.3.3.4)

A resistência dos parafusos quanto á força cortante combinado com tração deve ser obtida segundo a fórmula seguinte.

$$V_{Rd} \leq \left\{ \left[\sqrt{1 - \left(\frac{N_d / (N_p / 1,5) 2}{F_{tRd}} \right)^2} F_{v,Rd} \right] + [0,33N_{ps}F_{v,Rd}] \right\} \quad (31)$$

1.2.7. Verificação da solda da alma (NBR 8800:2008, item 6.2.5.1, Tab. 8)

De acordo com a fórmula subseqüente, é feita a verificação da força cortante na solda da alma.

$$V_{R,d} \leq \frac{2 \times 0,6 f_{yb} l}{1,1} \quad (32)$$

$$\text{em que: } l \leq \begin{cases} (H - 2t_f)/2 \\ H - 2t_r - e_2 - 2d_n \end{cases}$$

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para se determinar a resistência final das ligações que são estudadas neste trabalho optou-se por fazer rotinas de cálculo para automatizar o processo. A seguir são apresentados o programa WxMaxima, que foi a base de desenvolvimento, bem como as rotinas nele implementadas.

2.1. WxMaxima

O maxima é um software livre, que permite elaborar cálculos matemáticos. Tal programa possui duas interfaces: WxMaxima e xMAXIMA. Ambos produzem os mesmos resultados, porém a interface WxMaxima é mais interativa com o utilizador do que o xMAXIMA (SANTOS, 2009). A Figura 9 apresenta a interface do programa WxMaxima.

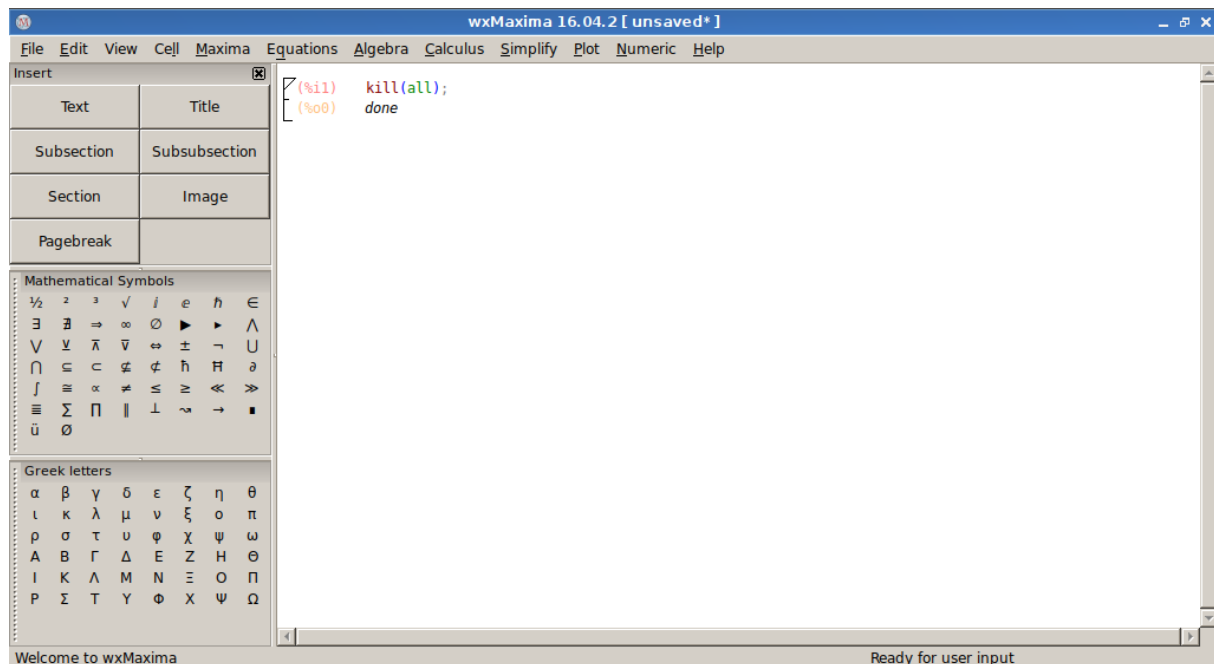


Figura 9: Interface WxMaxima. Fonte: Autores (2019).

O WxMaxima utiliza álgebra simbólicas e numéricas, tais como diferenciação, integração, equações diferenciais ordinárias, sistemas de equações lineares, vetores, matrizes, entre outros (FLORES et al., 2013). Além disso, o WxMaxima pode traçar gráficos bidimensionais e tridimensionais (SANTOS, 2009). A Figura 10 apresenta um exemplo de gráfico da superfície de Klein elaborado no referido programa.

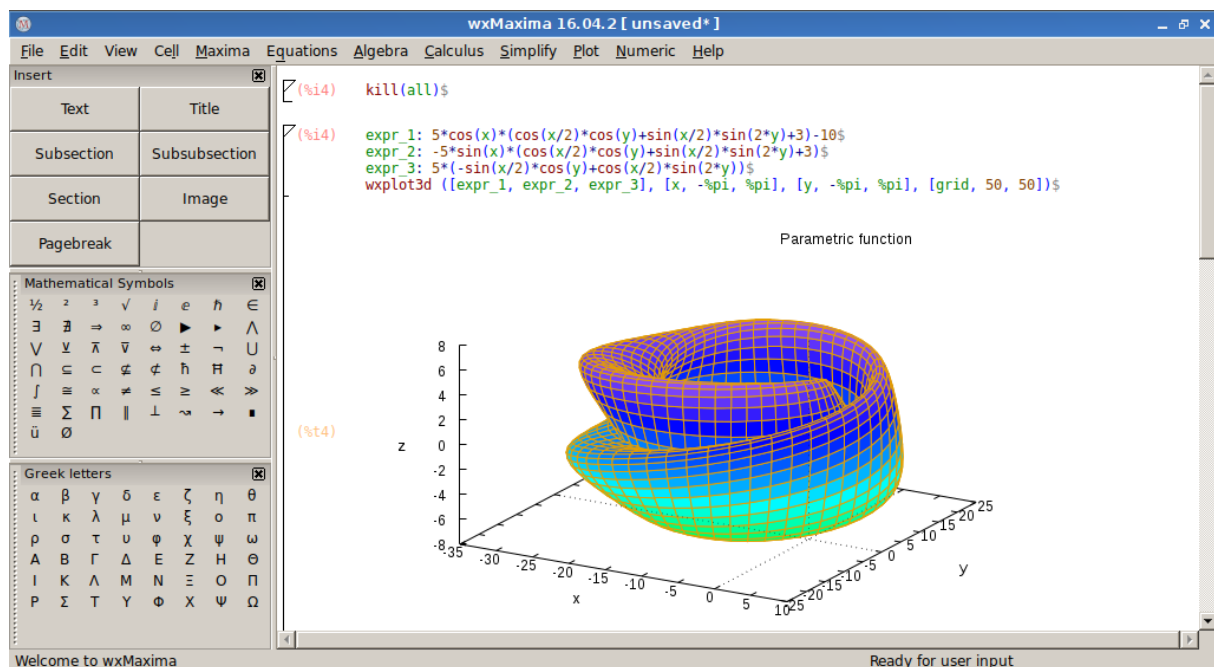


Figura 10: Gráfico da superfície de Klein elaborado no WxMaxima. Fonte: Autores (2019).

2.2. Rotina Computacional para a Ligação LMPA

A rotina computacional feita no WxMaxima, conforme apresentada nas Figuras 11 e 12, está ajustada para ao receber os dados de entrada, calcular os valores resistentes para a situação no qual foi descrita. Para os dados de entrada são necessários os dados do perfil de aço, os dados do parafusos que serão utilizados e os valores dos esforços iniciais.

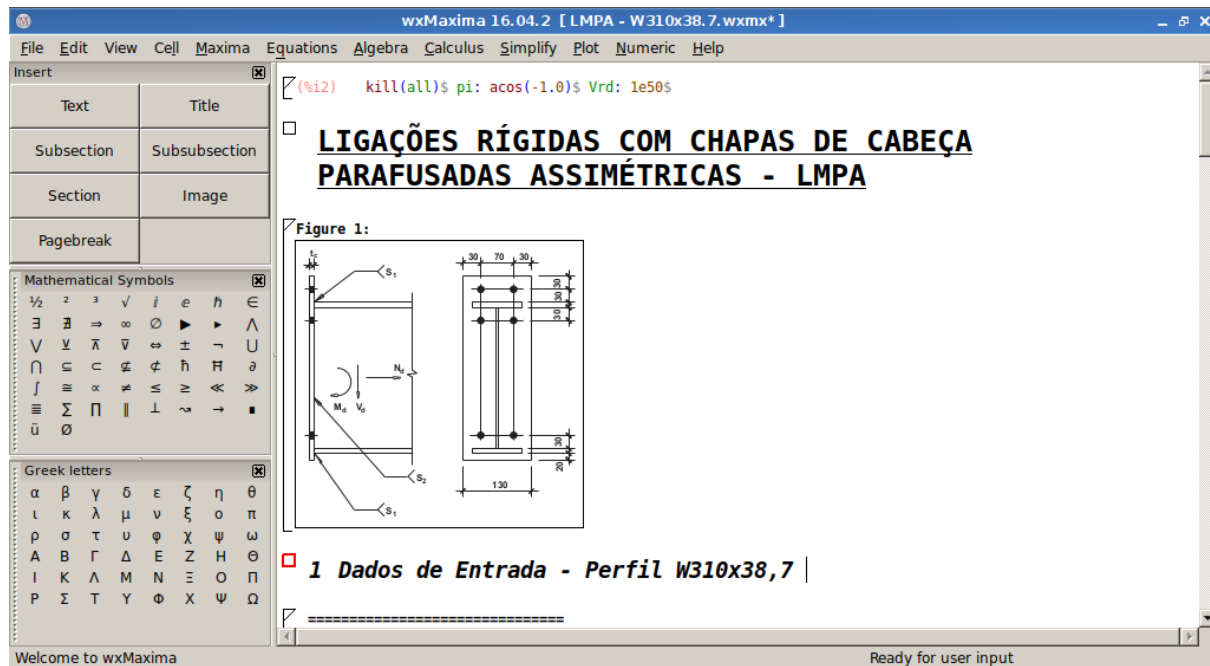


Figura 11: Rotina computacional para ligação LMTS – Entrada de Dados. Fonte: Autores (2019).

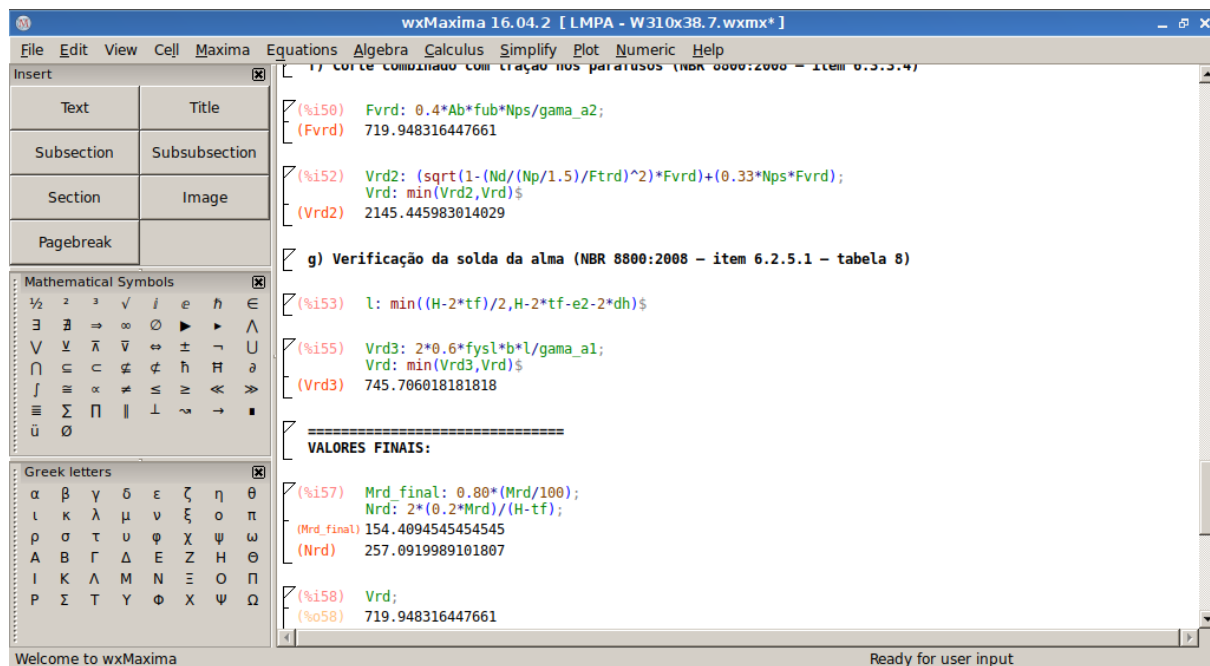


Figura 12: Rotina computacional para ligação LMPA – Valores Finais. Fonte: Autores (2019).

2.3. Rotina Computacional para a Ligação LMTS

A rotina computacional para a ligação LMTS foi feita no WxMaxima, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14. Está ajustada para ao receber os dados de entrada, calcular os valores resistentes para a situação no qual foi descrita. Da mesma forma descrita no item 2.2, para os dados de entrada são necessários os dados do perfil de aço, os dados do parafusos que serão utilizados e os valores dos esforços iniciais.

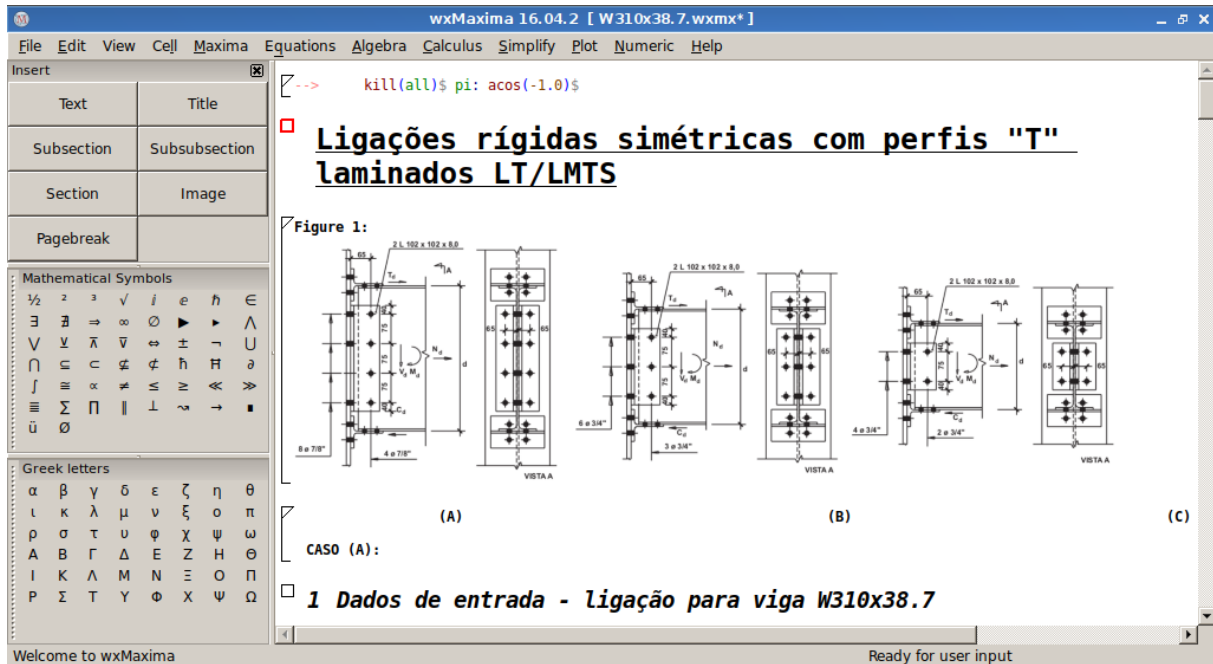


Figura 13: Rotina computacional para ligação LMTS – Entrada de Dados. Fonte: Autores (2019).

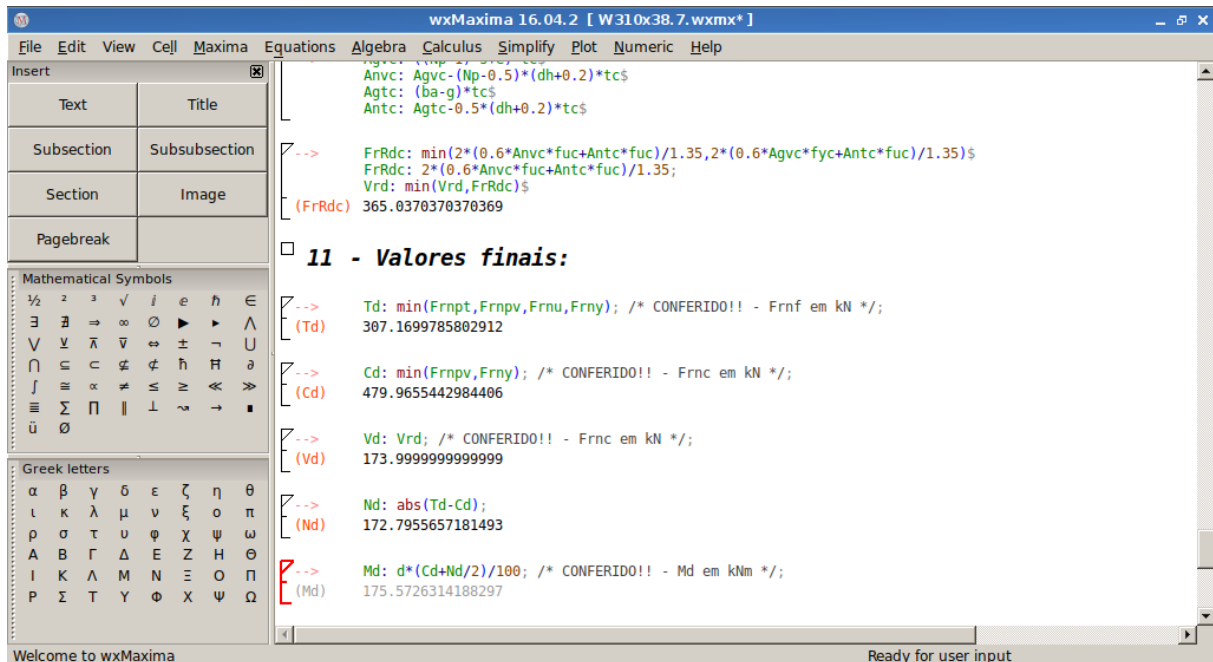


Figura 14: Rotina computacional para ligação LMTS – Valores Finais. Fonte: Autores (2019).

3. EXEMPLO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise neste trabalho foi dividida em duas partes. Na primeira, pretende-se obter a resistência de cálculo das ligações LMTS e LMPA por meio da rotina desenvolvida em WxMaxima e comparar os resultados com Baião e Silva (2014). Na segunda, pretende-se comparar as duas ligações quanto à sua resistência versus o peso dos seus elementos constituintes.

Em ambas as partes foram escolhidos os seguintes perfis laminados de abas paralelas a serem considerados como vigas ligadas: W310x38.7, W310x44.5, W360x44.6, W360x51.0, W410x38.8, W410x46.1, W460x52.0 e W530x66.0. Esses perfis são constituídos em aço ASTM A572 Gr50. Os perfis T usados nas ligações LMTS são constituídos do mesmo tipo de aço. Já as chapas de extremidade são feitas em aço ASTM A36, e os parafusos em aço ASTM A325, com diâmetros variando entre $\frac{3}{4}$ " (19mm) e 1" (25mm), dependendo de cada caso. As cantoneiras são em aço ASTM A36, e as soldas executadas com eletrodos E70XX.

3.1. Validação das rotinas computacionais para Ligações LMPA e LMTS

Para a análise das ligações LMTS, foram usados perfis TC obtidos de perfis W460x68 (com comprimento $L_t=200$ mm) para as vigas W310x38.7, W310x44.5, W360x44.6, W360x51.0 e W530x66.0. Os mesmos perfis TC, porém com $L_t=170$ mm, foram usados para as vigas W410x38.8, W410x46.1, W460x52.0.

Tabela 2: Comparativo entre a resistência dos esforços internos para a Ligação LMTS.

Perfil	Baião e Silva (2014)			Presente Trabalho					Variação Percentual		
	Vd (kN)	Td (kN)	Cd (kN)	Vd (kN)	Td (kN)	Cd (kN)	N (kN)	M (kNm)	Vd	Td	Cd
W310x38,7	177,00	312,00	480,00	174,00	307,17	479,97	172,80	175,57	1,69%	1,55%	0,01%
W310x44,5	201,00	312,00	480,00	198,00	309,91	479,97	170,06	176,85	1,49%	0,67%	0,01%
W360x44,6	210,00	312,00	480,00	207,00	306,76	479,97	173,20	199,43	1,43%	1,68%	0,01%
W360x51,0	219,00	312,00	480,00	216,00	309,81	479,97	170,16	200,59	1,37%	0,70%	0,01%
W410x38,8	292,00	301,00	480,00	288,00	304,38	479,97	175,59	226,54	1,37%	1,12%	0,01%
W410x46,1	320,00	301,00	480,00	315,00	307,49	479,97	172,47	228,18	1,56%	2,16%	0,01%
W460x52,0	339,00	301,00	480,00	342,00	306,43	479,97	173,54	255,03	0,88%	1,80%	0,01%
W530x66,0	572,00	312,00	480,00	534,00	306,50	479,97	173,47	297,52	6,64%	1,76%	0,01%

Fonte: Autores (2019).

Analisando a Tabela 2, pode-se observar que os valores da rotina LMTS implementada pelos autores estão em concordância com os valores apresentados em Baião e Silva (2014), apresentando uma diferença máxima e mínima percentual, respectivamente, de 6,64% e 0,88% para a força cortante Vd e 2,16% e 0,33% para a força Td de tração no perfil T. No entanto, a força de compressão Cd no perfil T apresentou o mesmo valor em todas as análises, de forma que a variação percentual permaneceu constante em todos os casos, sendo de 0,01%.

Além desses fatos, constata-se o maior e menor valor para o momento fletor como sendo, respectivamente, 297,52 kNm ocorrido no perfil W530x66 e 175,57kNm no perfil W310x38,7. Para a força cortante, foi encontrado 170,06kN (W310x44,5) como menor valor e 175,59kN (W410x38,8) como maior valor.

Tabela 3: Comparativo entre a resistência dos esforços internos para a Ligação LMPA.

Baião e Silva (2014)	Presente Trabalho	Variação Percentual
----------------------	-------------------	---------------------

Perfil	Nd (kN)	Vd (kN)	Md (kNm)	Nd (kN)	Vd (kN)	Md (kNm)	Nd	Vd	Md
W310x38,7	261.00	238.00	157.00	257.09	232.71	154.41	1.50%	2.22%	1.65%
W310x44,5	301.00	277.00	181.00	296.30	281.58	178.85	1.56%	1.65%	1.19%
W360x44,6	292.00	317.00	200.00	287.53	291.51	196.79	1.53%	8.04%	1.61%
W360x51,0	333.00	317.00	229.00	328.61	289.07	225.69	1.32%	8.81%	1.44%
W410x38,8	222.00	312.00	174.00	183.30	247.82	143.04	17.43%	20.57%	17.79%
W410x46,1	279.00	186.00	218.00	168.72	254.30	132.21	39.53%	36.72%	39.35%
W460x52,0	295.00	467.00	259.00	292.35	286.39	256.80	0.90%	38.67%	0.85%
W530x66,0	340.00	397.00	349.00	255.37	315.50	262.32	24.89%	20.53%	24.84%

Fonte: Autores (2019).

Com relação à Tabela 3, verifica-se que os resultados obtidos pela rotina LMPA implementada pelos autores apresentam boa proximidade com os valores apresentados em Baião e Silva (2014), para os perfis W310x38,7, W310x44,5, W360x44,6 e W360x51,0. Nestes casos, para os três esforços resistentes de cálculo, a máxima variação percentual encontrada foi 8,81% (Força Cortante) e a mínima foi 1,19% (Momento Fletor).

Entretanto, para os demais perfis analisados, os resultados divergem substancialmente. Observa-se uma variação percentual aproximada de 39% para os três esforços resistentes de cálculo.

Os maiores valores encontrados, no presente trabalho, para a Força Normal, Força Cortante e Momento Fletor Resistentes de Cálculo foram, respectivamente, 366,66kN, 315,50kN e 264,01kNm. Quanto aos menores valores, foram obtidos 168,72kN para a Força Normal, 232,71kN para a Força Cortante e 132,21kNm para o Momento Fletor Resistentes de Cálculo.

3.2. Curvas Resistência de Cálculo versus Peso dos Elementos Constituintes das Ligações LMPA e LMTS

Como forma de melhor visualização dos resultados, foram feitos gráficos para comparar as ligações LMPA e LMTS, levando em conta o esforço normal (Figura 15), o esforço cortante (Figura 16) e o momento fletor (Figura 17). Todos eles fazem uma comparação com os respectivos pesos. Devido à nuvem de pontos, optou-se por traçar uma reta que melhor se ajusta a eles. Observa-se nas Figuras 15, 16 e 17 que as retas não se cruzam e que, nos três gráficos, a reta representativa da ligação LMPA situam-se à esquerda das que representam a LMTS, indicando um menor peso.

Na Figura 15, a reta LMTS permanece aproximadamente constante, ou seja, o aumento da altura dos perfis das vigas não influencia na resistência das mesmas à força normal. A reta LMPA apresenta inclinação de forma que o aumento dos perfis das vigas (e consequente dimensões da chapa) aumentam a resistência da ligação quanto ao esforço normal.

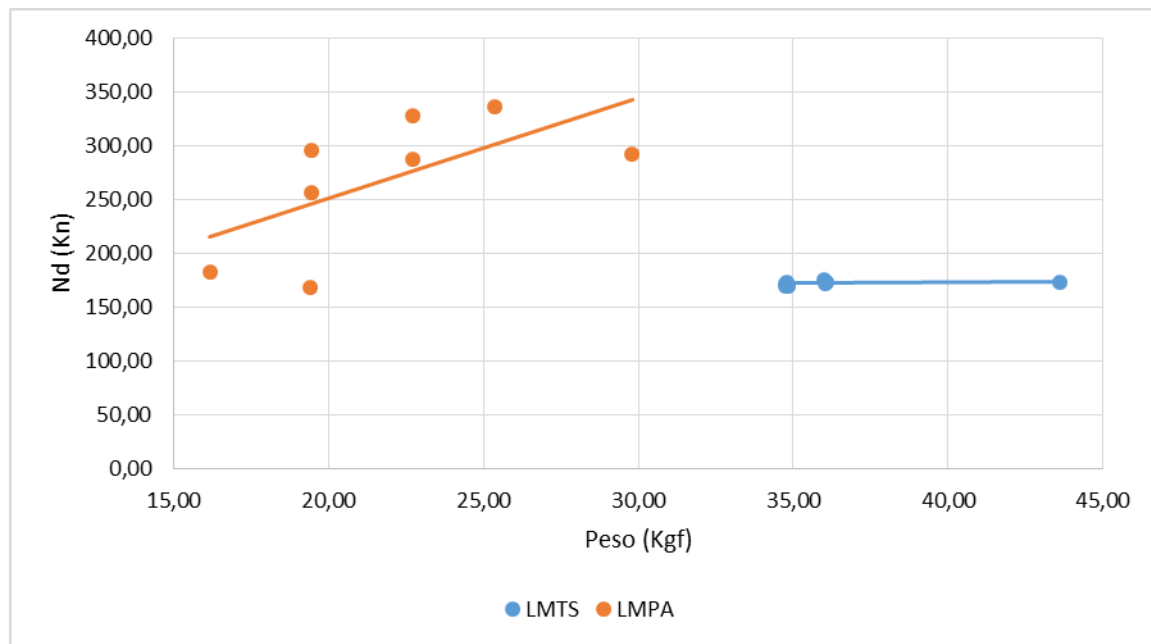


Figura 15: Curvas esforço normal versus peso dos elementos constituintes. Fonte: Autores (2019).

Na Figura 16, a reta LMTS mostra acentuada inclinação em relação à reta LMPA, mostrando que pequenos aumentos de peso da ligação resultam em acentuado aumento da resistência de cálculo associada ao cortante, sendo o valor maior igual a 534kN. A reta LMPA apresenta pequena inclinação, ou seja, o aumento da resistência de cálculo quanto ao cortante é pouco significativo com o aumento do peso.

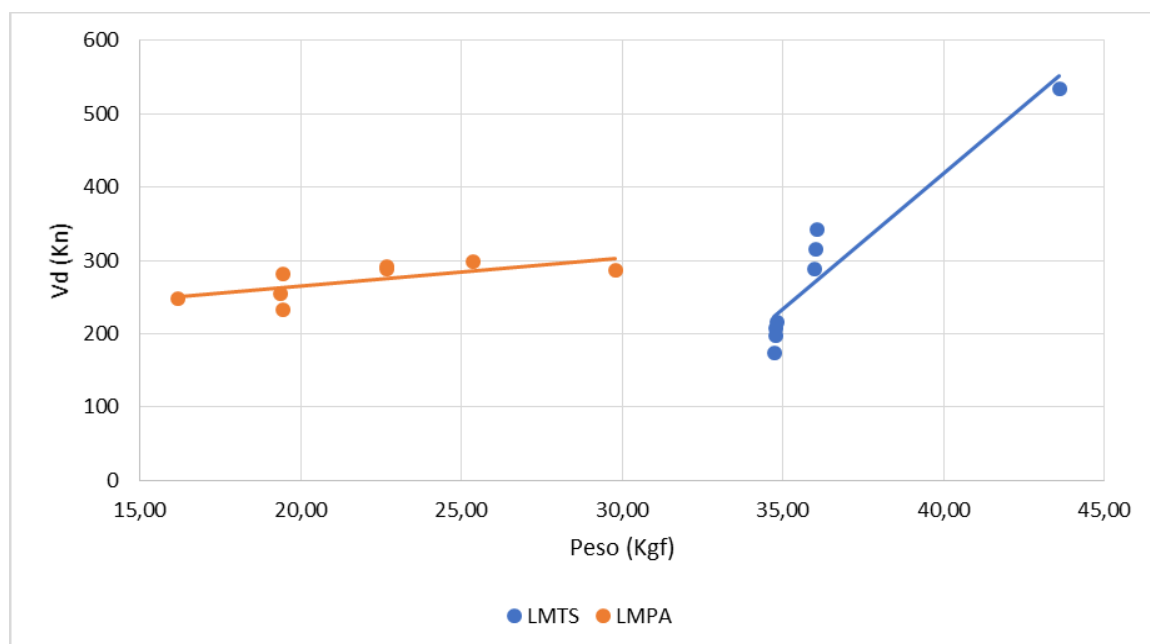


Figura 16: Curvas esforço cortante versus peso dos elementos constituintes. Fonte: Autores (2019).

Na Figura 17 as retas apresentam praticamente a mesma inclinação, com a ligação LMTS alcançando uma maior resistência de cálculo quanto ao momento fletor (297.52kNm), porém a um maior peso.

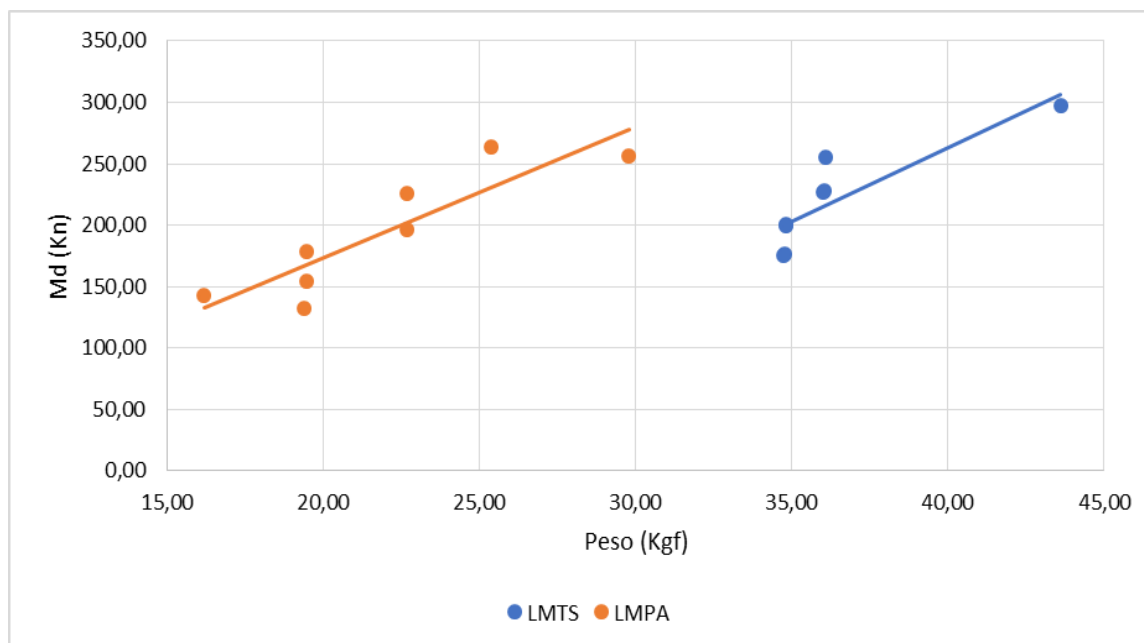


Figura 17: Curvas momento fletor versus peso dos elementos constituintes. Fonte: Autores (2019).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho realizou um comparativo entre a resistência das ligações do tipo LMPA e LMTS associada com o peso dos elementos que as constituem para vigas em perfis I laminados. Implementou-se duas rotinas computacionais em WxMaxima para obtenção das forças resistentes de cálculo destas ligações. Ambas foram validadas com exemplos de literatura. Considerando-se a situação de atuação simultânea das forças Normal e Cortante, bem como do Momento Fletor a ligação LMPA mostrou-se mais adequada visto que momento fletor é o esforço mais significativo em elementos estruturais de vigas, e as duas resistências foram semelhantes; porém, esta ligação apresentou menor peso em todos os casos. Além disso, a ligação LMPA é de fácil execução em obra (menos elementos de ligação) e projeto (envolve a verificação de um número menor de estados limites). Os autores recomendam, em futuros trabalhos, uma nova verificação dos resultados para a ligação LMPA, visto a discrepância de parte dos resultados frente à literatura considerada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (Campus Barreiro) e às Ligas Acadêmicas da Engenharia Civil (LAEC), em especial à Liga Acadêmica de Estruturas (LAE), pelo apoio e incentivo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *ANSI AISC 360-16: Specifications for structural steel building.* Chicago: AISC, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 8800:Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.* Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BAIÃO FILHO, Oswaldo Teixeira; SILVA, Antônio Carlos Viana. *Ligações para estruturas de aço: Guia prático para estruturas com perfis laminados.* 6 ed. Minas gerais: Gerdau, 2014.

BELLEI, Ildone H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. *Edifícios de múltiplos andares em aço.* 2 ed. São Paulo: Pini, 2008.

FAKURY, Ricardo H.; SILVA, Ana Lydía R. Castro e; CALDAS, Rodrigo B. *Dimensionamento dos elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto.* São Paulo: Person Education do Brasil, 2016.

FLORES, Adailson; PIERINI, Ana Caroline; PAVLACK, Bruna; BOER, Eduardo; KENDERLI, Poliana; ABÉ, Stephanie; BIDEL, Antonio. *Software WxMaxima.* Universidade federal de Santa Maria – RS. 2013.

PFEIL, Michèle; PFEIL, Walter. *Estruturas de aço: dimensionamento prático.* 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SANTOS, Bruna. *Introdução ao Software Maxima.* Centro de Matemática da Universidade do Porto. 2009.

SILVA, Emanuel Tarcísio da; NAZARÉ, Mateus Viana de; NAZARÉ, Vivian Viana Pereira; PEREIRA, Wender Giliards. *Rotina computacional para verificação da resistência de ligações rígidas com chapas de cabeça parafusadas assimétricas (LMPA) utilizando o WxMaxima.* I Congresso Internacional de Cidadania, Direito e Saúde: Reflexões Transdisciplinares, Belo Horizonte, 2018. Disponível em <https://ccds.una.br/wp-content/uploads/2019/04/Anais-I-CCDS-UNA.pdf>. Acesso em 11/09/2019.

VASCONCELLOS, Alexandre Luiz. *Ligações em estruturas metálicas.* 4 ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, CBCA, 2011.