



ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS TENSÕES, DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS ATUANTES EM UMA LIGAÇÃO ENTRE VIGA E COLUNA COM CANTONEIRA DE TOPO E ASSENTO

Julio Cesar Birkheuer, juliobirkheuer@gmail.com¹
Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95184-274, Farroupilha – RS.

Resumo: As vigas e colunas de aço são bastante utilizadas em construções comerciais, como edifícios e estádios, e em construções residenciais. Existem diversas formas de realizar a conexão entre esses componentes, e o uso de cantoneiras de aço em perfil L é um dos mais utilizados atualmente. Porém, a análise dos esforços que ocorrem nas estruturas com essa configuração, como deformações, tensões e rotações na viga e na ligação, são difíceis de serem verificadas com o uso de formulações básicas disponíveis nas literaturas, tornando necessário o uso de métodos de análise por elementos finitos, ou a utilização da extensometria, permitindo ao engenheiro coletar dados mais precisos na análise e dimensionamento dessas estruturas. Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste na análise experimental das tensões, deformações e deslocamentos atuantes em uma ligação entre viga e coluna com cantoneira de topo e assento. Para tal, foram seguidas algumas das etapas da metodologia de projeto, começando por uma verificação na literatura dos tipos de ligações e sua influência na estrutura. Definido o tipo de ligação, foram obtidas as dimensões dos componentes, através da aplicação de um fator de escala em um projeto já existente com as mesmas configurações de ligação. Após, todos os componentes foram projetados em CAD 3D, e com o desenho técnico dos componentes, realizou-se a construção e montagem da estrutura, bem como a instalação dos extensômetros e configuração da vídeo-análise. Por fim foram realizados os ensaios e os dados de deslocamento, tensão e deformação foram coletados para posterior análise e conclusão. Ao final dos testes, os resultados obtidos e analisados permitiram validar o uso da extensometria e vídeo-análise como um método experimental eficiente na análise das rotações, tensões e deformações de uma ligação entre viga e coluna, e assim possa contribuir com uma análise mais precisa desse tipo de estrutura no âmbito científico.

Palavras-chave: tensões, deslocamentos, viga-coluna, extensometria, vídeo-análise.

1. INTRODUÇÃO

Vigas e colunas em aço são utilizadas há muito tempo pelos seres humanos, mesmo antes de serem conhecidas por estes nomes. A capacidade dos homens em transformar os recursos naturais em utensílios ao seu favor são datados desde a Idade da Pedra, quando a utilização da pedra era predominante, e possibilitava trabalhos em madeira para criação de armas para a caça. Com a industrialização, já na idade moderna, principalmente no período da Revolução Industrial, o ferro tornou-se um material muito predominante como matéria-prima para criação do aço, que passou a ser utilizado como principal material na construção de casas, prédios, pontes, dentre diversas outras estruturas.

Tratando-se de estruturas, alguns dos componentes mais conhecidos são as vigas e colunas. Uma das estruturas mais antigas que ainda existem no mundo é a Stonehenge, localizada no condado de Wiltshire no Reino Unido. Nessa estrutura, que é datada de 3100 anos a.C a 2075 anos a.C, já foi possível identificar a utilização de colunas e vigas de pedra para a sua sustentação. Com o passar dos anos, as vigas, que inicialmente eram feitas apenas de pedra entalhada, passaram a ser feitas de madeira. A primeira ponte com estrutura de aço, utilizando vigas, colunas e treliças, foi a Ponte de Eads, sobre o Rio Mississippi, em Saint Louis, Estados Unidos, construída entre 1867 e 1875.

Segundo Zacarias et al. (2013), existe uma crescente evolução no mercado brasileiro, para substituição do concreto armado por estruturas de aço, principalmente em construções de edifícios com múltiplos andares, nas quais é necessária a utilização de vigas com perfil I ou W, e tornado-se necessário conhecer o comportamento das ligações entre os elementos da estrutura. Esta substituição do concreto armado por estruturas metálicas, é devido às suas principais vantagens e benefícios ao projeto, podendo-se destacar a possibilidade de estruturas mais leves e esbeltas, com resistência mecânica superior e mais leves, devido as propriedades geométricas de sua seção transversal. O tipo de ligação entre vigas e colunas mais utilizado eram as ligações rebitadas, porém, com a evolução no estudo das ligações parafusadas, com um melhor entendimento do comportamento das mesmas, e assim, permitindo a criação de projetos mais otimizados, elas se tornaram a opção com mais uso atualmente. As ligações parafusadas se destacam em relação as demais devido a sua facilidade e rapidez na montagem, indiferente do tamanho da estrutura, e podem ser trabalhadas na condição de união

permanente e não permanente, diferente da ligação através de solda, por exemplo, que após aplicada não pode mais ser removida. O aumento na utilização desta configuração de estrutura, gerou um crescente número de estudos, para análise de esforços, tensões, deformações, rotações, entre outros critérios. O principal motivo desses estudos é devido a divergência de valores obtidos em análises analíticas, experimentais, ou através do uso de formulações disponíveis em diversas literaturas e normas técnicas.

De forma teórica, tem-se a disposição atualmente normas técnicas e métodos numéricos, juntamente com formulações disponíveis em diversas literaturas, para o dimensionamento e análise de sistemas estruturais compostos por elementos que se comportam como viga ou coluna. De forma experimental, existem diversas formas de obter os dados para análise da estrutura, e o método mais utilizado atualmente é com o uso da extensometria.

William Thompson, mais conhecido por Lord Kelvin, deu origem a utilização dos extensômetros, quando, em 1856 apresentou resultados de um experimento envolvendo a resistência elétrica de cobre e ferro que foram submetidos a tensões. Com o passar dos anos, e os avanços nesta área de estudo, Edward Simmons e Arthur Ruge, nos anos de 1937 e 1939 respectivamente, utilizaram pela primeira vez fios metálicos colados na superfície de corpos de prova para medir as deformações, originando os extensômetros de resistência elétrica.

Zacarias et al (2013), realizaram uma análise experimental e numérica para avaliação de uma ligação viga-coluna parafusada com chapa de topo. Para tal, foi realizada a aplicação de uma carga estática na extremidade livre da viga, e medido o seu deslocamento vertical com a utilização de um relógio comparador. Na sequência foi realizada a análise numérica, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), que consiste na subdivisão da geometria da estrutura do problema em elementos menores, chamados de elementos finitos e analisado por um software. Segundo os autores, após os testes, com os resultados obtidos após análise numérica e ensaio experimental, foi obtido a curva de força versus deslocamento da estrutura, e através de uma análise linear das curvas, notou-se que o modelo experimental teve comportamento mais rígido em relação ao modelo numérico, com uma diferença chegando em até 17.2 % do valor, mostrando que os métodos geram diferença na análise, mesmo sob as mesmas condições.

Com base nos resultados apresentados nas pesquisas citadas anteriormente, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma ligação com cantoneiras de topo e assento entre viga e coluna para a realização de uma análise experimental com a utilização de extensometria e vídeo-análise, dos deslocamentos, tensões e deformações que ocorrem na cantoneira de topo, e na superfície externa superior e inferior da viga, próximo ao ponto de contato com as cantoneiras de fixação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Características do Aço

O aço é considerado o material mais utilizado na indústria para construção de estruturas. Os motivos pelo seu elevado uso é devido a suas ótimas características físicas, sendo elas resistência, elasticidade, uniformidade, ductilidade e reutilização. Ao se projetar uma estrutura, necessita-se de uma boa resistência e baixo peso, e o aço é um material que possui uma alta resistência por unidade de peso, tornando-o ideal para uso em grandes construções. Mas, para que o aço adquira suas excelentes características, a sua manufatura deve ser rigorosamente controlada desde o processo de siderurgia, no qual o minério de ferro, encontrado na natureza passa por diversos processos térmicos até ser transformado no aço que é comercialmente utilizado.

Segundo Gere (1984), enquanto o aço está em seu regime elástico, a relação entre tensões e deformações ocorrendo são lineares, seguindo a Lei de Hooke, e após ultrapassar o seu limite de elasticidade, o material entra em um regime plástico, na qual começa a sofrer deformação. A capacidade do aço em sofrer deformação sem romper é conhecido como ductilidade. Devido a boa ductilidade do aço, ele resiste a grandes deformações sem falhar, e quando excede o seu limite de resistência é fácil de notar a sua deformação, com isso é possível evitar falhas repentinas nas estruturas. Outra característica importante do aço, que não é muito mencionada na teoria, porém na prática é de suma importância, é a redução no tempo de construção em projetos, pois ao contrário de outros materiais, como o concreto armado por exemplo, ele não necessita de tempo de cura.

2.2. Tipos de Vigas Metálicas

Comercialmente, as vigas metálicas podem ser encontradas em diversas configurações de seção transversal, sendo que as mais conhecidas são os perfis I, H e W, conforme a Fig. 1.

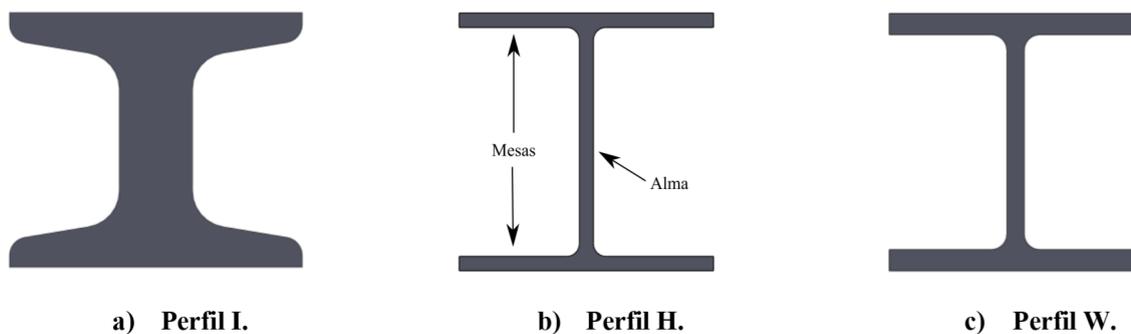


Figura 1 – Configurações de seção transversal para perfis estruturais comercialmente disponíveis.

O perfil I é conhecido por ter as suas abas internas inclinadas, alma de comprimento elevado e mesas mais estreitas, possuindo assim uma alta capacidade de resistência e é usado principalmente na construção civil como alternativa para suportar altas cargas, como prédios, casas, pontes e viadutos. O perfil H possui mesas mais largas e reforçadas, de forma a facilitar a ligação com cantoneiras por meio de parafusos, ou por outras formas de fixação. O perfil W é semelhante ao perfil I, porém, não possui suas abas inclinadas, o que facilita a realização de soldas e a união de outros elementos na estrutura, seu formato também proporciona um peso menor em relação aos demais perfis.

A principal aplicação desses perfis é resistir a grandes cargas em flexão. Segundo Beer et al. (2015) a tensão de vido ao momento fletor em uma viga é influenciado diretamente pelo seu módulo de resistência, que leva em consideração o momento de inércia do perfil geométrico da viga e a distância da superfície externa da viga até a sua linha neutra, por isso, o perfil I se destaca como tendo a maior resistência à inércia, a qual possui uma alma mais comprida, aumenta o seu momento de inércia e a distância na superfície externa até a linha neutra, mas, por outro lado, a torna menos resistente a esforços no seu eixo transversal.

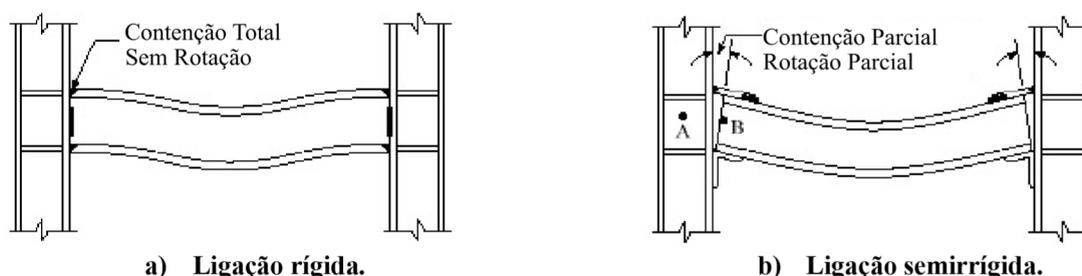
Os perfis soldados também são amplamente utilizados em projetos, devido a possibilidade de serem configurados no perfil que mais se adequa a necessidade. Sua manufatura é realizada seguindo um controle rigoroso, para garantir a qualidade do componente, desde o corte das chapas, por guilhotina, plasma ou oxicorte, limpeza e preparação das peças, montagem do perfil com o uso de gabaritos, a soldagem através de arco submerso, e inspeção final seguindo os critérios da ABNT:NBR5884 (2013).

2.3. Tipos de Ligações

Em uma estrutura viga-coluna, uma das partes mais importante em relação as tensões atuantes é a conexão entre os membros. A estrutura só conseguirá resistir as tensões que foram previamente calculadas, se as conexões entre os membros foram designadas corretamente.

Em análises teóricas, as conexões viga-coluna são geralmente consideradas como engastada, rotulada ou apoiada, essas considerações auxiliam para simplificar a análise das estruturas, mas dessa forma o verdadeiro comportamento da ligação é negligenciado. Na prática, as ligações entre membros são consideradas como rígida ou semirrígida, sendo que a semirrígida é a que mais se aproxima da realidade. De acordo com Faella et al. (2000), quanto mais próxima da realidade for considerada a ligação, mais difícil será de projetá-la, mas por outro lado será bem mais econômica e otimizada.

A Fig. 2 apresenta as diferenças entre os tipos de ligação rígida e semirrígida respectivamente, na qual as ligações rígidas, são caracterizadas por não permitir nenhum deslocamento ou rotação da ligação na estrutura, enquanto que na ligação semirrígida, é permitido um deslocamento e rotação parcial da ligação.



a) Ligação rígida.

b) Ligação semirrígida.

Figura 2 – Diferença das Ligações rígidas e semirrígidas.

Fonte: adaptado de Vinnakota, 2006.

2.4. Extensometria

Sob o ponto de vista teórico, existem diversos procedimentos analíticos sugeridos por normas técnicas, como por exemplo o Eurocode3 (2006), a análise numérica por elementos finitos, apresentado na pesquisa de Zacarias et al. (2013), e também formulações disponíveis na literatura, como as apresentadas por Beer et al (2015). Em se tratando do comportamento real destes sistemas, observa-se que existe uma necessidade de estabelecer uma relação entre os valores obtidos de forma teórica com os valores reais apresentados pela estrutura, de forma a validar a teoria. O uso da extensometria, para análise experimental, vem se tornando cada vez mais comum na indústria, devido a sua simplicidade e facilidade de utilização.

A extensometria é uma técnica experimental, para medição de esforços e deformações através da resistência elétrica de um material. Os extensômetros elétricos são os mais utilizados no mercado atualmente, pois permitem a interação com computadores e softwares de leitura e interpretação dos dados. Eles possuem uma boa precisão, exatidão e facilidade de utilização. Estes extensômetros consistem basicamente em transdutores que convertem a deformação mecânica em sinal de resistência elétrica. Sua grande desvantagem é que não podem ser reaproveitados, pois são colados diretamente na estrutura a ser testada e não podem ser removidos posteriormente (Shakeel et al, 2017).

Segundo Grante (2004), os extensômetros elétricos convertem a deformação mecânica em variação da resistência elétrica. Eles são montados em um circuito elétrico, formando uma ponte de Wheatstone, que é capaz de realizar a medição de variação das resistências elétricas no circuito. A resistência elétrica de um condutor pode ser calculada, conhecendo o seu comprimento, área de seção transversal e resistividade. Se for considerado que na elongação de um fio condutor, com uma seção transversal muito pequena em comparação ao seu comprimento, a resistividade seja insensível a deformação, é possível, através do uso de derivação, que a variação de resistência seja equivalente a variação de comprimento, e a variação de comprimento é a deformação do material, portanto, a deformação pode ser obtida através da variação de resistência elétrica. A razão entre a deformação do material e a variação de resistência elétrica de um extensômetro, é conhecida como Gage Factor, ou fator de sensibilidade (Grante. 2004).

A medida da tensão mecânica é, portanto, obtida através da Lei de Hooke, com base na Eq. (1).

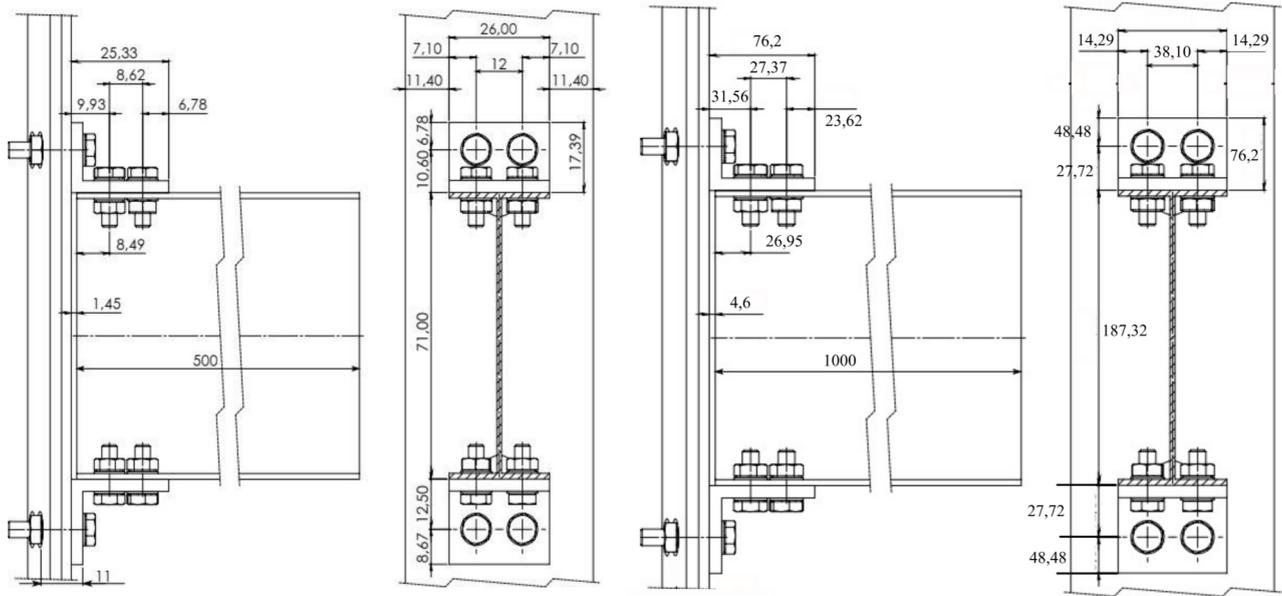
$$\sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

Na qual E é o módulo de elasticidade do material e ε é a sua deformação linear.

3. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

3.1. Projeto Dimensional do Modelo Experimental

Atendendo ao propósito deste trabalho, realizou-se o projeto dimensional do modelo experimental analisado. Para tal, utilizou-se uma estrutura em formato de pórtico plano como referência para este estudo, por possuir características e condições de ligação muito semelhantes à do trabalho desenvolvido, a qual está apresentada na Fig. 3a. Atendendo as limitações de equipamento e espaço laboratorial para execução dos testes experimentais, optou-se por aplicar escala aumentada de 3,175 à ligação selecionada, resultando nas dimensões apresentadas na Fig. 3b.



a) Ligação do tipo cantoneira de topo e assento – coluna e viga em escala original.

b) Ligação do tipo cantoneira de topo e assento – coluna e viga aplicadas a escala aumentada de 3,175.

Figura 3 – Detalhamento e configuração geométrica do modelo experimental.

De acordo com a NBR 8800:2008, é recomendado que vigas esbeltas devam ter a sua resistência aumentada através da instalação de nervuras na sua alma, com o objetivo de evitar a flambagem local da alma, portanto, a viga construída possui quatro nervuras em sua extremidade livre. A Fig. 4 apresenta uma viga esbelta com a aplicação de nervuras ao longo de sua seção, para aumento da resistência.



Figura 4 – Viga esbelta com nervuras.

Fonte: Engenheiro do aço. Disponível em <https://www.engenheirodoaco.com.br/2017/08/18/nervuras-enrijecedores/>

A Tab. 1 apresenta as dimensões originais da estrutura utilizada como referência, apresentada na Fig. 3a, a aplicação da escala aumentada, e as dimensões obtidas, apresentada na Fig. 3b, para construção posterior do modelo experimental.

Tabela 1 – Dimensões da estrutura com aplicação de um fator de escala S= 3,175.

		Escala Normal	Escala Aumentada
Cantoneiras 3" x 1/4"	Abas [mm]	24	76,2
	Espessura [mm]	2	6,35
Viga I	Largura [mm]	21	66,675
	Altura [mm]	59	187,32
	Largura Mesa [mm]	21	66,675
	Espessura Mesa [mm]	1,5	4,75
	Espessura Alma [mm]	1,5	4,75
	Altura Alma [mm]		177,82
Comprimento Viga [mm]			1000

A Tab. 2 apresenta as propriedades mecânicas das chapas utilizadas na construção da viga.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas das chapas de aço utilizadas na construção da viga.

Produto	Especificação	Espessura [mm]	Comprimento [mm]	Peso Líquido [Kg]	Resistência ao Escoamento [MPa]	Resistência a Tração [MPa]
Chapa de Aço Fina Laminada à Quente	ASTM A36 STD	4,750	1200	12,640	281	425

Obtido pelo certificado de qualidade nº 000477535 disponibilizado pela Companhia Siderúrgica Nacional®

Todos os componentes foram conectados, com a utilização de parafusos de aço médio carbono, Grau 5 sextavado com rosca parcial UNC 1/2 - 13FX - 1 3/4" ZB, porcas sextavadas de 1/2" e arruelas lisas de aço com espessura de 1 mm. A Tab. 3 apresenta as propriedades mecânicas dos parafusos.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas dos Parafusos

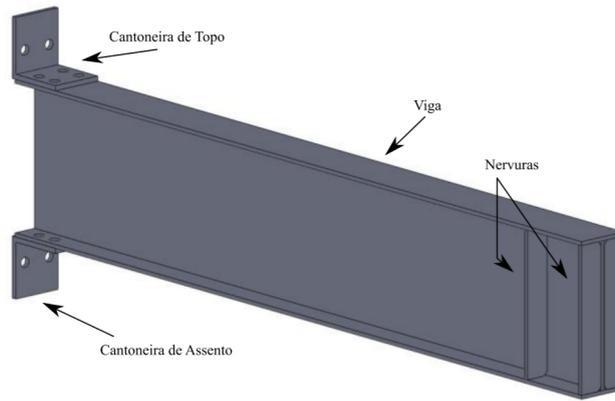
Tensão de Tração Nominal [MPa]	Tensão sob Carga de Prova [MPa]	Carga de Prova [N]	Torque [Nm]	Área de Tensão de Tração [mm ²]	Comprimento [mm]	Comprimento Liso [mm]	Comprimento Rosqueado [mm]
828	586	53900	101	91,5	44,45	12,7	31,75

Dados disponíveis gratuitamente em: <http://www.fusopar.com.br/produtos>

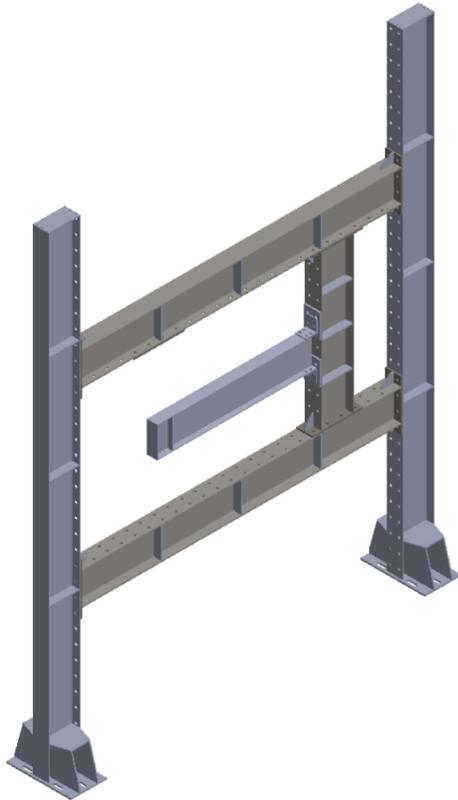
3.2. Construção do Modelo Experimental

Definidas as dimensões dos componentes da estrutura, nessa etapa foi realizada a modelagem geométrica em 3D com o uso do software Solidworks® de cada componente, e a montagem da estrutura para conferência da viabilidade de sua montagem no laboratório. Após, foram elaborados os desenhos técnicos que auxiliaram nos processos de usinagem dos componentes, para ficarem nas dimensões corretas em escala aumentada, apresentadas na Tab. 1.

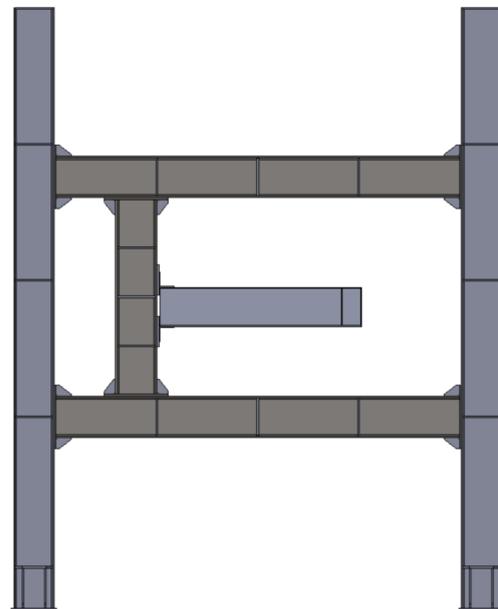
A Fig. 5 apresenta a montagem geral da estrutura em CAD 3D, na qual a Fig. 5a é o modelo experimental construído para o estudo, e as Fig. 5b e 5c apresentam o modelo experimental fixado em uma estrutura já construída, que serviu como base para os testes.



a) Modelo experimental.



a) Vista isométrica.



b) Vista frontal.

Figura 5 – Estrutura montada em Solidworks®.

Finalizada a modelagem geométrica dos componentes, e com o auxílio dos desenhos técnicos, foi realizada a fabricação de cada componente, seguindo as dimensões definidas na Tab. 1, e estão melhores descritas individualmente para cada um dos componentes abaixo.

- Cantoneiras: As duas cantoneiras adquiridas do fornecedor já possuíam as abas e espessura nas medidas corretas. Através de um processo de usinagem, utilizando uma fresadora horizontal, as cantoneiras ficaram nas larguras corretas. Na sequência, foram realizadas as furações para os parafusos de fixação, também com a utilização da fresadora horizontal.
- Viga I: As chapas adquiridas para a construção da viga já estavam na espessura correta, pois era um valor comercial de chapas. Através de um processo de usinagem, utilizando uma fresadora horizontal, as chapas ficaram nos comprimentos e larguras corretas. Na sequência, foram realizadas as furações para os parafusos de fixação, também com a utilização da fresadora horizontal. Após estarem nas medidas corretas, as chapas foram montadas na forma de I, utilizando grampos de fixação, e realizada a soldagem da alma com as mesas, utilizando solda MAG com gás de proteção CO₂. A garganta de solda seguiu o recomendado pela norma ABNT:8800 (2008), que determina a garganta mínima de solda como sendo a espessura da chapa a ser soldada.

3.3. Instalação dos Extensômetros

Para realizar a colagem dos extensômetros, a superfície dos componentes precisou passar por algumas etapas de preparação, de modo a remover qualquer impureza de material ou sujeira externa, que poderia interferir na leitura da resistência dos extensômetros, e na sequência foi realizada a fixação na superfície dos componentes, utilizando pasta fixadora KBR-60. Foram utilizados extensômetros unidirecionais do modelo PA-13-125BA-350-L em todos os componentes, para a coleta das informações de tensões e deformações.

A Fig. 6 apresenta a cantoneira de topo e a viga, com os extensômetros colados.



Figura 6 – Extensômetros colados nos componentes.

3.4. Atuador Hidráulico

O ensaio realizado no modelo experimental, utilizou uma condição de carregamento estático vertical concentrado, a uma distância fixa de 50 mm da extremidade livre da viga, entre as nervuras da mesma. Este carregamento é composto por um atuador hidráulico manual, com uma célula de carga fixo em sua extremidade. A Fig. 7 apresenta o atuador hidráulico utilizado para os testes, e o seu mecanismo de deslocamento linear, que permite o posicionamento correto acima da viga para os testes.

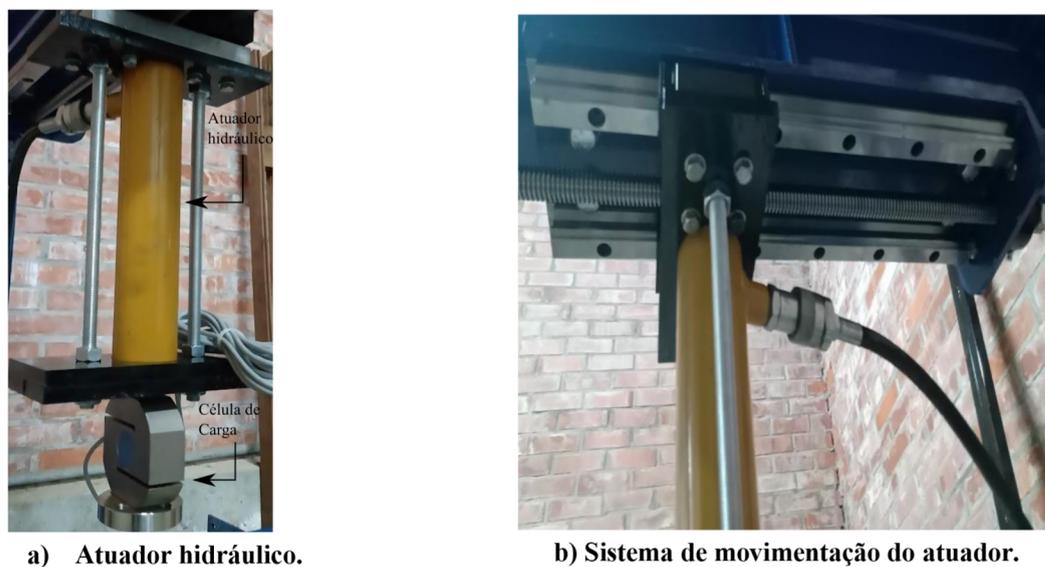


Figura 7 – Atuador hidráulico para os testes no modelo experimental.

4. MONTAGEM DO MODELO EXPERIMENTAL

Com todos os componentes fabricados e os extensômetros colados, foi realizada a montagem geral da estrutura. Utilizando como referência a montagem construída no software Solidworks®, apresentando na Fig. 6, a montagem da estrutura foi realizada, seguindo os seguintes passos.

- Cantoneiras de topo e assento: as cantoneiras foram posicionadas nas furações previamente demarcadas na coluna, e com o auxílio de um Torquímetro de Estalo Robust GBR5900-20, foram realizados os apertos nos parafusos, aplicando um torque de 101 Nm, conforme indicado pelo fabricante, apresentando na Tab. 3.
- Viga I: com as cantoneiras de topo e assento fixadas na coluna, a viga foi posicionada entre as cantoneiras, posicionando as furações corretamente, e os parafusos foram apertados, também com o auxílio do torquímetro mencionado anteriormente, aplicando um torque de 101 Nm, conforme indicado pelo fabricante, apresentado na Tab. 3.
- Atuador Hidráulico: o atuador hidráulico foi posicionado verticalmente a uma distância de 50 mm da extremidade livre da viga, de modo a sua carga ser aplicada em uma posição entre as nervuras da viga.
- Relógios Comparadores: dois relógios comparadores foram posicionados no modelo experimental, sendo um deles na coluna, ao lado da cantoneira de topo, e o outro na viga, na mesma posição que o atuador hidráulico foi posicionado.

Na Fig. 8 é possível observar o modelo experimental fabricado e montado, e a Fig. 9 complementa com detalhes dos componentes com maior importância na estrutura, bem como os extensômetros na cantoneira de topo e viga.

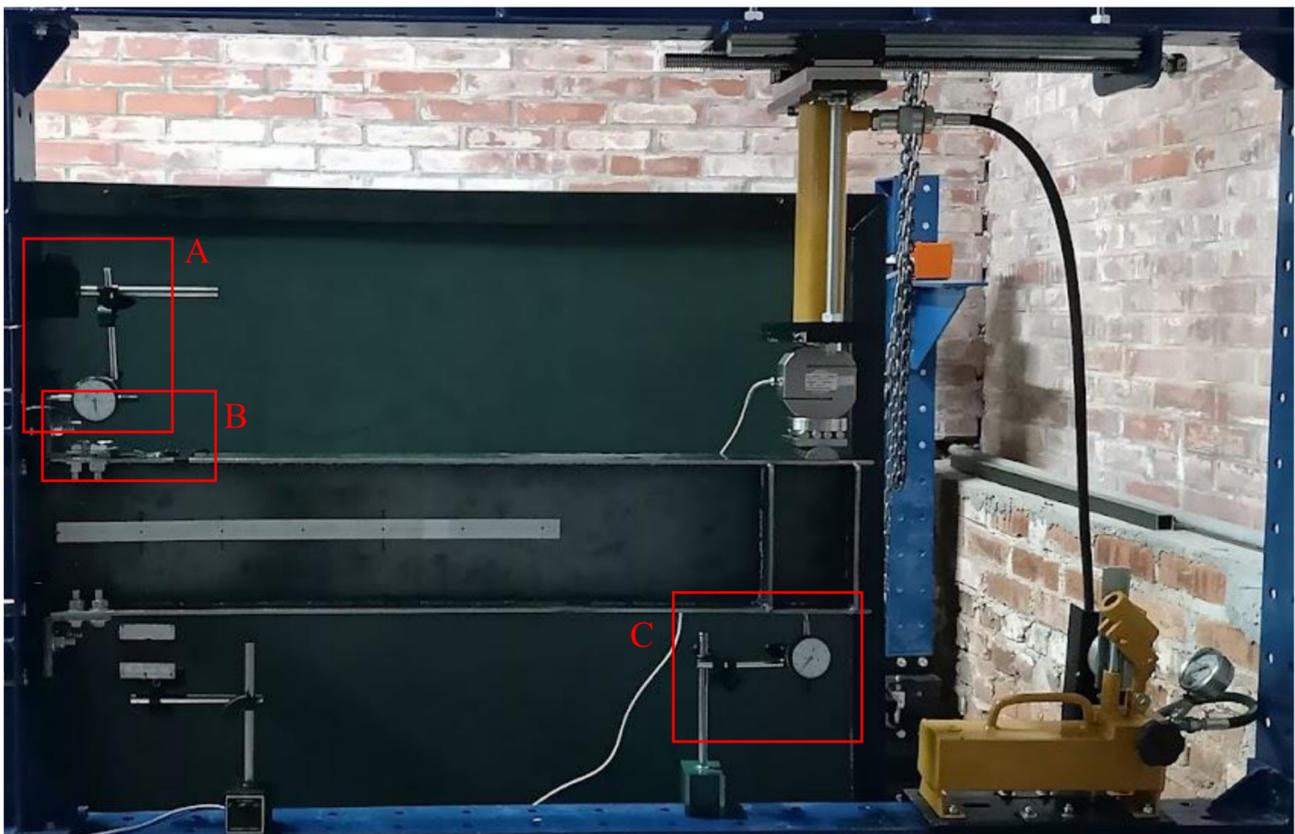


Figura 8 – Modelo experimental construído e montado.

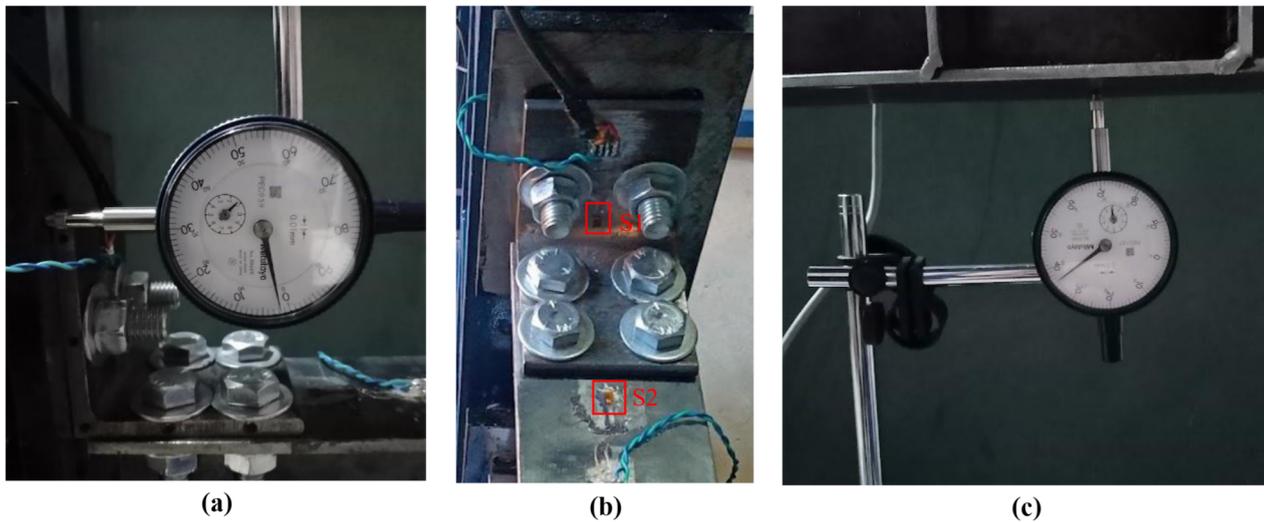


Figura 9 – Detalhamento dos componentes onde a) Relógio comparador na coluna, b) Extensômetros na cantoneira e viga e c) Relógio comparador da viga.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 Instrumentação

O modelo experimental construído, permitiu a realização de ensaios em uma ligação com cantoneira de topo e assento entre viga e coluna. Foi possível realizar ensaios para análise de tensões e deformações nos componentes da estrutura, através da extensometria, e a análise dos deslocamentos nos componentes da estrutura, através de técnicas de vídeo-análise, quando aplicado uma força vertical estática sob a viga na condição de engaste livre. Os componentes utilizados para a realização desses estudos estão listados e descritos na sequência.

- (a) Extensômetros: Para análise das tensões e deformações atuantes, foram colados extensômetros na cantoneira de topo, e nas superfícies externas superior e inferior da viga.
- (b) Célula de carga do sistema de carregamento vertical: utilizado para monitorar o carregamento aplicado na estrutura.
- (c) Técnica de vídeo-análise: Para verificar os deslocamentos verticais e horizontais na cantoneira de topo e linha neutra da viga, para tanto, foi instalado um smartphone Motorola G8 Play, com uma câmera de vídeo traseira de 13 Mp perpendicular aos pontos analisados.

5.2 Sistema de Controle e Monitoramento

Com o propósito da realização de ensaios com extensometria e vídeo-análise, foi acoplado ao modelo experimental um sistema composto por *hardware* e *software*. O *hardware* contempla os componentes responsáveis pelo carregamento vertical estático na estrutura. Conforme apresentado na Fig. 10, o *hardware* consiste nos seguintes equipamentos:

1. Atuador hidráulico, já apresentado anteriormente na Fig. 6, que é controlado manualmente;
2. Célula de carga, responsável por monitorar o carregamento aplicado na viga;
3. Fonte de alimentação, responsável pelo funcionamento da célula de carga;
4. Computador, usado para compilação do *software* e controle do sistema;
5. Câmera de vídeo, utilizada para monitorar deslocamentos em pontos pré-estabelecidos;
6. Extensômetros, utilizados para captar deformações em um determinado ponto;
7. Sistema de Aquisição Keysight 34972A, cuja função é a leitura dos dados experimentais.

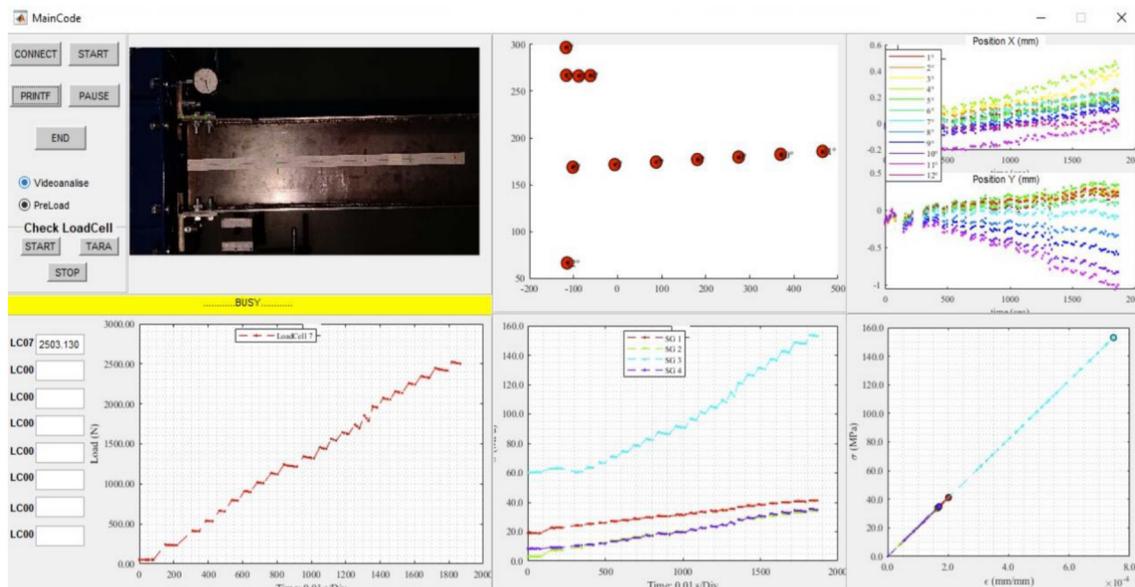


Figura 10 - Hardware.

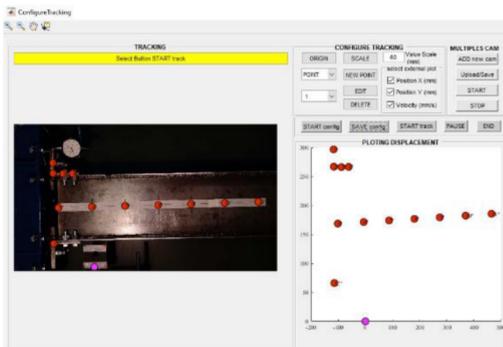
O controle do *hardware* apresentado na Fig. 10 é realizado através de um *software* escrito na linguagem Matlab®.

O *software* é dividido em 2 subprogramas que possibilitam a configuração dos canais a seguir: (configSG) conectado aos extensômetros e (configTracking) que configura o sistema da vídeo-análise. Os algoritmos dos subprogramas mencionadas, também foram implementados na linguagem Matlab®.

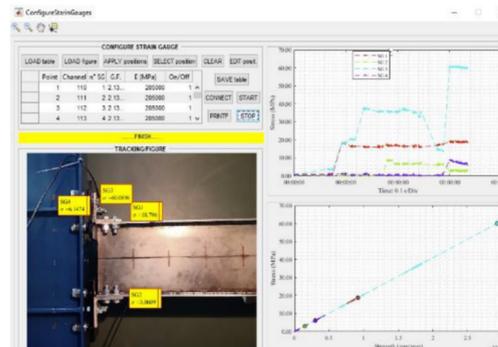
A interface gráfica do *software* e seus subprogramas é apresentada na Fig. 11.



(a)



(b)



(c)

Figura 11 - Interface gráfica onde a) Software principal, b) Subprograma ConfigureTracking e c) Subprograma ConfigureStrainGauges.

Os subprogramas são compilados ao programa principal, através de um pré-processamento. Esses subprogramas tem como função a calibração dos extensômetros, sistema de vídeo-análise e célula de carga. A lógica desenvolvida no processo de carregamento do atuador hidráulico na viga e coleta dos dados pelo software pode ser resumida nas seguintes etapas:

- Através da interface gráfica do subprograma ConfigureStrainGauges (Fig. 11c), é informado o valor do Gage Factor dos extensômetros, o Módulo de Elasticidade do material de cada componente a ser analisado, e a indicação do canal em que os extensômetros foram conectados no Sistema de Aquisição. O sistema de Aquisição envia para o computador o diferencial de tensão amplificado dos extensômetros, onde o programa principal realiza a conversão desse sinal elétrico em medida de força atuante no componente no qual o extensômetro está colado, e disponibiliza na interface gráfica os valores iniciais de tensões e deformações.
- Através da interface gráfica do subprograma ConfigureTracking (Fig. 11b), a câmera é conectada ao software, e disponibiliza a imagem do modelo experimental. Na sequência, são realizadas as marcações dos pontos na qual serão analisados os deslocamentos dos componentes durante os testes, e os pontos são disponibilizados na interface gráfica como pontos iniciais dos componentes.
- O atuador hidráulico é acionado manualmente, e a célula de carga entra em contato com a viga e começa a aplicar carregamento. Os extensômetros sofrem deformação linear, alterando a sua resistência elétrica, e o sistema de Aquisição envia para o computador o diferencial de tensão amplificado dos extensômetros, onde o programa principal realiza a conversão desse sinal elétrico em medida de força atuante no componente na qual o extensômetro está colado, e disponibiliza na interface gráfica os novos valores de tensões e deformações em cada componente.
- Com a aplicação de carga pelo atuador hidráulico, detalhada anteriormente, a câmera registra a movimentação do modelo experimental e envia a imagem para o software, que identifica a nova posição dos pontos marcados inicialmente, e registra na interface gráfica essa nova posição.
- Para cada aplicação de carga, a intensidade da carga é captada pela célula de carga, que, conectada ao sistema de aquisição, envia o diferencial de tensão amplificado ao computador, onde o programa principal converte o sinal elétrico em medida de força atuante na respectivamente aplicação de carga.

É importante ressaltar que, após cada aplicação de carga pelo atuador hidráulico, o programa principal é interrompido, até que todas as leituras dos extensômetros e da vídeo-análise sejam coletadas e registradas ao programa. Sendo assim, a cada incremento de carga do atuador hidráulico, o software registra a intensidade da força na célula de carga, as tensões e deformações dos extensômetros, e os deslocamentos dos pontos do módulo experimental.

5.3 Protocolo de Carregamento

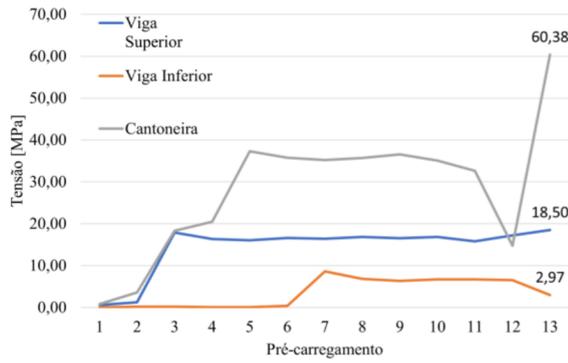
Para controlar o carregamento aplicado pelo atuador hidráulico de forma estática concentrada no modelo experimental, por ser um controle manual, foi utilizado o relógio comparador conectado na viga (Fig. 9c). O atuador hidráulico foi acionado manualmente, e ao aplicar carga concentrada na viga, o relógio comparador registrou o deslocamento vertical. Para manter uma padronização na aplicação da carga, cada carregamento foi realizado até que o relógio comparador registrasse um deslocamento vertical de 0,1 mm. Ao final do ensaio, o relógio comparador registrou um deslocamento total de 2,3 mm, portanto, foram aplicados 23 carregamentos verticais concentrados, para coleta dos dados e posterior análise.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

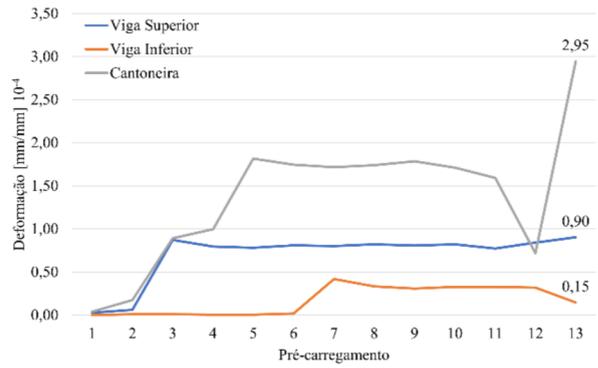
6.1 Tensão e Deformação Devido à Pré-carga Aplicada nos Parafusos

O modelo experimental já possuía tensões iniciais nos parafusos, cantoneiras e viga, devido ao pré-carregamento de aperto dos parafusos, realizado com o torquímetro detalhado anteriormente. Com o propósito de registrar o comportamento dos componentes durante o aperto dos parafusos, para cada pré-carregamento aplicado, realizou-se o monitoramento das tensões e deformações ocorrendo na cantoneira de topo e viga.

Foram utilizados no total 12 parafusos para fixação de todo modelo experimental, portanto, ocorreram 12 coletas de dados pelo *software*, para análise. Na Fig. 12 são apresentadas as tensões e deformações na cantoneira de topo e superfícies externas e internas da viga, após o pré-carregamento dos parafusos no modelo experimental.



a) Tensão durante o aperto.



b) Deformação durante o aperto.

Figura 12 – Tensões e deformações devido ao aperto dos parafusos.

É possível verificar que após o pré-carregamento aplicado nos parafusos, a cantoneira de topo estava suportando uma tensão inicial de 60,38 MPa e uma deformação de 0,00029, antes da aplicação do carregamento vertical concentrado na extremidade livre da viga. Isso demonstra que o pré-carregamento produz tensões significativas aos componentes da ligação, as quais devem ser consideradas como tensões iniciais presentes na estrutura antes da carga de trabalho ser aplicada.

6.2. Tensão e Deformação do Modelo Experimental

Conhecendo os valores de tensões e deformações iniciais devido ao torque de pré-carregamento aplicado aos parafusos, conforme a Fig. 12, foi possível realizar os testes que eram o objetivo do estudo. As tensões iniciais foram inseridas no *software*, e na sequência foram aplicados os carregamentos estáticos com o atuador hidráulico, seguindo as etapas detalhadas anteriormente. A Fig. 13 apresenta a carga aplicada nos testes em cada carregamento pelo atuador hidráulico, e a Fig. 14 apresenta as tensões e deformações na cantoneira de topo e superfícies externas e internas da viga, devido a aplicação de carga em sua extremidade livre, pelo atuador hidráulico, que eram divididos em 23 carregamentos.

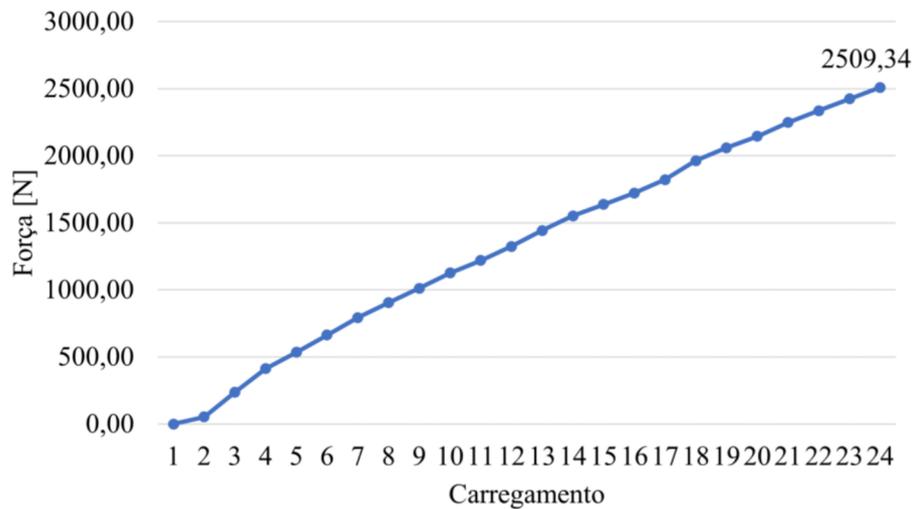


Figura 13 – Força aplicada no modelo experimental.

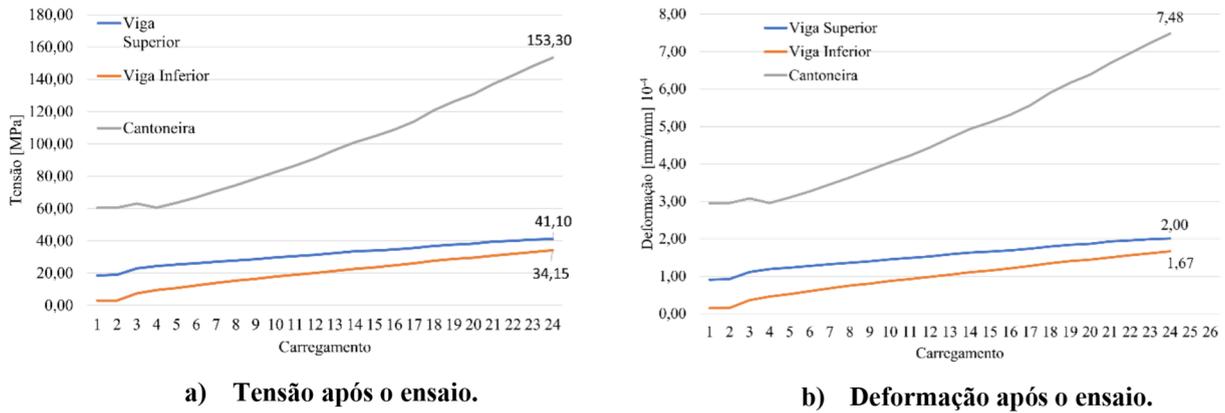


Figura 14 - Tensões e deformações após o ensaio.

Foi possível identificar que o componente mais solicitado da estrutura foi a cantoneira de topo, que chegou a uma tensão máxima de 153,3 MPa e deformação de 0,000747, seguido pela superfície externa superior e inferior da viga. Analisando os resultados apresentados na Fig.14, houve a linearidade na relação de tensão e deformação, conforme é descrito pela Lei de Hooke, garantindo que os testes foram realizados no regime elástico do modelo experimental, e que pode ser verificado na Fig. 15.

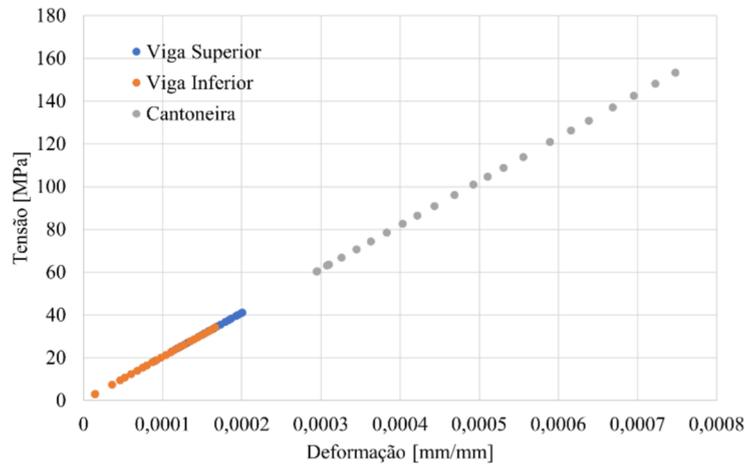


Figura 15 – Tensão x Deformação.

6.3 Deslocamento dos Componentes

A obtenção dos deslocamentos dos componentes ocorreu simultaneamente com a das tensões e deformações descritas anteriormente. As deformações iniciais foram inseridas no *software*, de acordo com os valores apresentados na Fig. 12b, e na sequência foram aplicados os carregamentos com o atuador hidráulico. Ao aplicar carga na viga, com o uso do atuador hidráulico, os deslocamentos dos pontos nos componentes do modelo experimental foram captados pelo *software*. A Fig. 16 apresenta os pontos que foram marcados na estrutura, através do subprograma ConfigureTracking, apresentando na Fig. 11b. A Fig. 17 apresenta os deslocamentos em relação ao eixo Y da cantoneira de topo e viga após os testes no modelo experimental.

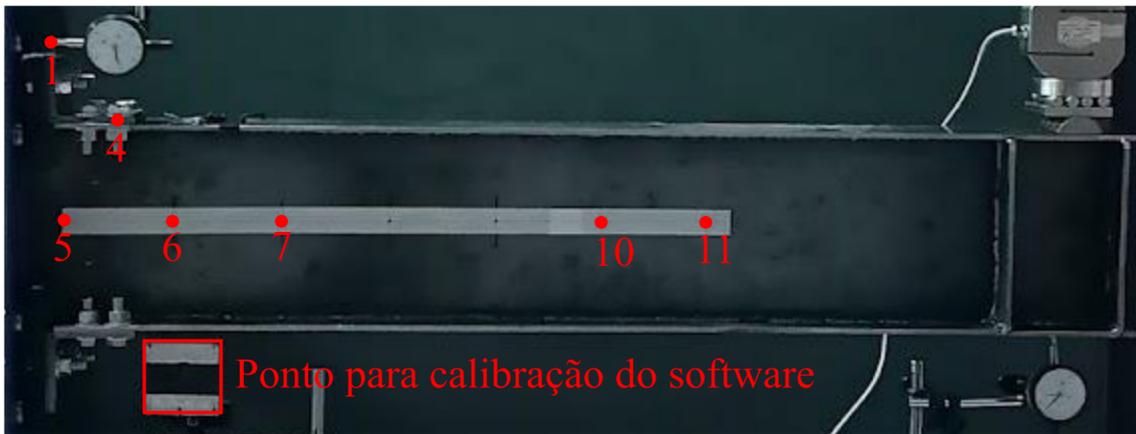


Figura 16 – Pontos para vídeo-análise do modelo experimental.

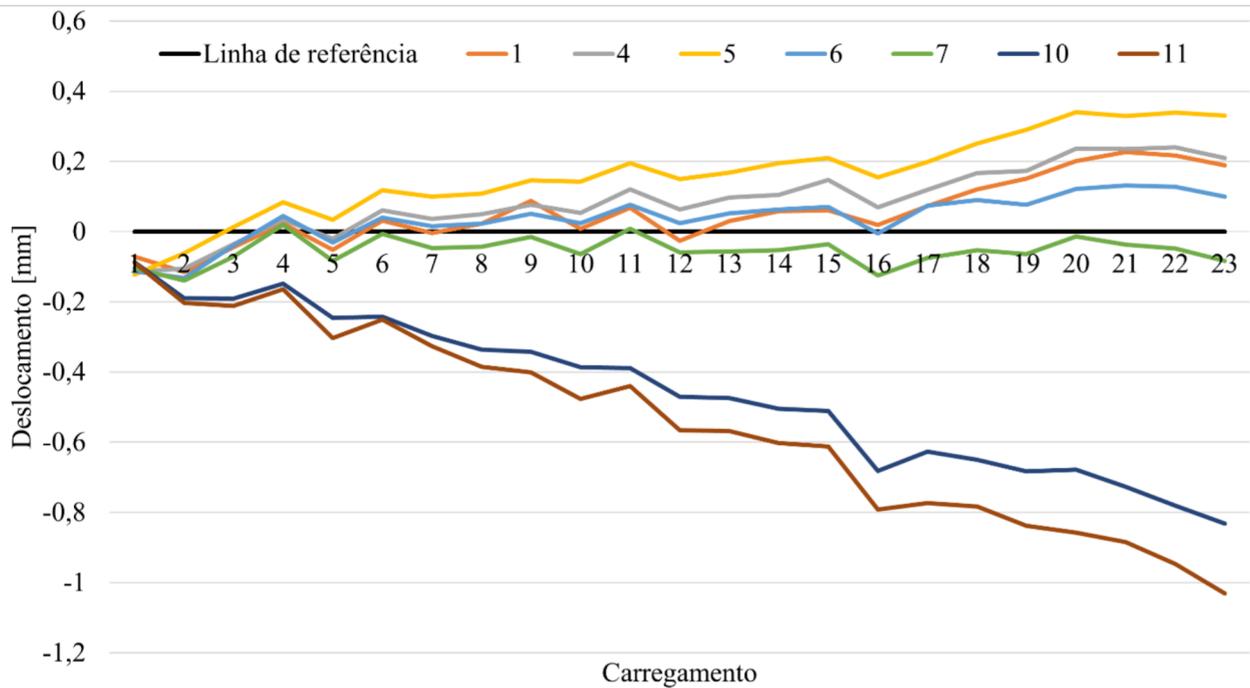


Figura 17 – Deslocamentos no eixo Y.

Foi possível identificar que o ponto com maior deslocamento, foi o ponto 11, no valor de 1,03 mm, que conforme apresentado na Fig. 16 é o ponto na linha neutra da viga mais próximo da aplicação da carga, o que é um comportamento esperado de uma viga engastada, com a aplicação de carga estática concentrada em sua extremidade livre. Também foi possível identificar, conforme o deslocamento dos pontos analisados, que dos pontos 1 a 6, que estão próximos da região da ligação com as cantoneiras de topo e assento, o deslocamento dos componentes foi positivo, enquanto que, a partir do ponto 7 até 11, que estão mais afastados da região da ligação com as cantoneiras, o deslocamento foi negativo, resultando em uma flexão da viga em forma de U.

A Fig. 18 apresenta os deslocamentos dos pontos em relação ao eixo X da cantoneira de topo e da viga após os testes no modelo experimental.

A linha de referência apresentada nas Fig. 17 e 18 não representam a linha neutra da viga, trata-se de uma linha utilizada como referência ao longo dos testes, para verificar se os deslocamentos dos pontos foram negativos ou positivos durante o ensaio.

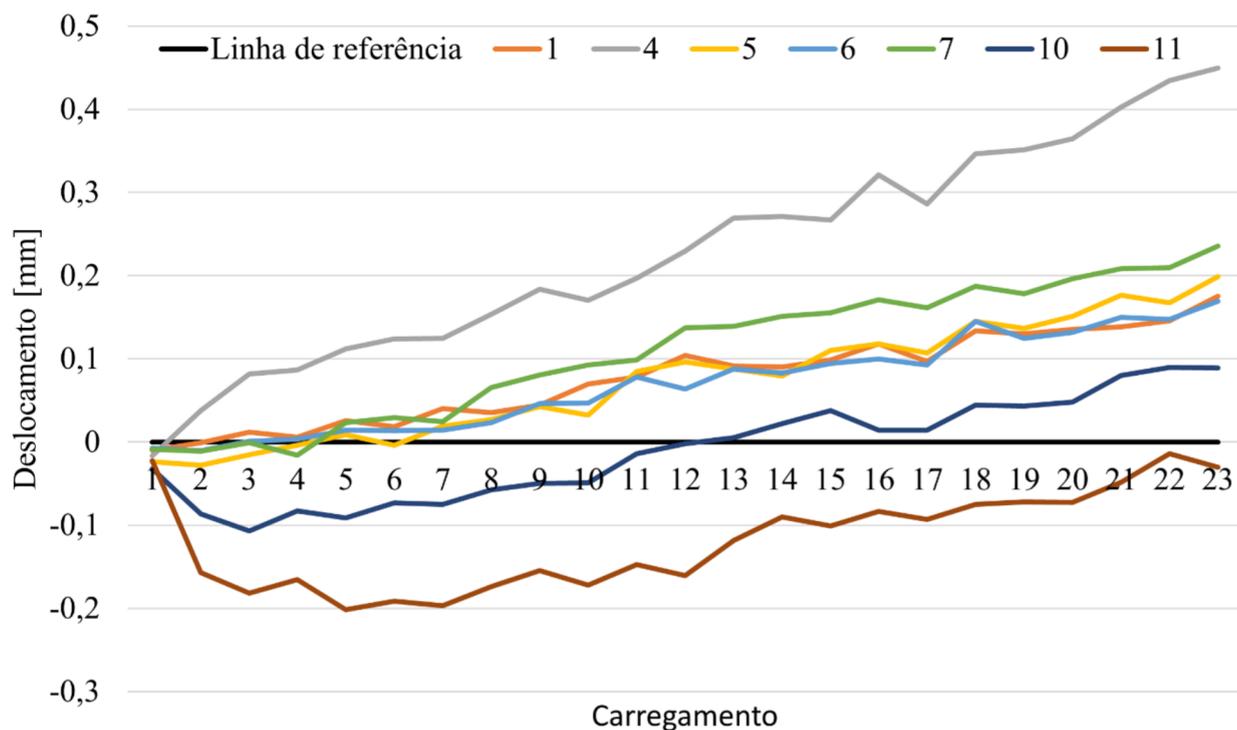


Figura 18 – Deslocamentos eixo X.

Foi possível identificar que os pontos com maior deslocamento foram os pontos 4 e 1 respectivamente, que são os pontos da cantoneira de topo, conforme apresentado na Fig. 16, com maior deslocamento no valor de 0,4496 mm. O relógio comparador que foi conectado na coluna, apresentado na Fig. 9a, ao final do ensaio, registrou um deslocamento próximo de 0,2 mm, ficando semelhante ao valor do ponto 1, apresentado na Fig. 16, no valor de 0,1752 mm, validando a utilização da vídeo-análise no ensaio.

7. CONCLUSÃO

O estudo de ligações entre viga e coluna de aço está em constante crescimento, apresentando análises experimentais, numéricas e analíticas, para diversos tipos de conexão, e este estudo se concentra em validar o uso da extensometria e técnica de vídeo-análise, como método de análise experimental. Um modelo de ligação entre viga e coluna, com o uso de cantoneiras de topo e assento foi dimensionado e fabricado em aço, para verificar os resultados experimentais, e desta forma, validar a proposta de modelo experimental e auxiliar outros trabalhos que buscam entender o comportamento deste tipo de estrutura, aperfeiçoando o projeto de estruturas em escala real, aumentada ou reduzida.

O modelo construído possibilitou a realização de ensaios experimentais quanto as tensões, deformações e deslocamentos da cantoneira de topo e viga, validando o uso da extensometria e técnica de vídeo-análise como análise experimental, e podem ser utilizados para comparação com outros métodos, como a verificação analítica por formulações, ou uma análise numérica através do método de elementos finitos, conforme foi utilizado em estudos apresentados anteriormente.

O comportamento estrutural durante o teste foi analisado através da coleta de informações em tempo real utilizando célula de carga, extensômetros e técnica de vídeo-análise. Foram obtidas curvas de carregamento, deslocamento da estrutura, tensão e deformação atuando em regiões de interesse e a curva de tensão versus deformação, que são dados fundamentais para a análise e compreensão do modelo experimental, podendo ser utilizados para calibração de modelos numéricas ou para outros estudos experimentais.

O experimento usou o método de carregamento estático concentrado, através da aplicação manual da carga pelo atuador hidráulico, adequando-se as limitações de velocidade de leitura do sistema, na qual o sistema pode ser interrompido a cada aplicação de carga, para fazer as leituras e interpretações do modelo experimental, e disponibilizar os resultados obtidos sem o risco de divergências.

8. REFERÊNCIAS

- Beer, Ferdinand P.; E. Johnston, Russell Jr., Dewolf, John T.; Mazurek, David. F.. Mecânica dos Materiais. 7. Ed. McGraw-Hill, 2015
- Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith, “Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica”, 8ª ed, Ed AMGH, Porto Alegre, RS, 2011, 1088 p.
- Eurocode 3, E....., 2006. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Union.
- Faella. C., Bursi, O.S., and Zandonini, R.. (2000). Structural steel semi-rigid connections: Theory, design, and software. CRC Press. 2000.
- Gere, J. M. and Timoshenko, S. P. Mechanics of Materials, 2. Ed., Wadsworth, Bemont, CA., 1984. 660-666.
- GRANTE. Apostila de Extensometria. Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.
- Hibbeler, R. C. Resistência dos Materiais. 7. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.
- I. Jerkovic.; A. M. Grancaric, V. Kocar. Structural Health Monitoring of Composites with Newly Developed Textile Sensors In Situ. University of Zagreb, Faculty of Textile Technology, Department of Textile Chemistry and Ecology, Prilaz baruna Filipovica 28a, Zagreb, Croatia. 2018.
- Lima, L. Resistência dos Materiais IV – Capítulo 6 – Análises Experimental de Tensões. UERJ – FEN – ESTR. 2017.
- NBR-5884, 2013. Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR-8800, 2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios - procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Shakeel, Muhammad. Khan, Wasim A. Rahman, Khalid. Fabrication of cos effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique. Sensors and Actuators A: Physical – Elsevier. Pág 123-130. Mar. 2017
- Vinnakota, S. (2006). Steel Structures: Behaviour and LRFD. McGraw-Hill, Inc.
- Zacarias et al. Estudo numérico experimental para avaliação de uma ligação parafusada viga-coluna com chapa de topo. Universidade de Passo Fundo. 2013

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TENSIONS, DEFORMATIONS AND DISPLACEMENTS ACTING IN A CONNECTION BETWEEN BEAM AND COLUMN WITH TOP ANGLE AND ACCENT

Julio Cesar Birkheuer, juliobirkheuer@gmail.com¹

Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95184-274, Farroupilha – RS.

Abstract: *Steel beams and columns are widely used in commercial construction, such as buildings and stadiums, and in residential construction. There are several ways to make the connection between these components, and the use of L-profile steel angles is one of the most used nowadays. However, the analysis of the efforts that occur in structures with this configuration, such as deformations, stress and rotations in the beam and in the connection, are difficult to be verified using basic formulations available in the literature, making it necessary to use analysis methods by finite elements, or in the use of extensometry, allowing the engineer to collect more accurate data in the analysis and dimensioning of these structures. Therefore, the objective of this work consists in the experimental analysis of the stresses, strains and displacements acting in a connection between beam and column with top angle and accent. To this end, some of the stages of the design methodology were followed, starting with a literature review of the types of connections and their influence on the structure. Once the type of connection was defined, the dimensions of the components were obtained by applying a scale factor to an existing project with the same connection configurations. Afterwards, all components were designed in 3D CAD, and with the technical drawing of the parts, the construction and assembly of the structure was carried out, as well as the installation of the strain gauges and configuration of the video analysis. Finally, the tests were carried out and the displacement, stress and deformation data were collected for further analysis and conclusion. At the end of the testes, the results obtained and analyzed allowed us to validate the use of extensometry and video analysis as an efficient experimental method in the analysis of rotations, stresses and deformations of a connection between beam and column, and thus can contribute to a more accurate analysis of this type of structure in the scientific scope..*

Keywords: *stresses, displacements, beam-column, extensometry, video analysis.*