



## **Análise Experimental da Resistência a Flexão de Perfis Laminados de Aço com Emendas Aparafusadas**

Richard Reus<sup>1</sup>,

Márcio Vito<sup>2</sup>,

Augusto Wanderlind<sup>3</sup>

**Resumo:** A utilização de estruturas de aço na construção civil vem conquistando espaço no mercado em ritmo acelerado, devido as vantagens que apresenta como a rapidez na execução, resistência elevada e sustentabilidade. Por serem peças de grandes comprimentos, encontram fatores que por vezes limitam suas dimensões, como exemplo principal os problemas referentes ao transporte e dificuldades de acesso nos locais da obra. Deste modo, torna-se indispensável a realização de emendas nas estruturas para dar continuidade nos vãos de forma a resistirem as cargas solicitantes. As emendas aparafusadas são mais recorrentes em canteiro devido ao fato de serem mais acessíveis e de fácil execução. Afim de analisar a capacidade resistente das emendas aparafusadas, realizou-se um experimento em que dois perfis laminados de aço tipo I 200 x26,6 kg/m foram unidos por meio de chapas de aço ASTM A572 nas mesas e aço ASTM A36 na alma, ligados por parafusos ASTM A325 e submetidos a ensaio de flexão a 4 pontos. Foram confeccionadas duas vigas de mesmo perfil e com a mesma emenda. O dimensionamento foi feito através da NBR 8800:2008 atendendo os requisitos mínimos da norma para o momento solicitante de cálculo. Os resultados obtidos dos ensaios mostraram que a emenda da viga VE1 obteve um aumento de 9,09% do momento resistente em relação ao momento de projeto e um ganho de 5,13% em relação a ligação da viga VE2. O ganho de momento resistência da viga VE2 em relação ao momento de projeto foi de 3,77%. Os deslocamentos de ambas as vigas foram superiores aos limites de flecha impostos pela NBR 8800:2008, apresentando um deslocamento máximo 10 vezes superior para a viga VE1 e uma flecha 7 vezes do limite para a VE2. A rigidez apresentada, obtida através da reta recante conforme a EUROCODE 3 determina, foi de 3051 kN.m/rad para a viga VE1 e de 2772,58 kN.m/rad para a emenda da viga VE2.

**Palavras-chave:** emendas aparafusadas, EUROCODE 3, capacidade resistente, NBR 8800:2008.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense.

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, marciovito@unesc.net.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, acw@unesc.net.

## Experimental Analysis of the Flexural Strength of Rolled Steel Profiles with Bolted Splices

**Abstract:** The use of steel structures in civil construction has been gaining space in the market at an accelerated pace, due to the advantages it presents, such as speed in execution, high strength and sustainability. As they are pieces of great length, they find factors that sometimes limit their dimensions, as the main example are problems related to transport and difficulties in accessing the construction sites. Thus, it is essential to carry out amendments in the structures to continue the spans in order to withstand the loads required. Bolted splices are more recurrent on site due to the fact that they are more accessible and easy to perform. In order to analyze the resistant capacity of the bolted joints, an experiment was carried out in which two laminated profiles of type I steel 200 x26.6 kg/m were joined by means of ASTM A572 steel plates on the tables and ASTM A36 steel on the core, connected by ASTM A325 screws and subjected to a 4-point bending test. Two beams with the same profile and with the same splice were made. The dimensioning was done through NBR 8800:2008, meeting the minimum requirements of the standard for the requesting moment of calculation. The results obtained from the tests showed that the splice of beam VE1 obtained an increase of 9.09% in the resistive moment in relation to the design moment and a gain of 5.13% in relation to the connection of the beam VE2. The moment resistance gain of beam VE2 in relation to the design moment was 3.77%. The displacements of both beams were greater than the deflection limits imposed by NBR 8800:2008, with a maximum displacement 10 times greater for beam VE1 and a deflection 7 times greater than the limit for VE2. The stiffness shown, obtained through the straight line as determined by EUROCODE 3, was 3051 kN.m / rad for beam VE1 and 2772.58 kN.m / rad for the splice of beam VE2.

**Key-words:** bolted splices, EUROCODE 3, resistant capacity, NBR 8800: 2008.

### Introdução

A utilização de estruturas aço na construção civil vem se difundindo desde o século XVIII, quando começou a ser utilizado em obras que necessitavam de estruturas mais leves e que possibilitasse a execução de vãos maiores. Os avanços tecnológicos sobre o aço foram então

sendo aprimorados com o tempo e contribuindo para o desenvolvimento do setor da construção civil. A busca do aço como elemento estrutural tornou-se então cada vez maior devido aos seus benefícios como resistência elevada e sustentabilidade.

Pinho (2005) comenta que cada peça possui seu lugar específico na estrutura e desempenha ainda um papel na constituição da obra. O ato de se unirem as peças no canteiro de obras para formar o conjunto da estrutura chama-se montagem. Porém, antes disso é necessário transportar a estrutura do local onde foi produzida até o canteiro de obras.

Conforme Relvas (2009) na construção de estruturas de aço há muitas vezes a necessidade de dividir os elementos de maior dimensão em partes menores, para facilitar ou mesmo possibilitar o transporte de tais elementos. Quando tal acontece incorre-se no processo de dimensionamento de uma ligação que promova o funcionamento dos elementos ligados, como se de uma peça única se tratasse.

Para Resende (2009) as ligações de uma estrutura metálica desempenham um papel fundamental no comportamento da estrutura às ações exteriores. Apesar disso, as ligações apresentam-se como um dos componentes estruturais mais complexos do ponto de vista do seu dimensionamento. Em muitos casos da prática corrente é dedicada pouca atenção à concepção das ligações metálicas e o seu cálculo é muitas vezes tratado de forma simplificada e pouco rigorosa. Isto acontece devido às incertezas na fabricação, imperfeições, tensões residuais, fricção e complexidade geométrica.

Segundo Pereira (2014), em emendas parafusadas de perfis tipo I laminados dependem de um controle de qualidade e mão de obra especializada. Emendas parafusadas são mais empregadas em conexões de campo devido sua maior facilidade comparada com as ligações soldadas, que necessitam de equipamentos especiais que muitas vezes não estão disponíveis na obra.

Conforme Pfeil (2009) as emendas necessitam estar localizadas preferencialmente em seções pouco solicitadas. Isso se deve ao fato de que um projeto adequado de ligações deve possuir uma análise de viabilidade econômica e não somente estrutural.

Através de uma simulação de carga em uma viga de aço bi-apoiada composta de emendas aparafusadas situadas no momento máximo de flexão, o presente trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente a resistência, flecha e as deformações máximas das chapas de ligação e comparar se há ocorrência na variação desses esforços com as resistentes teóricas de vigas sem emendas, utilizando os procedimentos descritos na NBR 8800:2008 para o dimensionamento das ligações.

## **Materiais e método**

Para o desenvolvimento do estudo foi realizado um experimento com a finalidade de representar uma viga de aço bi-apoiada, que possui uma emenda localizada no momento fletor máximo (meio do vão), com chapas de aço ASTM A572 Gr-50 para as mesas e aço ASTM A36 para a alma, ligadas por meio de parafusos ASTM A325, classificados como parafusos de alta resistência, sendo aplicado duas cargas concentradas por meio do sistema de flexão em 4 pontos, sendo dessa forma que a ligação fosse solicitada as ações até a sua ruptura. A figura 1 abaixo apresenta um fluxograma que mostra as etapas para a produção das vigas emendadas. O desenvolvimento do projeto foi dividido em três etapas mostradas a seguir:

- a) Dimensionamento da viga e das ligações conforme a NBR 8800:2008;
- b) Confecção e montagem das ligações e demais reforços na viga;
- c) Preparação e ensaio do experimento.

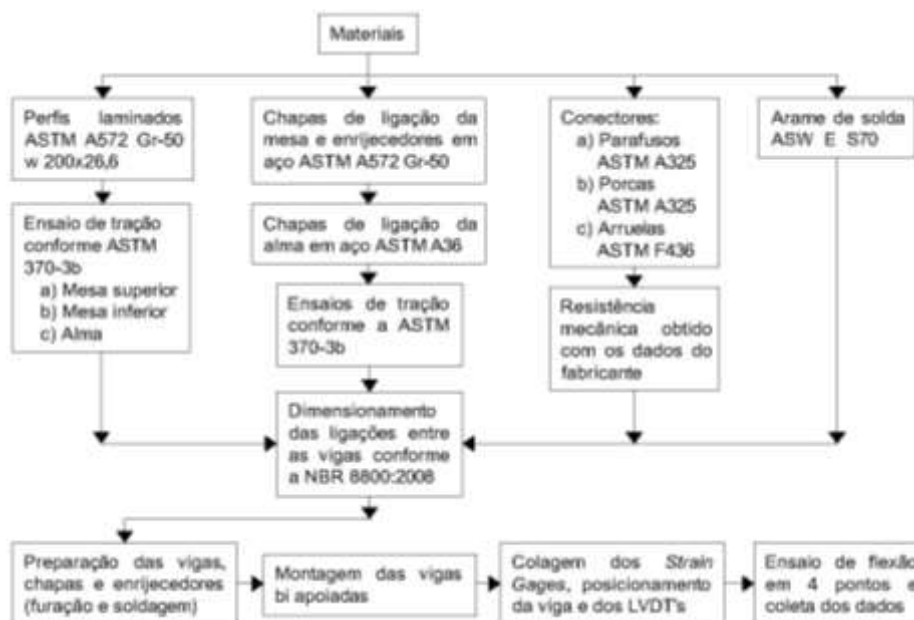


Figura 1. Fluxograma esquemático para desenvolvimento da pesquisa

A tabela 01 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais utilizados, obtidos através de corpos de prova de aço retirados das mesas e alma do perfil laminado, bem como das chapas de ligação e dos enrijecedores. Foram realizados ensaios de tração normatizados pela ASTM A370-13b, enquanto as propriedades mecânicas dos parafusos foram obtidas por laudo técnico disponibilizada pelo fabricante.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais.

	Tensão de escoamento $f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Tensão limite de resistência $f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Alongamento total (%)	Módulo de elasticidade (kN/cm <sup>2</sup> )
Mesa superior	36,0	49,5	29,2	21016
Mesa inferior	37,0	50,4	30,8	21051
Alma	38,8	50,1	30,5	20867
Chapa da mesa	38,5	49,5	28,2	20759
Chapa da alma	26,6	38,8	41,3	20464
Enrijecedor	39,3	51,9	37,1	21051
Parafuso	64,8	84,5	-	-

O cálculo das vigas foi dimensionado de forma a evitar quaisquer efeitos de flambagem lateral e flambagem local que comprometessem os resultados do ensaio. Foram adotados todos os procedimentos descritos na NBR 8800:2008 para o dimensionamento das ligações, onde o momento de projeto ficou limitado em 90,3 kN.m, em função da resistência ao cisalhamento na alma da viga.

A viga ensaiada apresenta um vão teórico de 130 cm de comprimento, caracterizando-a como uma viga curta, evitando assim a flambagem global. Para a união dos perfis laminados, foram confeccionadas chapas de aço ASTM A572 G-50 para as mesas e enrijecedores e para as chapas da alma com aço ASTM A36, que fazem a junção de duas vigas de mesmo comprimento, com um afastamento entre elas de 1 cm, ligadas por meio de parafusos de alta resistência. As chapas que fazem as ligações estão situadas nas mesas inferior e superior com uma espessura de 12,7 mm cada e são ligadas por meio de parafusos ASTM A325 5/8”, enquanto a alma é ligada por duas chapas de 4,75 mm de espessura com parafusos ASTM A325 1/2”.

A Figura 2 apresenta o desenho da viga a ser ensaiada, onde cada peça que a compõe a ligação está com as identificações necessárias. Na tabela 2 encontram-se os nomes de cada peça da Figura 2.

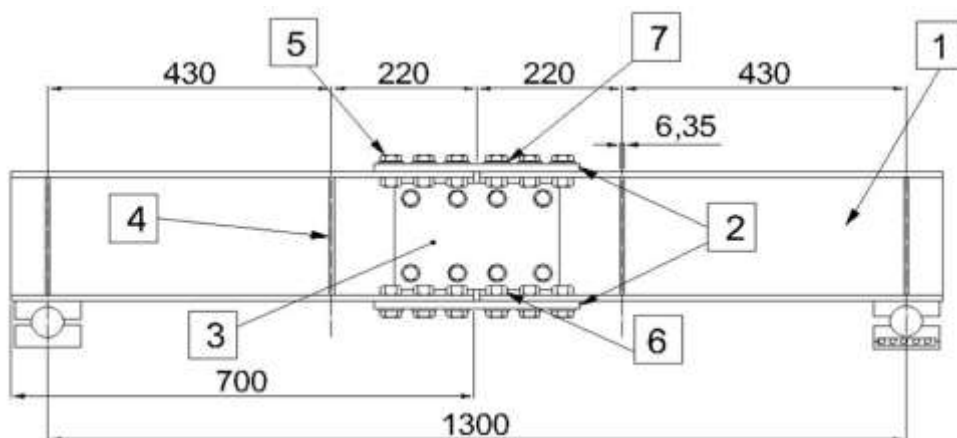


Figura 2. Desenho da viga bi apoiada (mm)

Tabela 2. Identificação das peças

Identificação	Nome da peça	Material
1	Viga	ASTM A572 G-50
2	Chapas da mesa	ASTM A572 G-50
3	Chapas da alma	ASTM A36
4	Enrijecedor	ASTM A572 G-50
5	Parafusos	ASTM A325
6	Porcas	ASTM A325
7	Arruelas	ASTM F436

As dimensões das chapas, bem como o espaçamento entre parafusos e a localização dos extensômetros elétricos (Strain Gauges) SG1 e SG2 estão indicados na figura 3. O SG1 está posicionado na chapa da mesa superior e o SG2 na chapa da mesa inferior, medindo as deformações ocasionadas pelos esforços de compressão e tração, respectivamente.

Para a realização do ensaio, foram montadas duas vigas com emendas aparafusadas, ambas com o mesmo perfil laminado ASTM A572-G50 tipo I 200x26,6 kg/m e mesma ligação, conforme apresentada na figura 3. As vigas recebem a nomenclatura VE1 e VE2 para representar a viga com emenda 1 e viga com emenda 2 respectivamente. Os perfis foram posicionados sob um pórtico metálico que possui um cilindro hidráulico com capacidade de aplicar até 500 kN. Os valores de carga foram medidos através de uma célula de carga calibrada, posicionada na base do cilindro hidráulico. A resistência da ligação foi analisada através do momento fletor gerado por meio de duas cargas concentradas, aplicadas uma em cada terço do vão teórico.

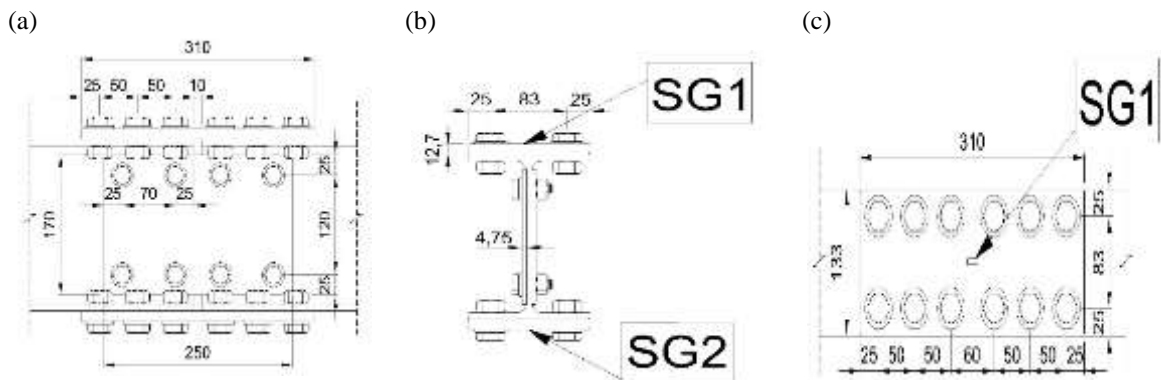


Figura 3. Detalhe da ligação (mm)

Os deslocamentos foram medidos a partir dos LVDT's (Linear Variable Differential Transformer) posicionados em três pontos, um no meio do vão e os outros dois localizados um em cada terço do vão da viga. A coleta dos valores de carga e dos deslocamentos foram realizados utilizando o sistema de aquisição dados quantum X que utiliza o software Catman Easy, ambos da marca HBM. A figura 4 apresenta a viga a ser ensaiada e o posição dos LVDT's.

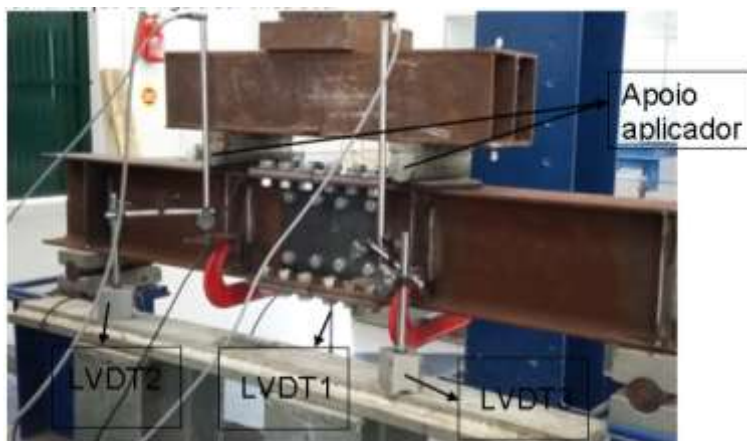


Figura 4: Identificação da viga a ser ensaiada.

## Resultados e Discussões

Os valores experimentais dos deslocamentos e das deformações dos ensaios das vigas VE1 e VE2 foram obtidos por meio da resistência a flexão das mesmas. Os deslocamentos foram obtidos por meio dos LVDT's dispostos na mesma posição em ambas as vigas. A deflexão do meio do vão foi medida pelo LVDT1, enquanto o LVDT2 e LVDT3 foram posicionados nos terços médios da viga e mediram os deslocamentos do lado esquerdo e direito, respectivamente. As figuras 5 e 6 apresentam o momento fletor máximo x deslocamento vertical, a cada incremento estático de carga.

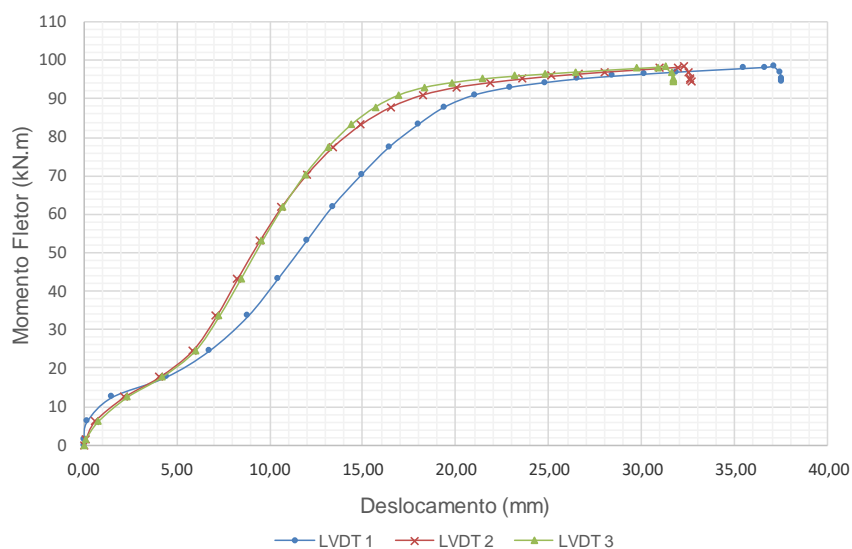


Figura 5. Curva Momento x Deslocamento Vertical

Conforme a figura 5, a ligação da viga emendada VE1 apresentou um momento resistente máximo de 98,40 kN.m, enquanto na figura 6, representando a emenda da viga VE2, mostrou um momento resistente máximo de 93,60 kN.m.

A emenda da viga VE1 obteve um aumento de 9,09% do momento resistente em relação ao momento de projeto e um ganho de 5,13% em relação a ligação da viga VE2. O ganho de momento resistência da viga VE2 em relação ao momento de projeto foi de 3,77%. Essa diferença de acréscimo no momento resistente entre as ligações das vigas VE1 e VE2 se deu

devido ao colapso da viga VE2 decorrente de uma flambagem lateral, sendo interrompido o carregamento.

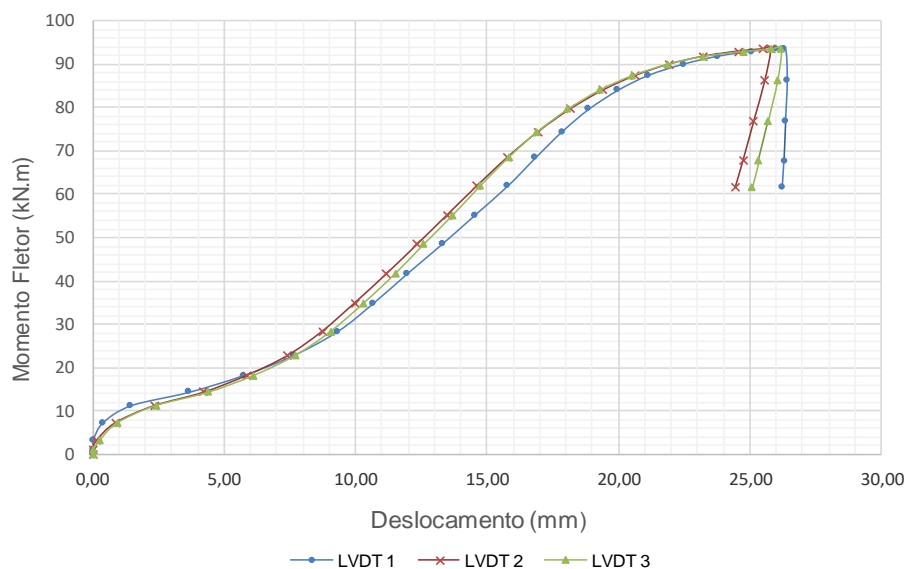


Figura 6. Curva Momento x Deslocamento Vertical

Segundo PFEIL, a flambagem lateral ocorre quando a mesa comprimida sofre um deslocamento lateral ( $u$ ), de modo que o fenômeno se processa por torção ( $\Phi$ ). As principais causas pela por esse tipo de flambagem se dá pela esbeltez da mesa comprimida e, ou pelo comprimento entre dois pontos de contenção lateral (PFEIL). A viga VE1 por sua vez, apresentou flexão local da mesa comprimida e flambagem local do enrijecedor transversal, decorrente da carga que foi aplicada. A figura 7 e a figura 8 mostram, respectivamente, a flexão da mesa da viga VE1 e a flambagem da viga VE2.



Figura 7. Detalhe da flexão da mesa



Figura 8. Flambagem da viga VE2

A tabela 3 mostra o deslocamento do LVDT1 (meio do vão) das vigas VE1 e VE2 e relaciona com o deslocamento teórico apresentado na Eq. 1, fazendo um comparativo com 20%, 40%, 60% e 80% do momento de projeto das ligações ( $M_j$ ).

$$\frac{Pa}{24EI} (4a^2 - 3l^2) \quad (1)$$

em que:

P é a uma carga pontual no enrijecedor.

$a$  é a distância da carga em relação ao apoio.

$l$  é o vão teórico.

$E$  é o módulo de elasticidade.

$I$  é o momento de inércia da seção da viga.

Tabela 3. Deslocamentos verticais das vigas (mm)

	20% M j	40% M j	60% M j	80% M j
VE1	4,8	9,3	12,0	15,2
VE2	5,7	10,9	14,3	17,4
TEÓRICO	0,6	1,2	1,8	2,4

Todos os deslocamentos da tabela 3 encontram-se abaixo do momento de escoamento da viga. A viga VE1 e VE2 apresentaram deslocamentos próximos entre ambas, exibindo o mesmo desempenho em relação ao deslocamento, porém, em comparação com o deslocamento teórico, as duas apresentaram comportamento diferente, exibindo flechas superiores. A flecha admissível máxima para o carregamento, conforme NBR 8800:2008, determinado pela relação  $L/350$ , foi de 3,70 mm. A figura 9 mostra o deslocamento do LVDT1 (meio do vão) das duas vigas, em função do carregamento.

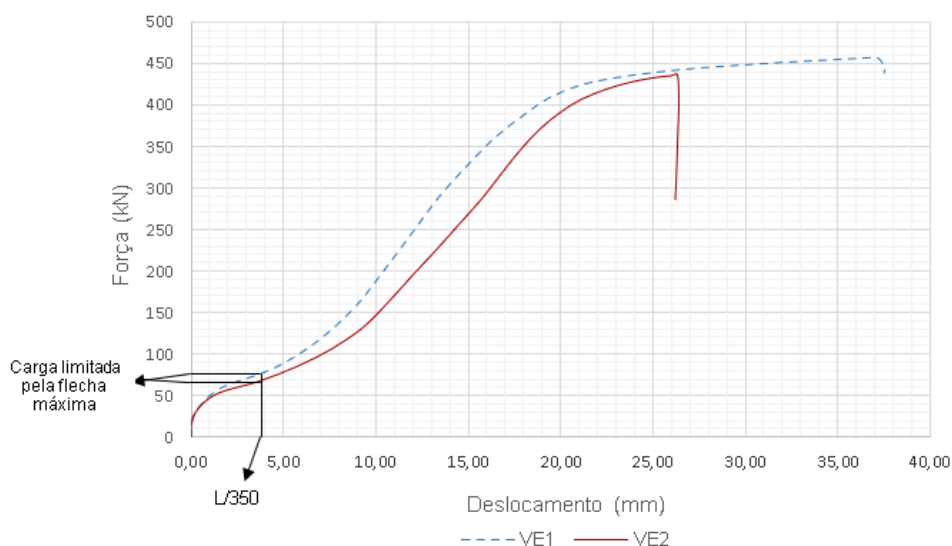


Figura 9. Curva força x deslocamento

Conforme mostra a figura 09, a viga VE1 apresentou um deslocamento máximo de 37,1 mm com um carregamento de 457,66 kN, enquanto a viga VE2 resultou em um deslocamento máximo de 25,8 mm com uma força de 435,35 kN. Essa diferença entre as emendas das vigas ocorreu pelo fato de que a VE2 sofreu uma flambagem lateral, sendo uma das possíveis causas possa ser decorrente de deformações já existentes na seção. A carga atingida devido a flecha máxima admissível ( $L/350$ ) para viga VE1 foi de 75,90 kN, enquanto para a viga VE2 foi de 67,30 kN. O carregamento atingido na flecha admissível teve uma redução em relação a carga máxima da viga VE1 de 83,42% e para a viga VE2 de 84,54%.

As curvas de momento por deformação específica dos Strain Gauges, são mostradas na figura 10, onde SG1 representa os extensômetros de compressão e os SG2 são os extensômetros de tração.

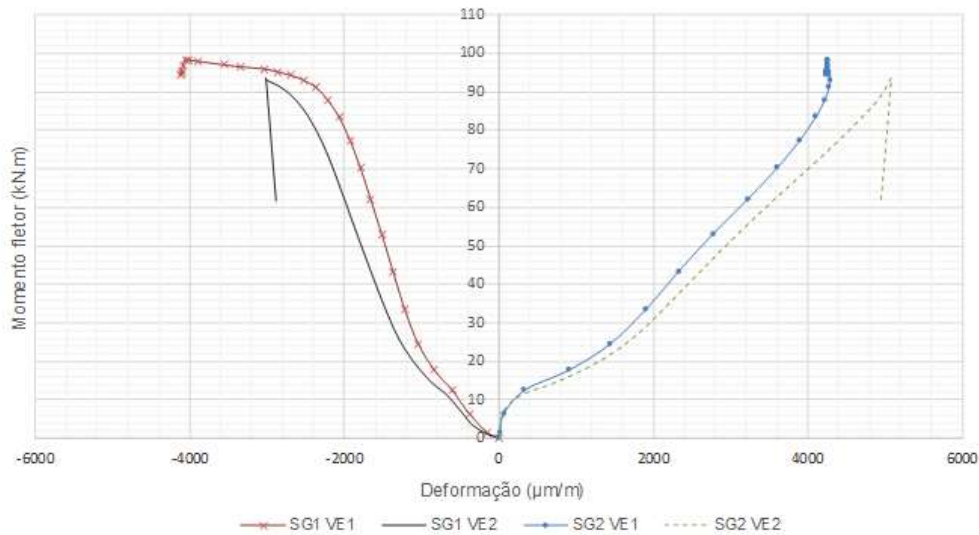


Figura 10. Curva momento fletor x deformação

Conforme apresentado na figura 10, as deformações elásticas geradas pelo momento fletor foram diferentes na tração e compressão, para ambas as vigas. Uma das hipóteses levantadas mostra que durante o carregamento a linha neutra de ambas as ligações das vigas sofreram um deslocamento para cima, em relação ao seu centroide, devido as deformações nas chapas de tração serem superiores as deformações de compressão.

A Figura 11 está representando a rigidez da ligação, através da curva momento por rotação das vigas VE1 e VE2, com os limites de rigidez obtidos pela EUROCODE 3.

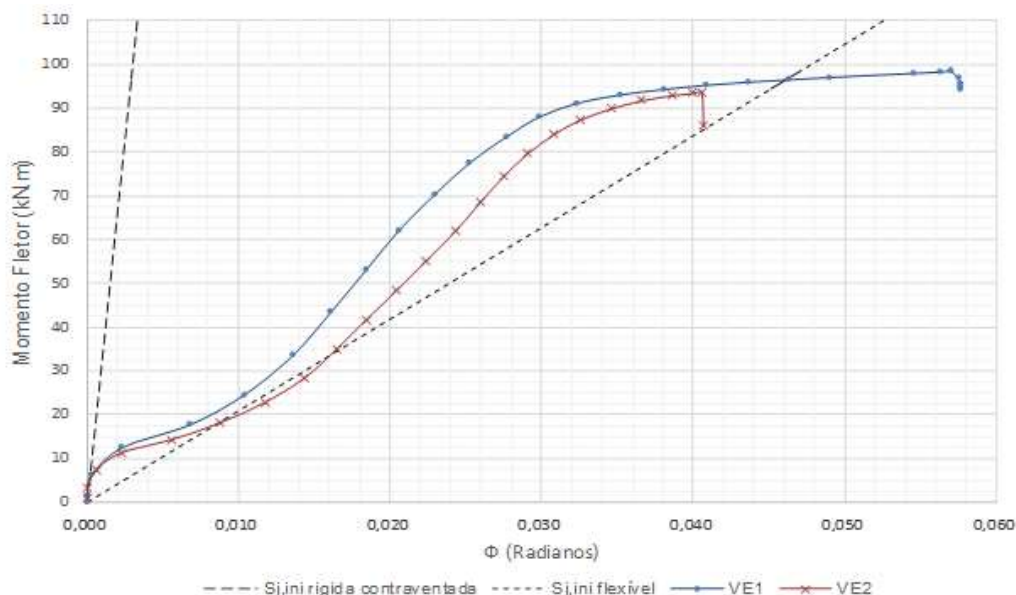


Figura 11. Curva momento x rotação

O gráfico de momento por rotação apresentado na Figura 11 mostra que a ligação das vigas VE1 e VE2 se classificam, conforme a EUROCODE 3, em uma ligação semirrígida, ficando próximo da classe flexível. Isso pode ser comprovado pelas medidas de deformações de compressão e tração que foram aferidas pelos Strain Gauges nas chapas de emenda das mesas e obtiveram diferentes magnitudes mesmo no carregamento elástico da viga.

A rigidez calculada por meio da reta secante na emenda da VE1 ficou em torno de 3051,72 kN.m/rad, enquanto da VE2 foi de aproximadamente 2772,58 kN.m/rad.

## Conclusões

Os resultados apontaram que a resistência das emendas aparafusadas na VE1 e VE2, dimensionadas através da NBR 8800:2008 foram superiores aos calculados teoricamente, apresentando uma carga máxima de 457,66 kN para a viga VE1 e de 435,35 kN para a VE2, não havendo qualquer tipo de colapso da ligação. Nota-se que a VE2 apresenta um



carregamento resistente menor comparada com a VE1 decorrente de uma torção por flambagem lateral, sendo umas das possíveis causas a existência de deformações plásticas na seção. Em relação aos deslocamentos, as duas vigas obtiveram valores superiores a flecha máxima estabelecida por norma, que foi de 3,70 mm. Em virtude disso, a carga máxima limitada pela flecha na viga VE1 indica uma redução de 83,42% na capacidade de carregamento, enquanto na VE2 houve uma perda de 84,54% da carga máxima da viga. As deformações medidas pelos Strain Gauges se demonstraram diferentes nas chapas de compressão e tração, mesmo durante o carregamento elástico da viga, sendo uma das possíveis causas a mudança da linha neutra da seção. Conforme a classificação da ligação da EUROCODE 3, observou-se que as emendas das duas vigas ficaram na classe semirrígida, muito próximo da flexível, o que reforça a hipótese do deslocamento da linha neutra da seção.

Recomenda-se fazer uma análise da ligação através do Método dos Elementos Finitos para verificar quais fatores influenciam na rigidez da ligação para o desenvolvimento de um método de cálculo que possa descrever o comportamento da ligação e qual momento que a ligação suporta.

### Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2 ed. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.

EUROPEAN STANDARD. **Design of steel structures – part 1-8: Design of joints**. Eurocode 3 EM 1993-1-8 (2005).

PEREIRA, R. S. **Ligações em estruturas de aço utilizando emendas com parafusos de alta resistência solicitadas na flexão simples**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento pratico de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.



RELVAS, B. C. L. **Projeto Ótimo de Ligações em Estruturas Metálicas segundo o Eurocódigo 3**. 2009. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Portugal, 2009.

RESENDE, V. N. B. S. **Análise e Dimensionamento de Ligações Metálicas Segundo o Eurocódigo 3: Vantagens no uso de ligações semi-rígidas**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.

VALENCIANI, V.C. **Ligações em estruturas de aço**. 1997. 309 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.