

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
RIO GRANDE DO SUL
Câmpus Farroupilha

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL PARA REALIZAÇÃO DE TESTES ENVOLVENDO ESTRUTURAS MECÂNICAS EM ESCALA REDUZIDA

**Lucas Pegoraro, lucasengineering@hotmail.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 95180-000, Farroupilha – RS.

Resumo: *Em muitos aspectos, os aços estruturais são preferíveis ao concreto como material de construção devido suas propriedades. Ao longo dos anos surgiram diversos estudos experimentais para analisar seu comportamento real, no intuito de obter estruturas mais leves, resistentes e seguras. Em projetos analíticos de estruturas de aço, é comum observar coeficientes que necessitam constantemente de aferição, conforme o que se observa na natureza. No entanto, obter estes dados em campo pode tornar os projetos inviáveis ou ainda devido às limitações físicas laboratoriais estes estudos são negligenciados. Neste aspecto, modelos físicos em escala reduzida são uma alternativa barata e de fácil construção que podem ser testados e comparados aos protótipos de escala real, embora que ainda seja necessário explorar alternativas para os sistemas adequados de aplicação de carga. O objetivo principal deste trabalho consiste no projeto e construção de equipamento experimental para realização de testes envolvendo estruturas mecânicas em escala reduzida sob carregamento vertical distribuído ou concentrado e horizontal concentrado. Para atender a este propósito, as seguintes etapas foram cumpridas: inicialmente, realizou-se o estudo da arte no meio científico pertinente, com o propósito de identificar as alternativas encontradas por centros de pesquisa na investigação da problemática levantada. Posteriormente, desenvolveu-se um conceito de equipamento, atentando às condições de contorno e restrições preestabelecidas. Com o conceito definido, partiu-se para o dimensionamento e modelagem sólida de todos os elementos que compunham o projeto e um modelo de pórtico plano de alumínio escalonado para teste do equipamento experimental. A fabricação das peças, conjuntos, subconjuntos, pintura e montagem envolveu a etapa de construção do equipamento e modelo para teste. O modelo foi instrumentado e finalmente foram realizados experimentos para analisar a funcionalidade do equipamento e explorar de forma breve os resultados obtidos com este tipo de ensaio. O equipamento se mostra genérico para diversas escalas, possibilitando coletar dados referentes ao comportamento real da estrutura. Em complemento, acredita-se que este equipamento experimental permita produzir estudos de ligações entre viga e coluna, ensaios de flambagem entre outros do segmento, para comparação numérico/experimental no contexto científico contribuindo com a fabricação de estruturas mais leves e seguras.*

Palavras-chave: *Estruturas mecânicas, estudo experimental, escala reduzida.*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos muitos estudos investigaram a resistência de estruturas de aço (Li; Li, 2007). Estruturas do tipo pórtico plano construídas em aço de um ou vários pavimentos são compostas por vigas, colunas e elementos de junção para estes e são amplamente utilizados em edifícios industriais, plataformas de petróleo em alto mar, arranha-céus e outros. O campo de estudo sobre estas estruturas é extenso. Buscam-se entender o comportamento das conexões viga-coluna, como juntas soldadas, uniões aparafusadas ou combinações destes, a resistência do conjunto sob condição de abalos sísmicos e carregamento estático ou dinâmico. Melo (2011) salienta que devido à complexidade destes projetos, normalmente são utilizados modelos matemáticos de difícil representação para entender o comportamento da estrutura. Estes modelos podem

apresentar coeficientes cuja calibração deve ser feita observando a natureza ou através de modelos físicos em escala real, reduzida ou ampliada dependendo da aplicação.

Estudos experimentais na área de construção com aço exigem muitas vezes estruturas robustas, conseqüentemente, espaço e recursos para sua elaboração, contudo os resultados de tais trabalhos são fundamentais para aprimorar os modelos numéricos e obter resultados realistas de seu comportamento em regime de trabalho. Neste sentido, Melo (2011) indica que as grandezas físicas que quantificam o comportamento de uma estrutura podem ser obtidas de forma teórica ou através de ensaios experimentais baseados em modelos físicos em escala. Estes modelos são representações simplificadas da realidade e facilitam a compreensão de fenômenos físicos complexos como o funcionamento de usinas elétricas, pontes e prédios sujeitos a agentes externos como ação do vento, terremotos e outros.

De acordo com Ramu, Raja, Thyla (2013), se utiliza modelos em escala principalmente para reduzir o custo da experimentação. Para Harris e Sabnis (1999), a redução de custo provém de duas áreas, utilizando-se equipamentos experimentais menores com equipamentos de aplicação de carga menores e diminuindo o custo de fabricação do modelo-teste. Melo (2011) estudou o comportamento de uma ponte utilizando um modelo em escala reduzida fabricado em alumínio e fabricou outros dois modelos em microconcreto para análise de estruturas similares. Obteve-se as grandezas físicas através de extensômetros, LVDT's e um servo hidráulico. Em posse dos dados experimentais, relacionou a estrutura real com o modelo em escala reduzida que possibilitou calibrar os modelos teóricos. Portanto, já existem metodologias de ensaios validadas relacionadas a modelos em escala reduzida que proporcionam vantagens econômicas e praticidade durante a experimentação. Em estudo experimental de um modelo com escala reduzida, Ramu, Raja, Thyla (2013) e Harris e Sabnis (1999) ilustram a aplicabilidade da teoria Pi de Buckingham que relaciona a semelhança geométrica entre modelo e protótipo. A formulação é genérica e ampla para diversas situações e pode ser aplicada para um modelo em material diferente do protótipo. O estudo foi validado por método analítico e numérico. Este embasamento teórico é fundamental para viabilizar análises experimentais em modelos em escala reduzida. Os próximos parágrafos apresentam estudos experimentais relacionados à estrutura de pórtico plano, buscando analisar as configurações utilizadas pelos pesquisadores para identificar características desejáveis ao projeto proposto neste trabalho.

Chen et al. (2012) realizaram um estudo experimental do colapso progressivo de uma estrutura tridimensional de aço do tipo pórtico plano de dois pavimentos ao analisar os efeitos da remoção repentina de uma coluna central do primeiro andar. A configuração experimental do trabalho apresentou escala real de uma estrutura de dois pavimentos do tipo pórtico tridimensional de aço sustentando dois pavimentos de concreto com carregamento estático. Foi utilizado blocos de concreto e vigas de aço para simular o carregamento real da estrutura. Também foram utilizados extensômetros uniaxiais para medir a redistribuição da força interna e medidores de deslocamento para monitorar as deformações globais da estrutura. Foram comparados os resultados com dois modelos numéricos de elementos finitos validados concluindo que a influência do concreto armado deve ser considerada para avaliar o colapso da estrutura de aço.

Em estudo experimental de comportamento sísmico quase estático Fangxin, Gang e Yongjiu (2017) utilizaram estruturas de aço de pórtico com uma baía e dois pavimentos e aplicaram carregamento horizontal sob as colunas laterais através de uma placa de cobertura soldada no topo de cada coluna. Este carregamento simula o peso sísmico efetivo suportado pelas colunas durante os tremores, dois atuadores hidráulicos aplicam carregamento horizontal com intensidade distinta em cada pavimento de forma que a carga seja equivalente a uma distribuição triangular invertida para um prédio de seis andares.

Outro estudo experimental de uma estrutura de quatro baias e três pavimentos do tipo pórtico plano fabricada em concreto reforçado e escala real foi desenvolvido por Yi et al. (2008). O objetivo do trabalho foi simular a carga de gravidade da estrutura superior equivalente a cinco pavimentos com carregamento vertical constante concentrado por um atuador servo-hidráulico no topo da coluna do meio. O equipamento experimental apresentado é do tipo pórtico plano de aço com regiões enrijecidas por nervuras. A estrutura ensaiada encontra-se engastada por parafusos em uma viga com perfil "I" enrijecida e fixada no solo por chumbadores.

Yura et al. (1964) desenvolveram um conceito de equipamento experimental para cargas verticais e axiais em estruturas do tipo pórtico plano de três pavimentos e dois compartimentos. O carregamento vertical de cada pavimento é aplicado em dois pontos por dinamômetros calibrados e provisionados em uma viga que distribui a carga provinda de um atuador hidráulico acomodado sobre um dispositivo simulador de carga de gravidade que garante pouca resistência ao deslocamento lateral da estrutura ensaiada além de manter o atuador posicionado verticalmente. Este dispositivo é fixado em uma estrutura externa do tipo pórtico plano tridimensional e se encontra solidária a fundação. O carregamento horizontal é aplicado por atuador hidráulico de forma concentrada em cada nível de pavimento. O movimento da estrutura testada fora do plano é restringido pela estrutura de carregamento. Yura et al. (1964) salientam que embora o carregamento vertical pretendido no

experimento para cada pavimento é distribuído, o equipamento experimental desenvolvido aplica o carregamento de forma concentrada em dois pontos a $\frac{1}{4}$ do comprimento da viga a partir das extremidades para tal representação.

Os estudos referenciados apresentam configurações experimentais específicas de acordo com as motivações dos pesquisadores para obtenção de dados realistas em regime de trabalho e aprimoramento da formulação teórica aplicada. Observa-se que as condições de carregamento vertical concentrado ou distribuído e horizontal concentrado despertam interesse comum aos pesquisadores, culminando na idealização de equipamentos apropriados para a execução de testes experimentais, os quais atendam as restrições do problema em escala real, bem como permitam liberdade de movimento aos graus de liberdade não restringidos. Além disso, observa-se que grande parte dos ensaios contemplam uma instrumentação composta por células de carga, transdutores lineares de deslocamento variável, câmeras de vídeo para monitoramento de deslocamento e extensômetros. Estes e demais aspectos experienciados pelas pesquisas referenciadas, apontam que a utilização de modelos em escala reduzida compreende uma alternativa atraente para a análise experimental de estruturas de grande porte, principalmente em se tratando dos custos de fabricação e tempo de construção dos modelos a serem testados. Em complemento, a robustez dos equipamentos utilizados nos ensaios em escala real é um dos fatores preponderantes que muitas vezes inviabiliza a execução destas técnicas em laboratório.

Sendo assim, com base nas pesquisas referenciadas, observa-se que a realização de testes envolvendo estruturas em escala reduzida, muito embora seja uma técnica consolidada e de frequente utilização no meio científico, compreende uma vertente de estudos que continua despertando o interesse da comunidade científica. Para tal, a disponibilidade de equipamentos experimentais apropriados, representa uma demanda e requisito fundamental para condução dos ensaios em escala reduzida. Neste aspecto, este estudo tem como objetivo idealizar e construir um equipamento experimental para a condução de testes envolvendo estruturas mecânicas em escala reduzida permitindo aplicar carregamento vertical concentrado ou distribuído e horizontal concentrado.

Atendendo ao referido propósito, o trabalho contempla etapas de concepção, fabricação e experimentação. Na etapa de concepção, ao realizar uma análise bibliográfica para alicerçar o estudo pretendido, é proposto o projeto do equipamento experimental capaz de realizar testes com carregamento vertical concentrado e distribuído, bem como carregamento horizontal concentrado. Posteriormente, apresenta-se a construção da estrutura em escala reduzida, a qual foi utilizada na verificação da funcionalidade do equipamento. Em seguida, demonstra-se o equipamento fabricado, enfatizando as características principais de construção e operação. A etapa de testes é apresentada em sequência, demonstrando e versatilidade, funcionalidade e exequibilidade do equipamento proposto avaliando seu desempenho quanto aos resultados experimentais obtidos.

2. CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Protótipo em Escala Real

Para desenvolver um conceito de dispositivo com capacidade de reproduzir o comportamento real de estruturas mecânicas, após uma investigação bibliográfica, selecionou-se um pórtico plano de dois andares e um vão com ligações entre viga e coluna flexível, previamente estudado por Lo (1988) e Lo e Stierner (1993), cujas características construtivas, geométricas, materiais e esforços, representam estruturas normalmente utilizadas em edifícios e/ou instalações industriais. Tal estrutura foi definida como protótipo para o modelo em escala reduzida testado neste trabalho, portanto, o modelo em escala não pretende replicar uma estrutura específica, mas sim o comportamento de qualquer pórtico com as mesmas características da estrutura considerada.

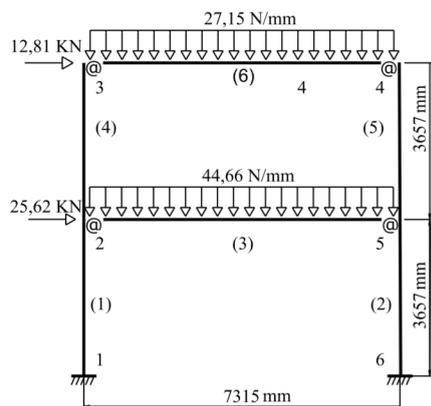
A Fig. 1a ilustra as configurações geométricas e carregamentos pertencentes ao protótipo real investigado por Lo (1988) e Lo e Stierner (1993). Os autores utilizaram tal estrutura como caso de estudo para os modelos numéricos propostos, os quais pretendiam prever seu comportamento segundo uma análise não linear geométrica, considerando os efeitos das ligações semirrígidas entre viga e coluna. Neste aspecto, devido aos modelos numéricos não exigirem todos os parâmetros geométricos das ligações, Lo (1988) e Lo e Stierner (1993) não apresentaram as características construtivas da placa de base, uma vez que esta foi considerada apenas como idealmente rígida. Por esta razão, optou-se pela utilização da metodologia para o cálculo de colunas sujeita à compressão simples e à flexo-compressão reta recomendada pela norma NBR-8800 (2008). A Fig. 1b apresenta o detalhamento da placa de base prevista para a estrutura de Lo (1988) e Lo e Stierner (1993), onde pode ser observada a presença dos enrijecedores para aumentar a rigidez rotacional da ligação, replicando a idealização perfeitamente rígida considerada pelos autores.

Nas Fig. 1c e Fig. 1d são apresentados os parâmetros geométricos das ligações com cantoneira de topo e assento entre viga e coluna. Já a Tab. 1 indica os perfis comerciais e propriedades geométricas utilizadas no trabalho de Lo (1988) e Lo e Stierner (1993).

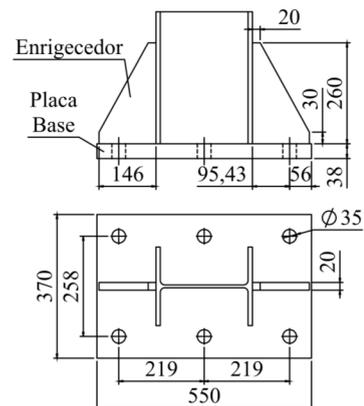
Tabela 1 – Especificação geométrica dos perfis comerciais do protótipo.

	Especificação	A (m ²)	b _f (m)	t _f (m)	t _w (m)	I _x (m ⁴)
Colunas	W254 × 33	6,2645 × 10 ⁻³	0,2022	3,4290 × 10 ⁻³	7,3660 × 10 ⁻³	7,1176 × 10 ⁻⁵
Viga superior	W406 × 31	5,8903 × 10 ⁻³	0,1404	1,1176 × 10 ⁻²	6,9850 × 10 ⁻³	1,5609 × 10 ⁻⁴
Viga inferior	W539 × 44	8,3871 × 10 ⁻³	0,1651	1,1430 × 10 ⁻²	8,8900 × 10 ⁻³	3,5088 × 10 ⁻⁴

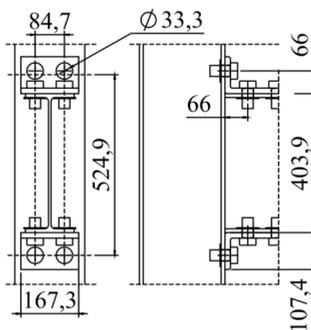
A - área da sessão transversal, b_f - largura da flange, t_f - espessura da flange, t_w - espessura da alma, I_x - momento de inércia de área eixo x-x.



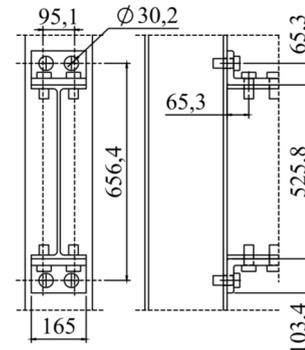
(a) Pórtico plano de dois andares e um vão estudado por Lo (1988), e Lo e Stierner (1993).



(b) Placa de base das colunas e enrijecedores.



(c) Ligação do tipo cantoneira de topo e acento – coluna e viga superior.



(d) Ligação do tipo cantoneira de topo e acento – coluna e viga inferior.

Figura 1 – Protótipo em escala real utilizado pelos autores Lo (1988) e Lo e Stierner (1993) (dimensões em mm).

2.2. Modelo em Escala Reduzida

Após a seleção do caso de estudo que representará o problema em escala real deste trabalho, aplicou-se o Teorema Pi de Buckingham, proposto por Ramu, Raja e Thyla (2013), com o propósito de adequar as dimensões do pórtico de Lo (1988), e Lo e Stierner (1993) ao espaço laboratorial disponível, bem como possibilitar uma redução nos custos associados aos materiais, fabricação e instrumentação.

O Teorema Pi de Buckingham propõe relações de semelhanças entre os parâmetros geométricos, propriedades de material e carregamentos aplicados ao protótipo em escala real, com um modelo em escala reduzida através da Equação 1, onde S é o fator de escala e l_m e l_p são os parâmetros do modelo e protótipo respectivamente. A Tabela 2 apresenta as relações de semelhança utilizadas neste trabalho. Demais relações são apresentadas em Ramu, Raja e Thyla (2013).

$$l_m = \frac{l_p}{S} \quad (1)$$

A escolha dos parâmetros norteadores do fator de escala para o modelo reduzido foi realizada com base nas limitações previstas ao equipamento experimental proposto, ou seja, a escala atribuída ao modelo reduzido

deve estar condicionada ao espaço laboratorial disponível para acomodação do equipamento experimental. Sendo assim, considerou-se a largura do modelo reduzido como parâmetro limitador dimensional, fixando-a em 0,993 m. Considerando que a largura do protótipo real é de 7,315 m, ao aplicar o Teorema Pi de Buckingham com a Equação 1, chegou-se ao fator de escala como sendo $S = 7,37$.

Nas Fig. 1c e Fig. 1d são apresentados os parâmetros geométricos das ligações com cantoneira de topo e acento entre viga e coluna. Já a Tabela 1 indica os perfis comerciais e propriedades geométricas utilizadas no trabalho de Lo (1988) e Lo e Stiemer (1993).

Além da definição do fator de escala, considerou-se neste trabalho a utilização de perfis fabricados em alumínio para a confecção do modelo reduzido, uma vez que sua disponibilidade comercial oferece maiores possibilidades de geometria transversal, facilidade de fabricação e menores custos de aquisição em comparação com perfis laminados, fabricados em aço estrutural ASTM A36 (utilizados no protótipo real). De acordo com o Ramu, Raja e Thyla (2013), quando os materiais entre modelo e protótipo são diferentes, a intensidade do campo de tensões do modelo será S_E vezes inferior à do protótipo real, sendo S_E a razão entre o módulo de elasticidade do modelo e protótipo. Além das tensões, os carregamentos também sofrem alterações devido ao fator S_E .

Tabela 2 – Relações de semelhança (fator de escala) – (Ramu, Raja e Thyla (2013)).

	Dimensão e deslocamento linear	Área	Momento de inércia	Carga pontual	Carga distribuída em superfície
Fator de escala	S	S^2	S^4	$S_E S$	$S_E S^2$

S = fator de escala geométrico; S_E = razão entre módulo de elasticidade do modelo e protótipo.

A Tab. 3 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais considerados para o modelo e protótipo. Com base nestas informações, aplicando o Teorema Pi de Buckingham, a razão entre o módulo de elasticidade do modelo e protótipo para o caso de estudo neste trabalho foi $S_E = 2,93$.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo e protótipo.

Elemento	σ_e (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)	Designação
Coluna ^a	495-500	385-394	28-29	210	ASTM A572 GR50
Viga ^a , cantoneiras ^b	495-500	385-394	28-29	210	ASTM A572 GR50
Parafusos ^c , porcas, arruelas	400	500	10	207	ISO - Classe 5.8
Perfis de alumínio ^d	170	215	17	65	ASTM 5052-O

^a Obtido pelo certificado de qualidade do distribuidor - Aços Favorit Distribuidora LTDA®

^b Disponível em: <http://www.belmetal.com.br/>

^c Pré-carga = 3,340 kN; Tensão sob carga de prova = 380 MPa; torque a prova = 3,2 N.m. Dados disponíveis em: <http://www.fusopar.com.br/produtos>

^d Disponível em: <http://shockmetais.com.br/tabelas/aluminio/pmec>

Nota: σ_e - tensão de escoamento, σ_u - limite de resistência, ϵ - alongamento, E - módulo de elasticidade.

Em posse dos fatores de escala da Tab. 2, estes foram aplicados aos parâmetros geométricos, carregamentos e material do modelo em escala real. Como resultado, os parâmetros obtidos para modelo em escala reduzida estão apresentados na Tab. 4.

Tabela 4 – Propriedades geométricas obtidas para os perfis em escala reduzida.

	Especificação	A (m ²)	b_f (m)	t_f (m)	t_w (m)	I_x (m ⁴)
Colunas	W32 × 0,285	$1,020 \times 10^{-4}$	$1,950 \times 10^{-2}$	$1,500 \times 10^{-3}$	$1,500 \times 10^{-3}$	$1,862 \times 10^{-9}$
Viga superior	W59 × 0,397	$1,470 \times 10^{-4}$	$2,100 \times 10^{-2}$	$1,500 \times 10^{-3}$	$1,500 \times 10^{-3}$	$2,331 \times 10^{-9}$
Viga inferior	W71 × 0,431	$1,241 \times 10^{-4}$	$2,600 \times 10^{-2}$	$1,500 \times 10^{-3}$	$1,200 \times 10^{-3}$	$4,404 \times 10^{-9}$

A - área da sessão transversal, b_f - largura da flange, t_f - espessura da flange, t_w - espessura da alma, I_x - momento de inércia eixo x-x

Muito embora a Tab. 4 contemple as dimensões de seção transversal em referência aos fatores de escala $S = 7,36$ e $S_E = 2,92$, a disponibilidade dos perfis comerciais para construção do modelo em escala reduzida, prejudicou a fidelidade destes fatores. Por esta razão, o Anexo 1 apresenta as seções transversais em escala reduzida fabricadas, as quais em sua totalidade são resultados de adequações dimensionais dos perfis comerciais via processos de usinagem.

Segundo Harris e Sabnis (1999), o modelo elástico tem semelhança geométrica direta com o protótipo, porém, é feito de material homogêneo elástico que não necessariamente assemelha-se ao material de referência. Toda análise em modelos elásticos é restrita ao comportamento elástico do material, impossibilitando conclusões

em testes de falha. Modelos com esta característica são utilizados quando se deseja acentuar o comportamento elástico. Por exemplo, se o modelo for construído em materiais com baixo módulo de elasticidade, como borracha ou PVC, para demonstração acadêmica do comportamento estrutural. Já o modelo indireto é uma forma especial do modelo elástico, frequentemente não apresenta semelhança física direta com o protótipo, pode ser construído sem respeitar precisamente uma escala para a área ou forma de uma seção transversal sem afetar os resultados. De acordo com Melo (2011), é utilizado para obter linhas ou curvas de influência utilizando o princípio de Muller-Breslau, onde reações, tensões internas, como forças cisalhantes, momentos fletores e forças axiais são deduzidas a partir de ensaios analisando as curvas de influência. Desta forma somente o comportamento elástico linear pode ser determinado. Harris e Sabnis (1999) enfatizam que este tipo de modelo foi muito utilizado para investigar membros não uniformes em estruturas indeterminadas, por se tratar de comportamento puramente elástico. Atualmente computadores fazem estimativas precisas, restando pouca aplicabilidade para este tipo de modelo.

A construção de um modelo elástico ideal respeita a condição $\varphi_p / \varphi_m = 1$ onde φ_p representa as variáveis físicas adimensionais do protótipo e φ_m do modelo. Em outras palavras, uma semelhança idêntica ao protótipo. O modelo fabricado respeita, em maior parte, as características de modelo elástico, visto que foi mantido o mesmo perfil estrutural do protótipo. O material de fabricação é homogêneo e diferente do protótipo e grande parte dos perfis respeita os fatores de escala estabelecidos de $S = 7,36$ e $S_E = 2,92$. Alguns perfis apresentaram discrepâncias dimensionais de área de seção transversal e variação no fator de escala, que são características do modelo indireto. Atendendo o escopo deste trabalho este modelo permitirá observar o comportamento do equipamento experimental obtendo resultados quanto ao comportamento do modelo em regime de trabalho. A montagem do pórtico em alumínio está apresentada na Fig. 2, instalado ao equipamento experimental proposto.

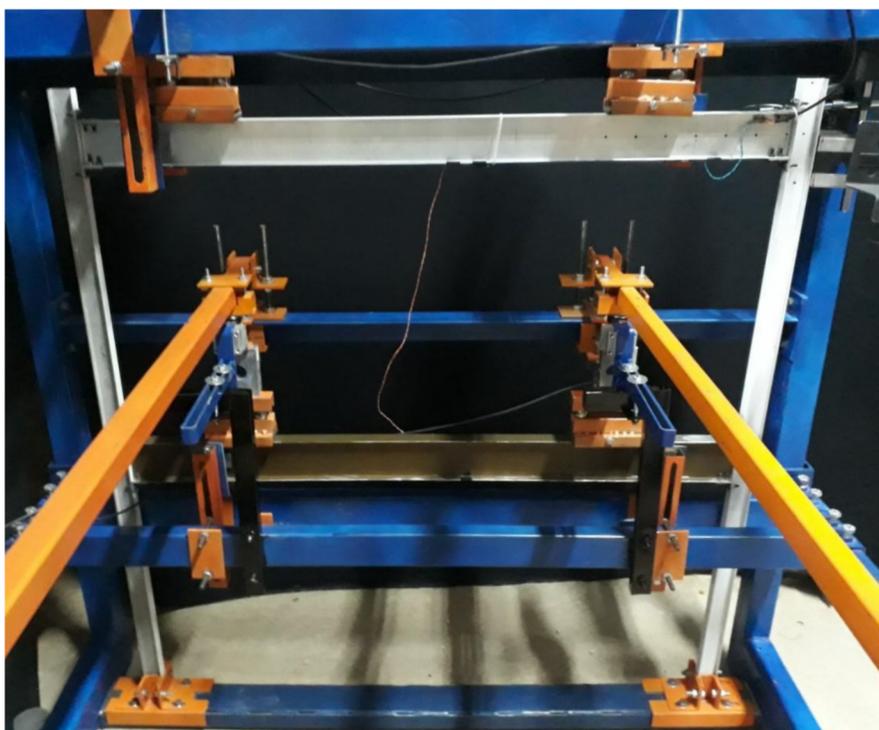


Figura 2 – Modelo de alumínio fabricado em escala reduzida 1:7,37.

2.3 Equipamento experimental proposto

As seções precedentes permitiram a definição das características geométricas, material, intensidades de carregamento, restrições e graus de liberdade não restringidos do modelo em escala reduzida. Sendo assim, com base nestas informações, esta seção apresentará a idealização do equipamento experimental proposto que atenda às referidas características e condições de contorno, permitido a execução dos testes com o pórtico em alumínio previamente apresentado.

Para auxiliar na concepção do equipamento, inicialmente, realizou-se uma análise dos principais requisitos exigidos para a execução do ensaio, os quais estão listados abaixo.

- Aplicar carregamento vertical distribuído e/ou concentrado, para diferentes intensidades de carga, em ao menos dois pavimentos do modelo em escala reduzida.

- Aplicar carregamento horizontal concentrado, com diferentes intensidades de carga, em ao menos dois pontos do modelo em escala reduzida.
- Operar em modo automatizado, tal que as cargas sejam aplicadas de forma quase-estática, segundo o protocolo de carregamento monotônico e repetido.
- Igualar a velocidade de carregamento, tanto para as cargas verticais quanto laterais.
- Restringir os graus de liberdade fora do plano vertical de carga, evitando flambagem lateral da estrutura em teste.
- Tanto os pontos de aplicação das cargas, quanto àqueles utilizados como restrição lateral, devem permitir movimento do modelo reduzido aos graus de liberdade não restringidos.
- Permitir que a estrutura em teste seja fixada em bases rígidas, replicando a idealização teórica deste tipo de ligação de base.
- Contemplar instrumentos para captação de força, deformação e deslocamento, os quais possam ser captados e monitorados em tempo real via interface gráfica.

A configuração global do equipamento deve oferecer flexibilidade às variações dimensionais e pontos de aplicação de carga, a fim de permitir a realização de testes com modelos em escala reduzida diferentes do pórtico selecionado para este trabalho.

A investigação dos requisitos principais quanto à funcionalidade do equipamento, em complemento aos parâmetros dimensionais, intensidades de carga e velocidades envolvidas no ensaio, culminou na concepção dos seguintes módulos: (a) pórtico em escala reduzida; (b) estrutura de sustentação; (c) bases rígidas; (d) sistema de contenção lateral; (e) sistema de carregamento vertical; (f) sistema de carga distribuída; (g) sistema de carregamento horizontal; (h) conjunto células de carga; (i) conjunto atuador; (j) sistema para captura de deslocamento. Tais módulos estão referenciados na Fig. 3 e descritos de forma sintetizada como segue:

a – *Pórtico em escala reduzida*: O modelo de alumínio foi construído com perfis comerciais de alumínio ASTM 5052-O, comuns aos perfis de esquadrias, o material foi cortado e fresado para obter o perfil similar ao protótipo. Cantoneiras de alumínio foram selecionadas para compor as ligações entre viga e coluna. Para a etapa de montagem das ligações entre viga e coluna, foram utilizados parafusos M4 x 10 mm classe 12.8 como elemento de fixação. Todos os parafusos foram submetidos a uma pré-carga de 30,6 N, correspondente à carga de prova do parafuso, atingida mediante um torque equivalente a 4,9 N.m. Maiores detalhes sobre as dimensões obtidas estão disponíveis no Anexo 1.

b – *Estrutura de sustentação*: As vigas e colunas da estrutura de sustentação foram fabricadas em perfis de cantoneiras ASTM A36 51 x 51 x 4,75 mm, as vigas foram soldadas a placas e unidas às colunas por parafusos. Perfil C de aço ASTM A36 80 x 50 x 3 mm é soldado na base das duas vigas como suporte, o mesmo tipo de perfil é parafusado entre os suportes compondo uma base rígida para fixação do modelo. Perfis tubulares SAE 1010 de 45 x 35 x 2 mm e 40 x 30 x 2 mm compõem um sistema telescópico regulável onde é parafusado em sua extremidade um pórtico de tubos de aço SAE 1010 40 x 30 x 2 mm responsável por sustentar os elementos de carga.

c – *Bases rígidas*: esse conjunto foi idealizado com a finalidade de prover fixação perfeitamente rígida às estruturas mecânicas que o equipamento suporta. Cantoneiras de aço ASTM A36 32 x 32 x 3,25 mm são apoiadas na base rígida da estrutura de sustentação, sobre estas, cantoneiras de aço ASTM A36 50 x 50 x 3,25 mm são fixadas na base por parafusos. Cantoneiras de aço ASTM A36 35 x 35 x 3,25 mm com recortes oblongos permitem regular a posição do modelo e executar a fixação por parafuso, mecanismo similar ao grampo de pressão.

d – *Sistema de contenção lateral*: esse sistema foi desenvolvido com o propósito de evitar o deslocamento lateral do modelo fora do plano vertical de carga. Para tal, utilizou-se tubos de aço SAE 1010 50 x 30 x 3 mm, barra chata de aço SAE 1010 64 x 8 mm e cantoneira ASTM A36 51 x 51 x 4,75 mm soldados entre si e parafusadas nas colunas da estrutura de sustentação formando suportes para vigas tubulares de aço SAE 1010 60 x 40 x 4,25 mm, aparafusadas nos suportes tubulares em ambas as extremidades que são responsáveis por sustentar alojamentos com esferas, estes entram em contato com o modelo caso haja flexão fora do plano vertical de ensaio, com baixo atrito ou interferências mecânicas.

e – *Sistema de carregamento vertical*: com o propósito de aplicar carregamento vertical em dois pavimentos, o sistema é composto por quatro lanças, fabricadas em tubos de aço SAE 1010 30 x 20 x 2,5 mm as

quais são articuladas em uma das extremidades à estrutura de sustentação. Na extremidade livre das lanças, são suspensos pesos, cuja magnitude é intensificada no ponto de aplicação da carga, distante 126 mm em relação às articulações das lanças pelo princípio de alavanca.

f – *Sistema de carga distribuída*: para aplicar carregamento vertical distribuído, foi previsto a utilização de uma mangueira de borracha de diâmetro 50,5 mm com revestimento têxtil e extremidades estancadas permitindo pressurização. Sobre a mangueira, é fixado um tubo de aço SAE 1010 40 x 20 x 2 mm de modo a distribuir uniformemente o carregamento ao longo de toda superfície das vigas do modelo.

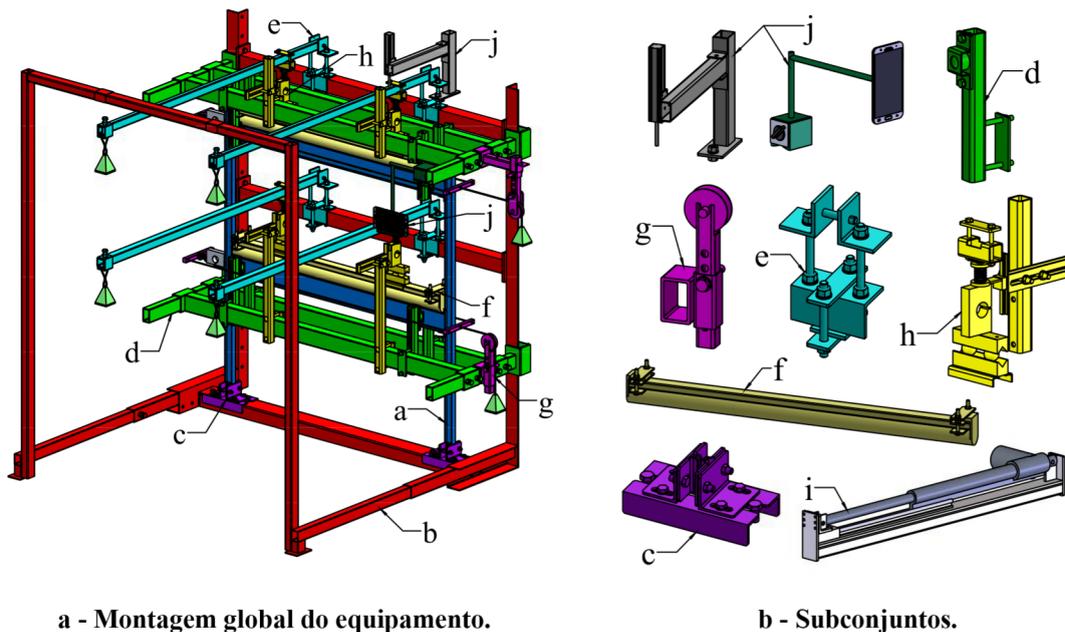
g – *Sistema de carregamento horizontal*: desenvolvido para converter o movimento vertical das espigas de aço que transferem o carregamento para movimento horizontal. Composto por tubos de aço SAE 1010 60 x 40 x 4,25 mm como luva para encaixe no suporte do sistema de contenção lateral, essa luva é soldada em um tubo de aço SAE 1010 30 x 30 x 2,5 mm, que sustenta uma polia de aço de diâmetro 58,5 mm com altura regulável por parafuso. Uma cantoneira de aço ASTM A36 32 x 32 x 2,5 mm é soldada no tubo de sustentação com um furo alinhado ao centro da polia de aço, por ele, a espiga de aço desliza livremente em tração no sentido vertical, ao passar pela polia inverte a direção para horizontal. A espiga é fixada ao centro de uma barra de aço SAE 1010 15 x 15 mm, que possui duas outras espigas estendidas horizontalmente até o outro lado do modelo, onde se encontram com outra barra quadrada de aço de mesmo calibre, apoiada em uma célula de carga em contato direto com o modelo de alumínio. Sobre a célula é acoplado uma mola compressiva, responsável por regular a intensidade da carga.

h – *Conjunto células de carga*: as células de carga foram montadas sob um sistema de rolamento composto por 4 prismas e 8 esferas de diâmetro 24 mm. Tal sistema é responsável por transmitir o carregamento projetado pela lança ao pórtico em escala reduzida, permitindo que este tenha liberdade de deslocamento horizontal. Sob a célula de carga, estão instaladas molas compressivas acopladas a suportes de fixação. Para evitar que ocorra flambagem nas molas, são previstos guias lineares conectados ao suporte de fixação inferior das molas. Por fim, o contato entre a lança e o conjunto célula de carga é realizado por uma esfera transferidora de carga Uniroll® de diâmetro 25,4 mm com capacidade para 70 kgf, a qual assegura que apenas componentes verticais de força sejam aplicadas nas células de carga.

i – *Conjunto atuador*: este conjunto é composto por um atuador elétrico Santoro® com curso de 300 mm capacidade de carga 6 kN velocidade 7 mm/s (acuracidade de 5 a 10%) potência 55 W, tensão 12-13,5 V, corrente 3,5-8 A articulado a um suporte fabricado com chapas de aço SAE 1010. A haste do atuador está conectada a um mancal de deslizamento linear de diâmetro 8 mm, com o propósito de garantir maior precisão e suavidade no movimento. Na extremidade livre da haste, são conectados cabos de aço 1,2 mm cuja ramificação se estende até sua conexão com os pesos suspensos dos sistemas de carregamento vertical e horizontal. Sendo assim, o movimento das lanças está sincronizado com o deslocamento do atuador devido ao sistema de conexão por cabos de aço.

j – *Sistema para captura de deslocamento*: foi previsto a instalação de dois métodos para controle de deslocamento. Um deles, realizado por uma régua potenciométrica, tendo como propósito registrar o deslocamento de uma das lanças no ponto de aplicação da carga vertical. Este componente é necessário na etapa de calibração da velocidade do atuador elétrico. O monitoramento dos deslocamentos produzidos no pórtico teste é realizado pelo sistema de videoanálise, composto por uma câmera instalada perpendicularmente ao pórtico.

Utilizando o Software Solidworks®, realizou-se a modelagem em sólido 3D do equipamento idealizado. A Fig. 3(a) apresenta uma vista isométrica com a montagem global do equipamento. Já a Fig. 3(b) destaca os subconjuntos para melhor visualização.



a - Montagem global do equipamento.

b - Subconjuntos.

Figura 3 – Configuração experimental. (a) pórtico em escala reduzida; (b) estrutura de sustentação; (c) bases rígidas; (d) sistema de contenção lateral; (e) sistema de carregamento vertical; (f) sistema de carga distribuída; (g) sistema de carregamento horizontal; (h) conjunto células de carga; (i) conjunto atuador; (j) sistema para captura de deslocamento.

Para uma melhor compreensão dos módulos de carregamento (itens f e g), a Fig. 3 ilustra o sistema de aplicação de cargas e pontos de aplicação da carga. Também é possível observar o conjunto célula de carga (item h).

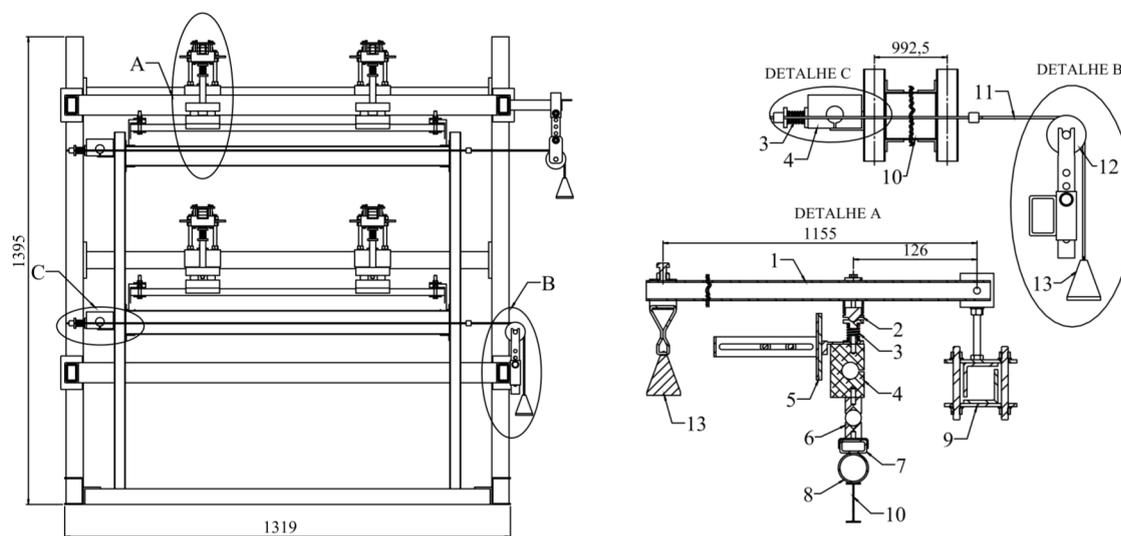


Figura 4 – Projeto do sistema de aplicação de carga. (1) alavanca; (2) esfera transferidora de carga; (3) mola helicoidal de compressão; (4) célula de carga; (5) guia linear; (6) guia com rolamento; (7) suporte rígido; (8) mangueira; (9) conjunto articulação da lança; (10) viga do modelo; (11) espia de aço; (12) polia; (13) peso. (dimensões em mm).

Vale ressaltar que o cumprimento dos requisitos de carregamento, em referência às condições de carga utilizadas no pórtico de Lo (1988) e Lo e Stierner (1993), foram contemplados graças à instalação de molas compressivas de diferentes valores de rigidez entre os pavimentos, ou seja: ao utilizar apenas um atuador como componente para controle do deslocamento das lanças, conseqüentemente, todos os pontos de aplicação de carga realizam a mesma intensidade de avanço (isso ocorre devido ao sistema de espias que interliga atuador e lanças). Sendo assim, sabendo que o deslocamento será igual para todos os pontos de aplicação da carga, ao introduzir

molhas com diferentes rigidezes, é possível alterar a intensidade do carregamento para cada ponto de carga. Os gráficos apresentados na Fig. 5 ilustram as forças, deslocamentos e valores de rigidez consideradas no projeto. As cargas horizontais concentradas são aplicadas em sua totalidade, já as cargas verticais são divididas em duas alavancas, ou seja, para o carregamento vertical superior de 1.248,52N será necessário utilizar duas molhas iguais com constante elástica 41,62 N/mm, já para o carregamento vertical inferior de 2.053,78 N será necessário duas molhas de 41,62 N/mm.

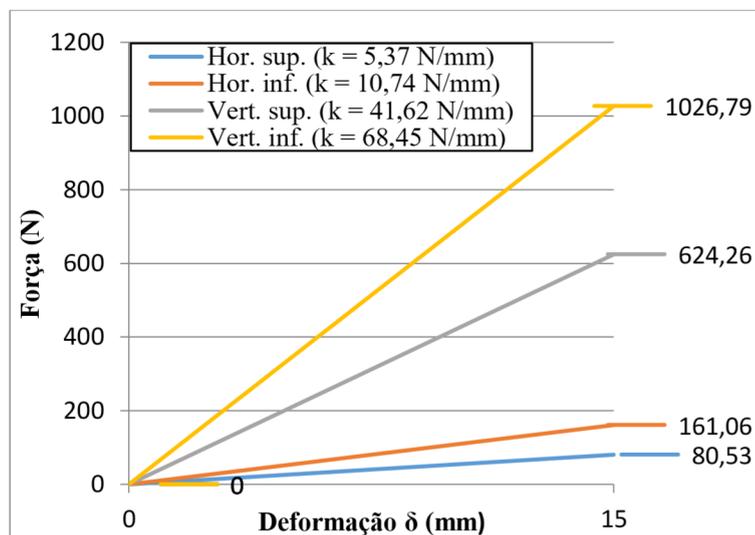


Figura 5 – Constante elástica das molhas.

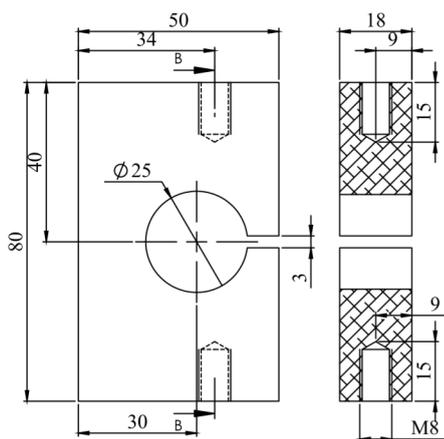
2.4 Fabricação do equipamento

Ao término da concepção teórica do equipamento, realizaram-se as seguintes etapas de fabricação:

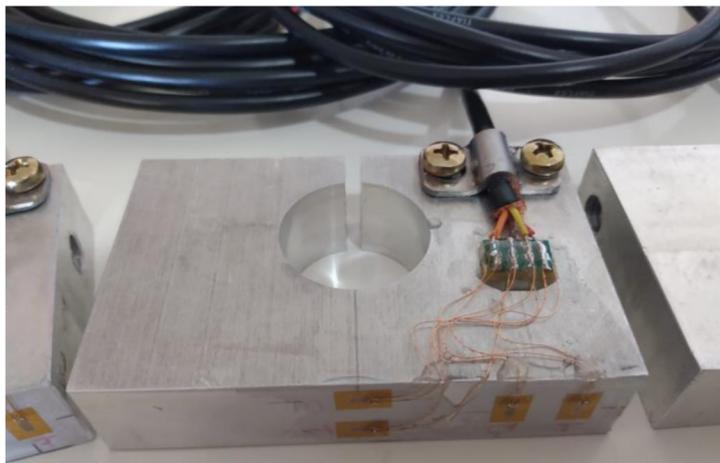
- *Componentes estruturais*: construção da estrutura de sustentação, sistema de contenção lateral, base de fixação do atuador elétrico, base de fixação do pórtico em escala reduzida, suporte para régua potenciométrica e câmera de vídeo;
- *Sistema de carregamento*: lanças, pesos, suporte para molhas, molhas, conjunto formado por prismas, esferas e células de carga;

Para fabricação dos componentes descritos acima, foram utilizadas como matéria-prima materiais disponíveis na instituição, tais como barras de aço, cantoneiras, tubos, parafusos, arame de solda, entre outros. Além destes, outros materiais foram adquiridos com recursos oriundos da equipe envolvida no projeto. Em se tratando das células de cargas previstas para o equipamento, seguiu-se os procedimentos para projeto e construção de células de carga tipo C, apresentados em Richard Nakka (NAKKA, 2020). Foi previsto fabricação de 6 células de carga com capacidade de até 3000 N. Deste modo, selecionou-se como matéria prima a liga de alumínio ASTM 6063-T6, além de 4 extensômetros unidirecionais do modelo PA-13-125BA-350-L para cada célula de carga, acessórios para fixação e colagem dos extensômetros, cabo 4 vias - 18 AGW com blindagem em malha trançada e conector Mike GX16 4 vias macho e fêmea. No topo e na base foram inseridos furos com rosca M8 para fixação dos suportes. Detalhes sobre as células de carga podem ser observados na Fig. 6. Em complemento, o equipamento contempla a instalação dos componentes responsáveis pela movimentação das lanças e monitoramento dos deslocamentos; para tal, utilizou-se um atuador elétrico, uma régua potenciométrica e uma câmera de vídeo, respectivamente. A especificação e funcionalidade destes componentes foram apresentadas na sessão 2.3 (itens IX e X).

O processo de fabricação dos itens acima mencionados foi realizado nos laboratórios de fabricação mecânica, conformação e soldagem do Instituto Federal do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha. Na Fig. 7 é possível observar o equipamento fabricado, e a Fig. 8 complementa com detalhes dos componentes de maior responsabilidade funcional bem como a colagem dos extensômetros na ligação entre a viga superior e a coluna direita.

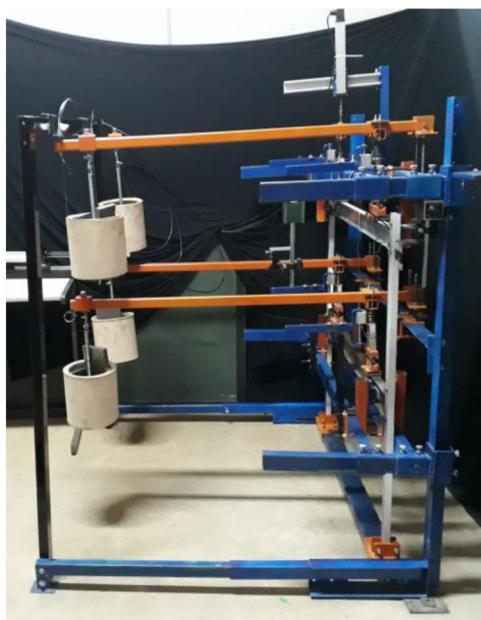


a – Projeto da célula de carga.
Dimensões em mm.

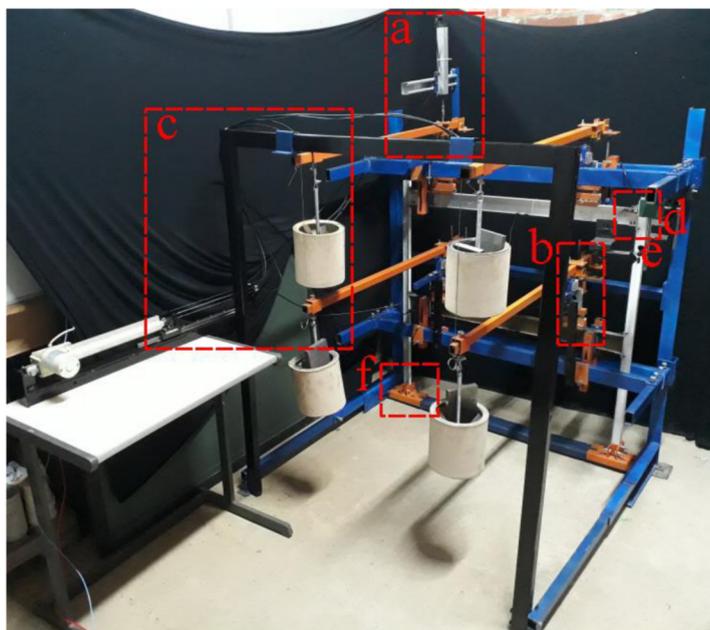


b – Fabricação concluída.

Figura 6 – Célula de carga fabricada.



a – Vista lateral.



b – Vista isométrica.

Figura 7 – Estrutura experimental construída.

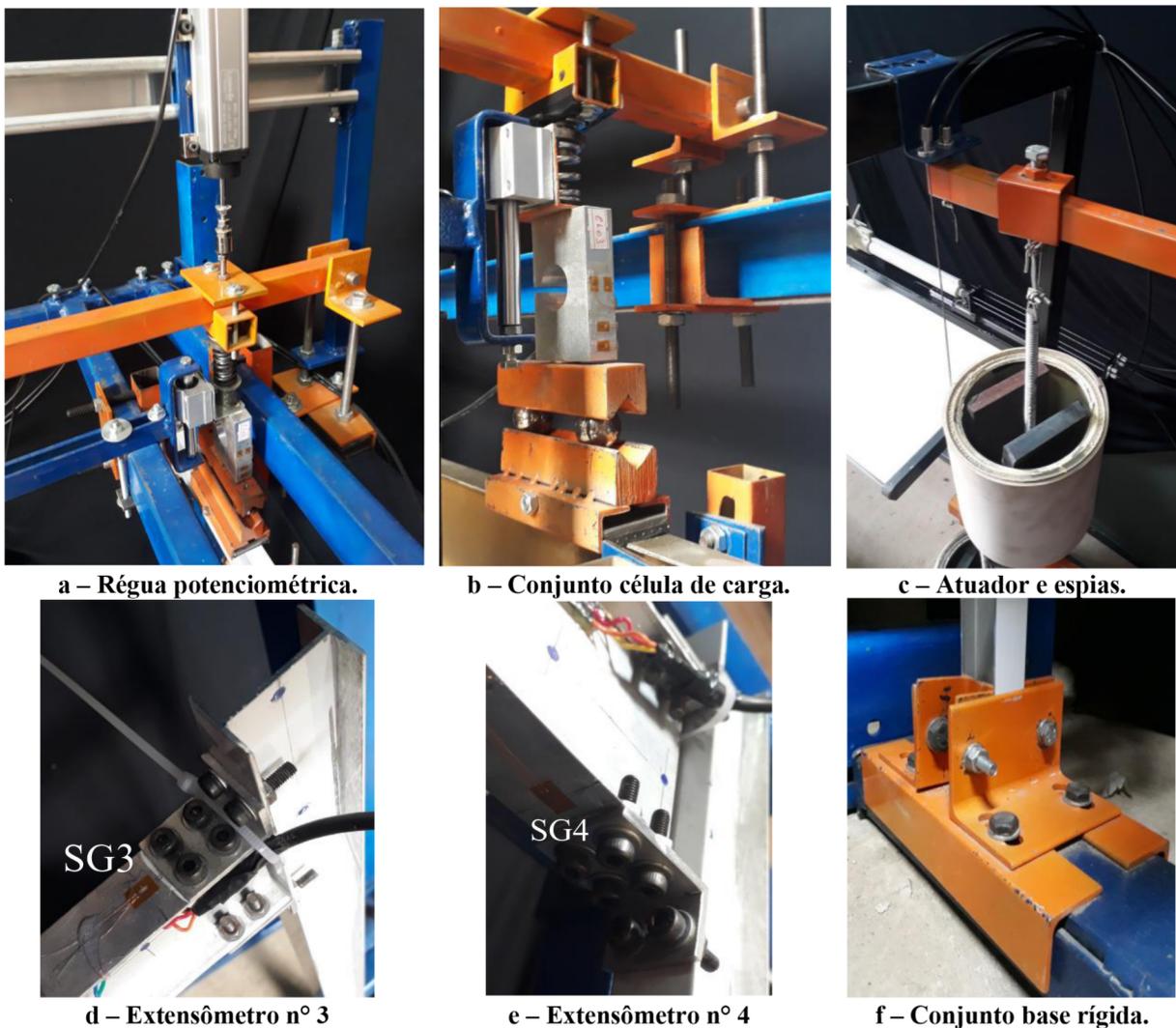


Figura 8 – Representação dos conjuntos e instalação de extensômetros.

2.5 Sistema de controle e monitoramento

Com o propósito da realização de ensaios com carregamento monotônico e repetido, de forma automatizada, foi acoplado ao equipamento um sistema composto por hardware e software. O hardware contempla os componentes responsáveis pelo carregamento quase-estático. Conforme apresentado na Fig. 9, o hardware consiste nos seguintes componentes: (1) um atuador elétrico que, interligado via cabos de aço ao ponto de aplicação da carga, é controlado pela força registrada com uma célula de carga; (2) uma régua potenciométrica, responsável por calibrar a potência exigida pelo atuador elétrico; (3) uma célula de carga, capaz de monitorar o carregamento aplicado e retornar ao sistema de aquisição; (4) um Arduino Uno R3; (5) um módulo Driver Ponte H; (6) um computador, utilizado na compilação do software e controle do sistema; e (7) um sistema de aquisição Keysight 34972A, conectado ao computador para leitura dos dados. Além destes, também fazem parte do hardware uma câmera de vídeo (8) e quatro extensômetros (9), os quais são utilizados para monitoramento de deslocamento e deformação, respectivamente.

Para possibilitar o controle automatizado do hardware, um software escrito em linguagem Matlab® foi desenvolvido. A interface gráfica do programa principal é apresentada na Fig. 10, a qual contempla o módulo de controle e de monitoramento. O módulo de controle permite comandar manualmente o atuador, função auxiliar para os ajustes do setup, pelo acionamento dos botões *forward* e *backward*, bem como automaticamente ao inserir o protocolo de carregamento na tabela de comando. Alimentando o programa principal, três subprogramas possibilitam a configuração dos seguintes canais: (*configCL*) canais conectados às células de carga; (*configRP*) régua potenciométrica; e (*configSG*) extensômetros. Além destes, um quarto subprograma (*configTracking*) é utilizado para configurar o sistema de videoanálise, o qual utiliza uma câmera de vídeo com comunicação wireless ao computador. Tal como o programa principal, estes algoritmos foram implementados em linguagem Matlab®.

Os subprogramas são compilados previamente ao programa principal, com um pré-processamento, tendo como função calibrar as células de carga, sistema de videoanálise e velocidade do atuador elétrico. Quanto à calibração da velocidade do atuador, durante seu movimento, o *subRF* recebe o diferencial de resistência elétrica da régua potenciométrica Lemaqs KTCI - 200 mm ($\pm 0,05\%$ FS, $5k\Omega$), amplificado pelo sistema de aquisição Keysight 34972A, convertendo este sinal em taxa de deslocamento instantânea no ponto de aplicação de carga. Devido a velocidade do atuador elétrico estar relacionada com a potência fornecida pelo Módulo drive Ponte H (Módulo Driver Ponte H 43a Bts7960 Ibt2 alta corrente pwm Dc), fez-se necessário relacionar a velocidade projetada no ponto de interesse com a potência exigida pelo atuador, assim, desenvolver tal velocidade. Esse procedimento permitiu calibrar a potência de alimentação do atuador elétrico para que este atinja a velocidade especificada durante o ensaio.



Figura 9 – Sistema de aquisição de dados e controle do atuador (*hardware*).

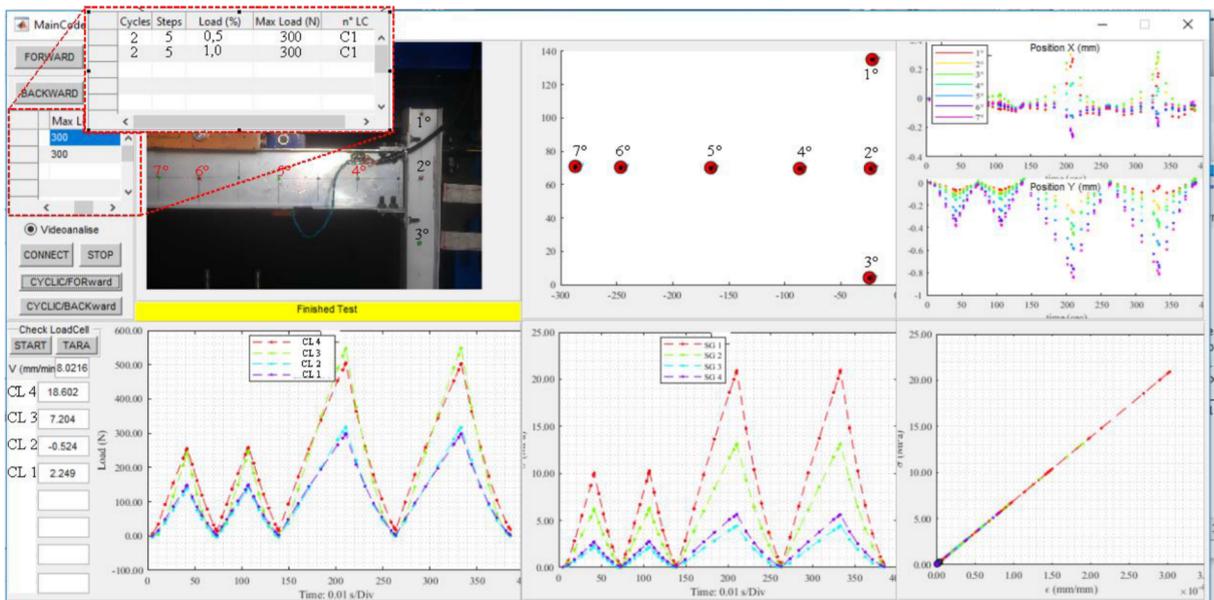


Figura 10 – Interface do programa utilizado para monitoramento dos testes (*software*).

Em se tratando do controle automatizado, a lógica desenvolvida no processo incremental de carregamento monotônico quase estático pode ser sintetizada nas etapas abaixo, as quais são subsidiadas pelos gráficos apresentados na Fig. 11, bem como a Eq. 2:

- Ao acionar um dos botões *cyclic/forward* e *cyclic/backward*, o programa principal envia ao atuador (1) a potência calibrada em *'configRP'*, permitindo a este desenvolver uma velocidade equivalente ao ensaio quase-estático previamente configurada;
- Para cada passo incremental (p), a intensidade de carga (dF_i) é captada pela célula de carga (3) que, conectada ao sistema de aquisição (7), envia o diferencial de tensão amplificado ao computador (6) onde o programa principal realiza a conversão deste sinal elétrico em medida de força atuante no respectivo passo incremental;
- O programa principal utiliza a intensidade de carga do passo incremental (dF_i) para atualizar o tempo de deslocamento do atuador (dt_{i+1}) para o próximo passo incremental (dF_{i+1}) utilizando a Eq. 2;
- Esse procedimento é repetido até que o passo de carga seja atingido, quando é ativada a inversão no sentido de movimento do atuador.

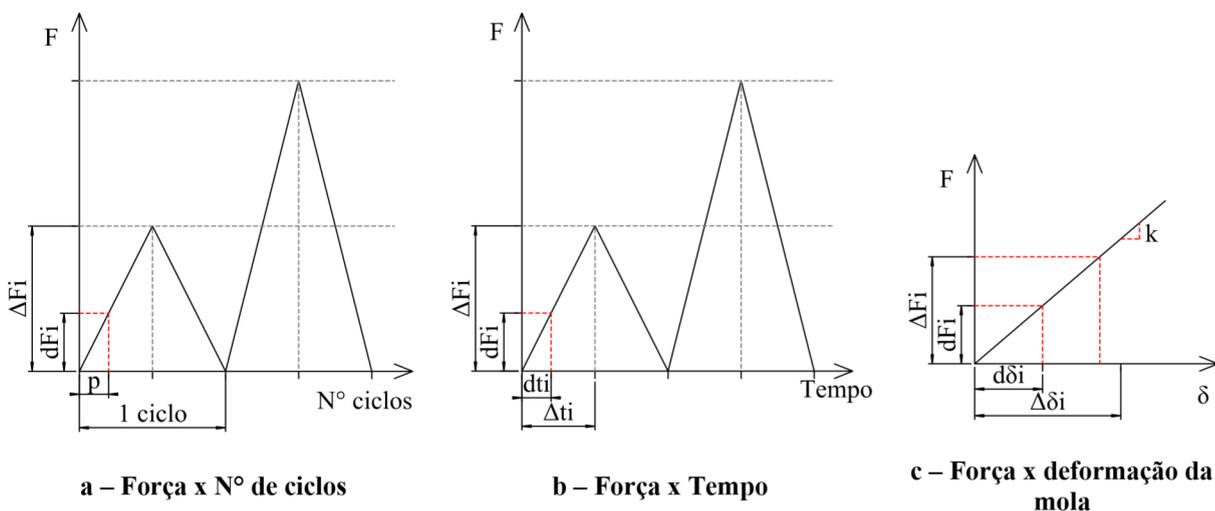


Fig. 11 – Lógica de controle do carregamento.

A Eq. 2 descreve o tempo de ação do atuador elétrico (dt_i) que é proporcional a o passo de carga incremental (dF_i) e inversamente proporcional a constante elástica da mola (K), a velocidade desenvolvida pelo atuador (v) e a menor parte da fração pela qual é dividido o ciclo de carga, em outras palavras, o passo de ciclo (p).

$$dt_i = \frac{dF_i}{K \cdot v \cdot p} \quad (2)$$

Vale ressaltar que ao término de cada passo incremental, o programa principal interrompe o movimento do atuador até que todas as leituras sejam realizadas e processadas. Isso permite que os dados sejam coletados à mesma frequência. Sendo assim, para cada passo incremental, o módulo de monitoramento do programa principal apresenta a intensidade de força registrada nas quatro células de carga, os valores de tensão e deformação atuantes nos pontos de colagem dos extensômetros e os deslocamentos registrados pelo sistema de videoanálise. Todos estes dados, além de serem apresentados instantaneamente durante o ensaio, são salvos em um *arquivo.mat* para análise posterior.

2.6 Instrumentação

Conforme apresentado nas seções anteriores, o equipamento proposto permite a realização dos ensaios em estruturas mecânicas aplicando carregamento vertical distribuído e horizontal concentrado. Entretanto, na instrumentação realizada para avaliar a funcionalidade do equipamento construído, optou-se pela simplificação dos carregamentos aplicados ao pórtico em escala reduzida, substituindo o sistema de carga distribuída (Fig. 3, subconjunto f), por carga concentrada (Fig. 8a e Fig. 8b). Além disso, não são considerados os sistemas de carregamento horizontal (Fig. 3, subconjunto g). A distância do local de aplicação das cargas concentradas

com as colunas foi calculada para que o momento fletor do carregamento concentrado simulasse o carregamento distribuído nas extremidades das vigas.

Sendo assim em referência às técnicas experimentais aplicadas em modelos estruturais tais como àquele utilizado neste trabalho, de acordo com Harris e Sabnis (1999), a instrumentação realizada ao equipamento e pórtico em escala reduzida está apresentada na Fig. 12, a qual contempla os seguintes componentes:

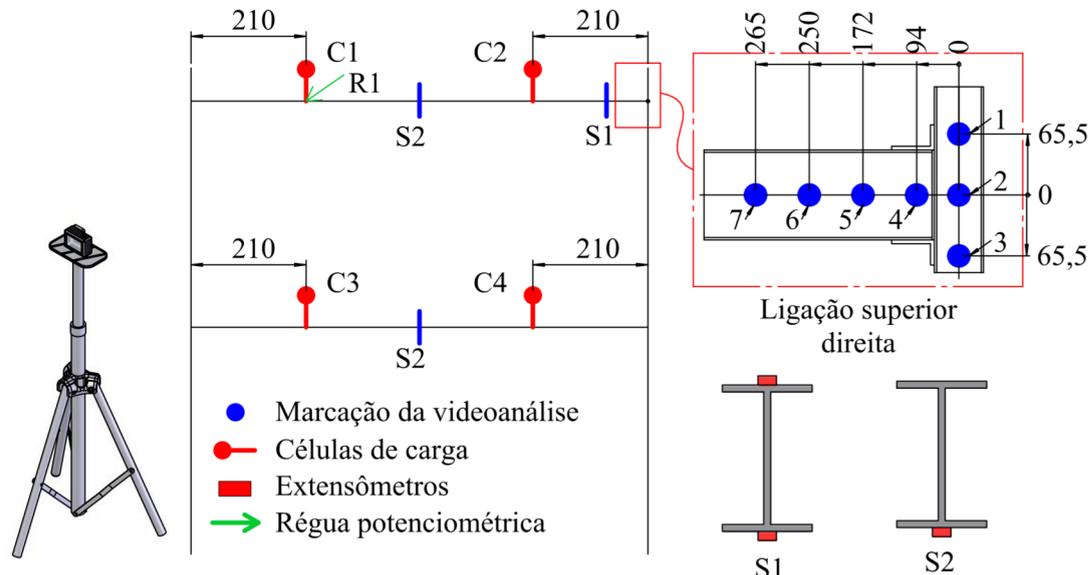


Figura 12 – Esquema da instrumentação aplicada.

I – *Célula de carga*: quatro células de carga foram instaladas nos pontos de aplicação dos carregamentos verticais concentrados. Duas delas (C1 e C2) na viga superior e duas na viga inferior (C3 e C4). Maiores detalhes quanto a especificação e funcionalidade deste componente estão apresentados nas seções 2.4 e 2.3 respectivamente.

II – *Extensômetros*: quatro extensômetros unidirecionais do modelo PA-13-125BA-350-L, foram colados no pórtico teste. Dois deles (S2) nas fibras inferiores das vigas, no ponto intermediário ao vão livre da viga superior e inferior. Os outros dois (S1) foram instalados na viga superior, nas proximidades da ligação direita. O propósito dos extensômetros consiste em monitorar e registrar as intensidades de deformação e tensão mecânica atuante nas vigas devido ao carregamento incremental aplicado.

III – *Câmera de vídeo*: uma câmera de vídeo Samsung J7 Prime 2 de 13Mp, com 30fps full HD, foi instalada a uma distância de 500 mm, perpendicularmente à área de captação das imagens. Com o propósito captar a variação dos deslocamentos em pontos específicos da estrutura teste, realizou-se a marcação de 7 pontos na região da ligação superior direita, de acordo com o detalhe apresentado na Fig. 12.

IV – *Régua potenciométrica*: uma régua potenciométrica (R1) modelo Lemaqs KTCI-200mm ($\pm 0,05\%$ FS, 5k Ω) foi conectada à lança, colinear à linha de atuação da força na célula de carga (C1). Maiores detalhes quanto ao propósito deste componente estão descritos na seção 2.5.

2.7 Protocolo de carregamento

Devido às simplificações do ensaio, o sistema de carga distribuída Fig. 3 detalhe (f) e o sistema de carregamento horizontal Fig. 3 detalhe (g) não serão utilizados nesta configuração de teste. O primeiro estágio de carga consiste na aplicação de pré-carga nos parafusos. Após o primeiro estágio ser cumprido, o carregamento vertical total previsto para cada pavimento é fracionado em duas partes iguais e aplicados de forma monotônica concentrada, em passos incrementais de ciclos repetidos quase estaticamente e simultânea no pavimento superior e inferior; a velocidade de avanço das alavancas sobre o modelo foi ajustada para 10 mm/s. A distância do local de aplicação das cargas concentradas com as colunas foi calculada para que o momento fletor do carregamento concentrado simulasse o carregamento distribuído nas extremidades das vigas. A Fig. 13 ilustra a função de carregamento aplicada, demonstrando que são executados apenas dois ciclos repetidos de carga atingindo até 50 % da carga máxima do protótipo de referência (especificação das cargas disponíveis na Fig. 5) visto que a proposta não é a comparação numérica do modelo, mas sim comprovar a eficácia do equipamento experimental construído. Desta forma preserva-se a integridade do modelo e possibilita reutilizá-lo para futuras verificações.

O carregamento aplicado é regido pela deformação de molas compressivas, as quais buscou-se atender o valor equivalente as especificações de projeto conforme Fig. 5. Para o carregamento vertical inferior foi obtido duas molas de compressão com rigidez de 68 N/mm, porém foi necessário arranjar dois pares de molas em série cujos valores de rigidez de $k_1 = 26,963$ N/mm e $k_2 = 9,1$ N/mm são somadas resultando em $k_3 = 36,063$ N/mm para compor o carregamento vertical superior.

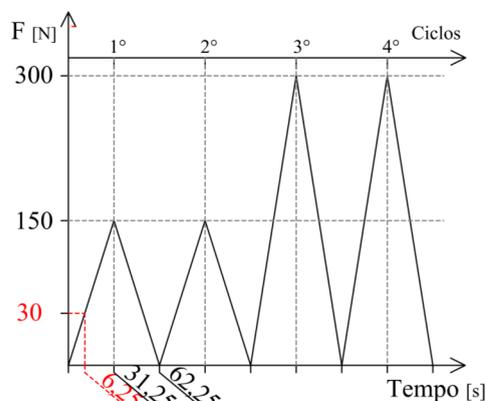


Figura 13 – Protocolo de carregamento (referência à célula de carga C1).

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O objetivo principal do teste foi observar o comportamento prático da estrutura experimental construída, assim como sua estabilidade e sua funcionalidade quanto a suportar estruturas mecânicas em escala reduzida. A resposta de força-deformação na ligação de topo e assento da viga superior com a coluna direita foi investigada simulando condições de uso, conforme mostrado na Fig. 14. É visto, na Fig. 15, que a intensidade de carregamento durante o experimento é igual em cada célula de carga nos respectivos pavimentos. O ensaio repete dois ciclos de carregamento para cada passo incremental de força, limitado em 50 % do carregamento total previsto para o modelo de referência. Nota-se que o experimento inicia e termina com carregamento zero, portanto, nenhuma força residual externa se manteve após sua conclusão.

Conforme observado na Fig. 16a o deslocamento no eixo horizontal do alvo 1 localizado no topo da coluna direita do modelo apresentou o maior valor negativo, este comportamento é acentuado à medida que o carregamento é incrementado. Em compensação, o ponto 3 também localizado na coluna direita abaixo do centro da viga superior apresentou o maior deslocamento positivo. Este comportamento indica que a coluna está sujeita a flexão e um ponto de inflexão está na região da ligação entre viga e coluna. Na Fig. 16b estão representados os deslocamentos dos alvos no eixo vertical. O comportamento do gráfico de deslocamento acompanhou a curva de força da Fig. 15. À medida que os ciclos de carregamento incrementais são aplicados, percebe-se um aumento no deslocamento vertical para todos os pontos. Este comportamento é mais significativo para os alvos mais próximos ao centro da viga, enquanto os alvos alinhados na coluna se deslocam uniformemente com módulo praticamente igual. O resultado obtido mostra que a viga apresenta maior flexão que a coluna quando o carregamento vertical é aplicado para os alvos analisados, entre outros fatores se destacam como os elementos mais representativos no comportamento global da estrutura a influência do momento de inércia dos perfis e a intensidade e o sentido de aplicação das cargas.

Os efeitos da distribuição de tensões internas são observados pelos dados coletados através dos extensômetros. A Fig. 17 expressa que a maior tensão observada está localizada na face inferior da viga inferior. Em concordância com a Fig. 16, o par de células de carga deste pavimento registrou a maior intensidade de carga. A segunda maior tensão registrada está localizada na face inferior da viga superior. Os dois pontos de maior tensão estão posicionados em uma região de inflexão e máxima de momento fletor, local historicamente investigado experimental e numericamente, que é esperado comportamento similar. Analisando os dois menores picos de tensão, localizados nas faces superior e inferior externas da viga superior, próximos à ligação, é possível perceber que não houve diferenças significativas em módulo. Este resultado se dá em consequência da posição dos extensômetros na mesma sessão transversal vertical da viga. Nesta região tensões de compressão na fibra externa superior e tração na fibra externa inferior são esperadas em intensidades similares, em concordância com os resultados obtidos.

A Fig. 18 mostra a relação de tensão e deformação, para os quatro extensômetros. Percebe-se que foi respeitado o comportamento linear, indicando que o material se manteve em comportamento elástico durante todo o ensaio. Esta condição é fundamental para preservar a relação de semelhança entre o protótipo e o modelo.

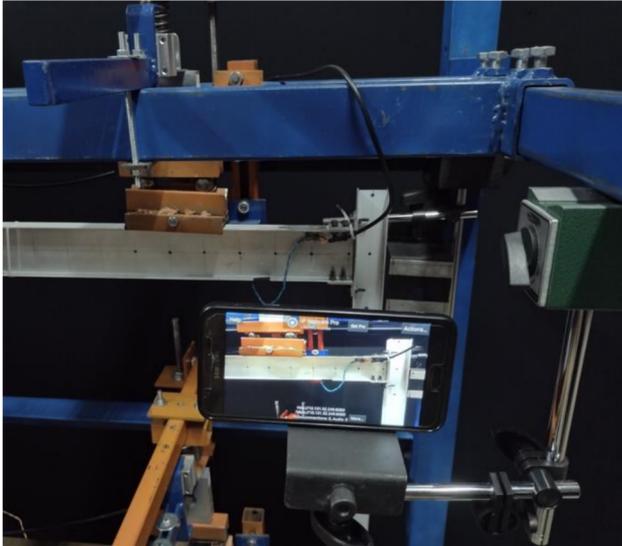


Figura 14 – Posicionamento da câmera.

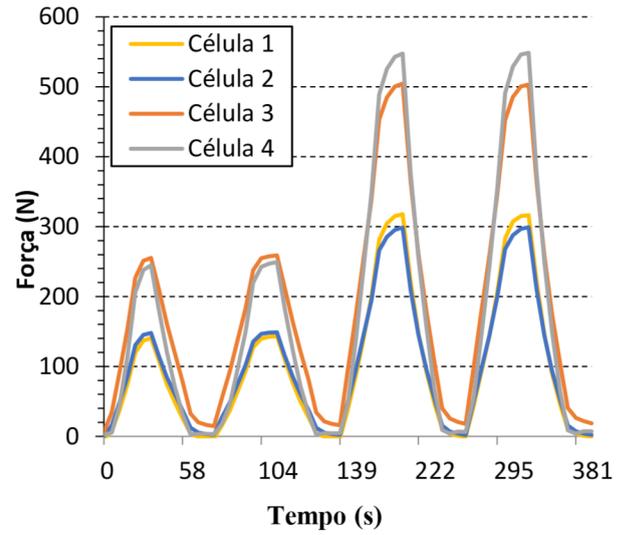
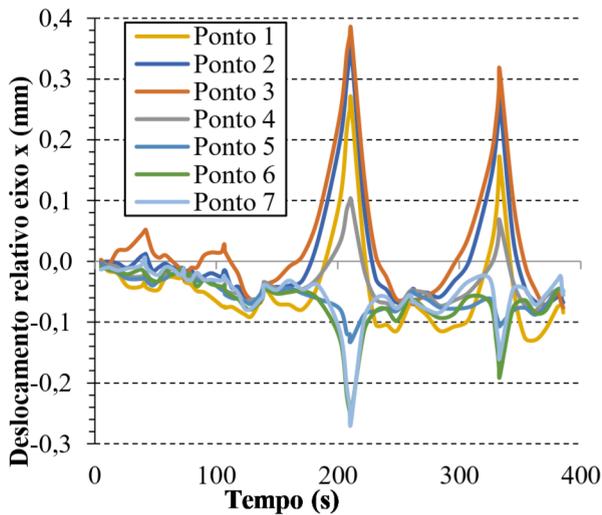
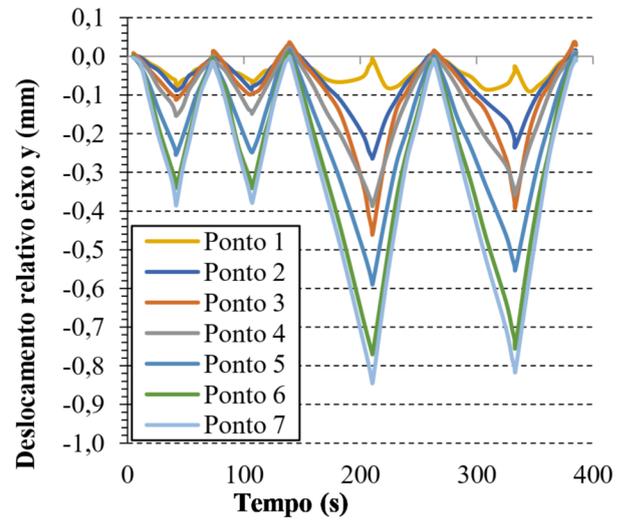


Fig. 15 – Carregamento x tempo.



a - Deslocamentos horizontais.



b - Deslocamentos verticais.

Figura 16 – Deslocamento dos alvos.

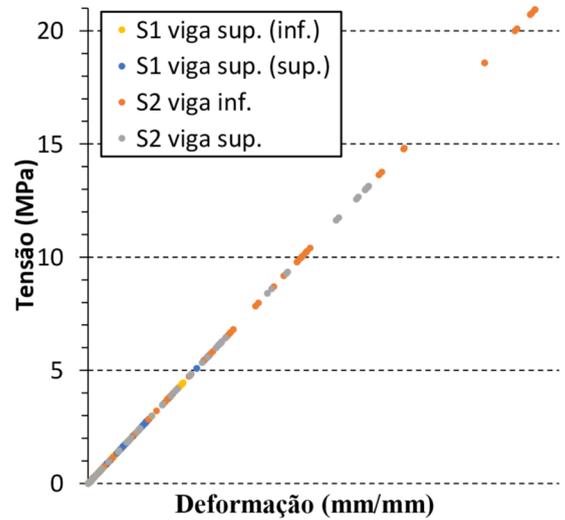
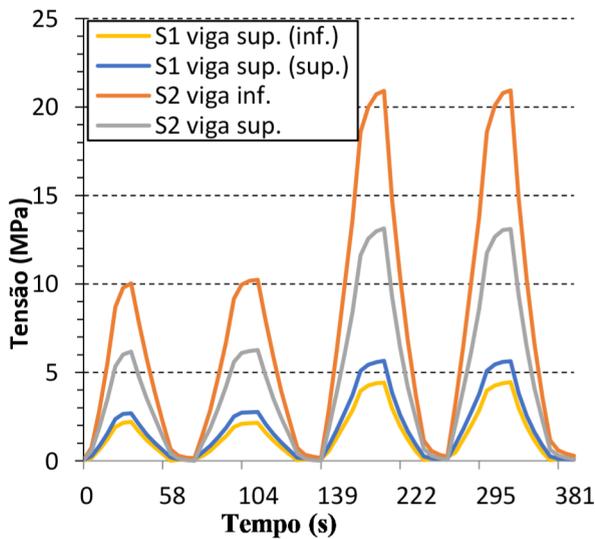


Figura 17 – Tensão x tempo.**Figura 18 – Tensão x Deformação.**

4. CONCLUSÃO

Uma vez que relativamente poucos estudos experimentais relatam detalhadamente as soluções concebidas para execução de ensaios de estruturas do tipo pórtico plano em escala laboratorial, este estudo se concentra em explorar alternativas de projeto e executar a construção de uma estrutura experimental com tal capacidade. Um modelo de dois pavimentos e um vão foi dimensionado com base em estudos existentes no meio científico e fabricado em alumínio e escala reduzida, construído para investigar brevemente os resultados experimentais e, desta forma, validar a proposta da estrutura e viabilizar outros trabalhos experimentais que buscam entender o comportamento de estruturas complexas e usar este conhecimento para aperfeiçoar o projeto de estruturas de aço em escala real. O modelo foi testado quase estaticamente para obter dados experimentais sobre seu comportamento em condição de carregamento vertical concentrado simulando o carregamento distribuído. Com base nas observações e resultados do estudo experimental descrito neste artigo, as seguintes conclusões são apresentadas:

- A estrutura construída permitiu acomodar o modelo em escala reduzida utilizando mecanismos com regulagem, apresentando praticidade em acomodar outros modelos de escalas diferentes. O sistema de controle, em conjunto com os equipamentos de medição, permite levantar dados quanto ao comportamento real da estrutura em tempo real, dispondo as informações em interface gráfica. O equipamento apresentou boa estabilidade para aplicar carregamento vertical concentrado sobre as vigas do modelo, tal resultado indica que o conjunto de anteparos laterais contiveram o movimento do modelo dentro do plano de carga. O dispositivo estabilizador de esferas permitiu aplicar carregamento concentrado com mínima interferência a deslocamento do modelo. Ainda é necessário explorar o funcionamento dos conjuntos responsáveis por distribuir carregamento vertical e o conjunto de carregamento horizontal concentrado.

- O comportamento estrutural durante o teste foi observado através da coleta de informações em tempo real utilizando células de carga, régua potenciométrica, extensômetros e a técnica de videoanálise. Foram obtidas curvas de carregamento, deslocamento dos alvos, tensão atuante em regiões de interesse e curva de tensão versus deformação, estes dados são fundamentais para análise do comportamento global e dos componentes do modelo, possibilitando comparações numéricas com experimental e ainda calibrar modelos numéricos.

- O experimento usou o método de carregamento incremental de ciclos repetidos quase-estático para simular condição de uso da estrutura. Os resultados comprovam que o método implementado é viável para simular o comportamento da estrutura em regime de exercício. Devido ao comportamento elástico ser mantido durante todo o teste, como observado na Fig. 18, esta condição se faz necessária para manter a semelhança do modelo elástico com o protótipo.

- Buscou-se na literatura a teoria que viabiliza a construção de um modelo em escala reduzida. A Teoria de Pi de Buckingham já validada em outros estudos atende as características necessárias para aplicar a redução de escala do protótipo trazendo grandes vantagens econômicas como a redução de custos de construção do modelo, equipamentos de aplicação de carga mais baratos, redução do tempo de fabricação e demanda de menos espaço físico laboratorial para execução dos ensaios. Identificou-se que as etapas de construção e instrumentação do modelo devem ser executadas com boa precisão, folgas eliminadas e os instrumentos de medição alinhados e calibrados. É notável que pequenas imperfeições nestas etapas tenham influência significativa para os resultados. Dependendo do objetivo dos ensaios, o modelo permite desvios consideráveis de construção, de acordo com Harris e Sabnis (1999), em muitas situações o modelo elástico é utilizado como modelos educacionais e modelos de engenharia arquitetônica, cujo material pode ser diferente do protótipo, inclusive com menor módulo de elasticidade, favorecendo a visualização do comportamento em regime de trabalho possibilitando acentuar propositalmente as deformações. Devido à dificuldade em encontrar materiais adequados que mantem boa semelhança ao modelo projetado, sugere-se para trabalhos futuros incluir análise de perfis comerciais encontrados no mercado como critério de definição da escala do modelo.

- O equipamento construído ficará em propriedade do Instituto Federal Campus Farroupilha, à disposição da comunidade acadêmica do campus permitindo executar trabalhos futuros que complementam o estudo apresentado neste artigo. Como sugestão de trabalhos futuros, ainda é necessário testar o *setup* completo da estrutura construída aplicando carregamento horizontal concentrado e carregamento vertical distribuído. O dispositivo completo permitirá submeter o modelo a condições idênticas às quais os autores Lo (1988), e Lo e

Stiemer (1993) estudaram numericamente, possibilitando comparações e a validação dos elementos projetados e fabricados que não foram submetidos à prova experimentalmente. Identificar a influência da diferença dos perfis do modelo construído com relação ao projeto idealizado também é uma contribuição científica importante e como os resultados obtidos nos ensaios experimentais são influenciados por estas características de construção. Em complemento, acredita-se que esta estrutura permita produzir estudos experimentais em estruturas mecânicas do tipo pórtico, treliça, viga ou coluna, ligações entre viga e coluna parafusadas, soldadas ou combinações destas, com propósito de investigar o mecanismo de falha por flambagem, flexão, torção, flexo-torção e superposição destes efeitos, proporcionando ainda comparação numérico/experimental no contexto científico contribuindo com a fabricação de estruturas mais leves e seguras.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, J. et al., 2012. “Experimental Study on the Progressive Collapse Resistance of a Two-Story Steel Moment Frame”. *Journal Of Performance Of Constructed Facilities*. Vol. 26, No 5, pp 567-575. American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000287.
- Fangxin, H., Gang, S., Yongjiu, S., 2017. "Experimental study on seismic behavior of high strength steel frames: Global response". *Engineering Structures*. Vol. 131, pp. 163-179. ISSN 0141-0296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.013>.
- Harris, H. G., Sabnis, G. M., 1999. *Structural Modeling And Experimental Techniques*. 2. ed. Estados Unidos: Crc Press, 1999. 785 p. ISBN 0849324696.
- Li, G. Q., Li, J. J., 2007. “Advanced analysis and design of steel frames”. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-03061-5;
- Lo, D. S. K., 1988. "A contribution to the Computer Aided Design of Optimized Structures for the Steel Industry". Tese de mestrado, The University of British Columbia, Canada.
- Lo, D. S. K.; Stiemer, S., 1993. "Practical method for incorporating flexible connections in plane frame analysis". *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 22, No. 5, pp. 871-882. URL: <https://doi.org/10.1139/195-105>.
- Melo, L. R. T., 2011. *Monitoração de modelos físicos reduzidos para investigação do comportamento de estruturas em escala real*. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo;
- NBR-8800, 2008. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios - procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NAKKA, Richard, 2020. "Strain Gage Load Cell for Thrust Measurement". Richard Nakka'S Experimental Rocketry Web Site. Disponível em: URL: <https://www.nakka-rocketry.net/strainlc.html#Appendix>. Acesso em: 15 dez. 2021.
- Ramu, M., Raja, V. P., Thyla, P. R., 2013. “Establishment of Structural Similitude for Elastic Models and Validation of Scaling Laws”. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No 1, pp. 139-144. doi: 10.1007/s12205-013-1216-x.
- Yi, W. J. et al., 2008. “Experimental Study on Progressive Collapse-Resistant Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures”. *ACI Structural Journal*. Vol. 105, No 4, pp. 433-439.
- Yura, J.A. et al., 1964. “Revised Proposal For Braced Multi-Story Frame Tests”. Fritz Engineering Laboratory Report. No. 273.14A, Lehigh University. URL: <https://preserve.lehigh.edu/engr-civil-environmental-fritz-lab-reports/94/>;

ABSTRACT

Lucas Pegoraro, lucasengineering@hotmail.com¹
Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹ Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha - RS.

Abstract:

In many aspects, structural steels are preferable rather than concrete as a building material due to their properties. Over the years, several experimental studies have emerged to analyze their real behavior, in order to obtain lighter, stronger and safer structures. In analytical projects of steel structures, it is common to observe coefficients that constantly need to be checked, according to what is observed in nature. However, obtaining these data in the field can make the projects unfeasible or even due to physical laboratory limitations these studies are neglected. In this aspect, physical models on a reduced scale are a cheap and easy to build alternative that can be tested and compared to full-scale prototypes, although it is still necessary to explore alternatives for adequate load application systems. The main objective of this work is the design and construction of experimental equipment to carry out tests involving mechanical structures on a reduced scale under distributed or concentrated vertical and concentrated horizontal loading. To achieve this purpose, the following steps were carried out: initially, the state of the art was carried out in the relevant scientific environment, with the purpose of identifying the alternatives found by research centers in the investigation of the problem that was raised. Later, a concept of equipment was developed, paying attention to the pre-established boundary conditions and restrictions. After the concept had been defined, the next step was to give it a solid dimensioning and model all the elements compounding the project and a scaled aluminum frame model for testing the experimental equipment started. Manufacturing the parts, assemblies, subassemblies, painting and assembly were involved in the process of the construction of the equipment and model for testing. The model was instrumented and finally experiments were carried out to analyze the functionality of the equipment and briefly explore the results obtained with this type of test. The equipment is generic for several scales, making it possible to collect data referring to the real behavior of the structure. In addition, it is believed that this experimental equipment allows the production of studies of connections between beam and column, buckling tests among others in the segment, for numerical/experimental comparison in the scientific context, contributing to the fabrication of lighter and safer structures.

Keywords: *Mechanical structures, experimental study, small scale.*

ANEXO 1 – RESUMO DE INFORMAÇÕES PROTÓTIPO, MODELO E FABRICADO

	MATERIAL	PROTÓTIPO	MODELO	FABRICADO	MODELO x FABRICADO [%]	UM	
		AÇO ASTM A36	ALUMÍNIO 5052	ALUMÍNIO 5052		Mpa	
	MÓDULO DE ELASTICIDADE [E]	205.000,00	70.000,00	70.000,00			
C O L U N A S	COMPRIMENTO [L]	7.840,00	1.063,77	1.063,50	-0,03	mm	
	ALTURA TOTAL [H]	247,14	33,53	32,00	-4,57	mm	
	LARGURA DA BASE [bf]	146,00	19,81	19,50	-1,57	mm	
	ESPESSURA DA BASE [Tf]	9,10	1,23	1,50	21,48	mm	
	ESPESSURA DA ALMA [Tw]	6,10	0,83	1,50	81,23	mm	
	ÁREA DA SESSÃO TRANSVERSAL	4.205,82	77,43	118,00	52,39	mm²	
	MÓDULO DE RESISTÊNCIA [W]	349.896,01	874,05	1.126,88	28,93	mm³	
INÉRCIA [Ix]	43.237.000,00	14.654,99	18.030,00	23,03	mm⁴		
S U V P I E G R A I O R	COMPRIMENTO [L]	7.315,00	992,54	992,50	0,00	mm	
	ALTURA TOTAL [H]	403,86	54,80	59,00	7,67	mm	
	LARGURA DA BASE [bf]	140,00	19,00	21,00	10,55	mm	
	ESPESSURA DA BASE [Tf]	11,20	1,52	1,50	-1,29	mm	
	ESPESSURA DA ALMA [Tw]	7,00	0,95	1,50	57,93	mm	
	ÁREA DA SESSÃO TRANSVERSAL	5.929,83	109,17	175,00	60,30	mm²	
	MÓDULO DE RESISTÊNCIA [W]	759.718,71	1.897,80	2.757,80	45,32	mm³	
INÉRCIA [Ix]	153.410.000,00	51.997,65	81.355,00	56,46	mm⁴		
I N V F I E G R A I O R	COMPRIMENTO [L]	7.315,00	992,54	992,50	0,00	mm	
	ALTURA TOTAL [H]	525,78	71,34	71,00	-0,48	mm	
	LARGURA DA BASE [bf]	165,00	22,39	26,00	16,13	mm	
	ESPESSURA DA BASE [Tf]	11,40	1,55	1,30	-15,96	mm	
	ESPESSURA DA ALMA [Tw]	8,90	1,21	1,20	-0,63	mm	
	ÁREA DA SESSÃO TRANSVERSAL	8.362,13	153,95	136,00	-11,66	mm²	
	MÓDULO DE RESISTÊNCIA [W]	1.305.717,22	3.261,72	3.064,23	-6,05	mm³	
INÉRCIA [Ix]	343.260.000,00	116.346,48	108.780,00	-6,50	mm⁴		
P L A C A E	ESPESSURA [L]	38,00	5,16	*N/A	-	mm	
	ALTURA TOTAL [H]	550,00	74,63	*N/A	-	mm	
	LARGURA [B]	370,00	50,20	*N/A	-	mm	
	DIÂMETRO DOS FUROS [D]	35,00	4,75	*N/A	-	mm	
	[Ca]	56,00	7,60	*N/A	-	mm	
	[Cb]	258,00	35,01	*N/A	-	mm	
	[Cc]	56,00	7,60	*N/A	-	mm	
[Cd]	219,00	29,72	*N/A	-	mm		
L I U G P A E R A I O J O	LARGURA DE ABA [L]	120,00	16,28	16,50	1,34	mm	
	CENTRO DOS FUROS [A]	65,00	8,82	8,82	0,01	mm	
	LARGURA DA BASE [B]	140,00	19,00	21,00	10,55	mm	
	ESPESSURA [E]	16,00	2,17	1,50	-30,91	mm	
	CENTRO DOS FUROS	88,91	12,06	12,00	-0,52	mm	
	DIÂMETRO DOS FUROS [D]	33,34	4,52	4,50	-0,52	mm	
	ÁREA DA SESSÃO TRANSVERSAL	4.357,08	80,22	47,25	-41,10	mm²	
L I N G F A E R A I O J O	LARGURA DE ABA [L]	120,00	16,28	16,50	1,34	mm	
	CENTRO DOS FUROS [A]	65,00	8,82	8,80	-0,22	mm	
	LARGURA DA BASE [B]	165,00	22,39	26,00	16,13	mm	
	ESPESSURA [E]	20,00	2,71	3,00	10,55	mm	
	CENTRO DOS FUROS	80,51	10,92	11,00	0,70	mm	
	DIÂMETRO DOS FUROS [D]	30,19	4,10	4,00	-2,34	mm	
	ÁREA DA SESSÃO TRANSVERSAL	4.357,08	80,22	90,00	12,20	mm²	
G L O B A L	COMPRIMENTO TRANSVERSAL TOTAL [X]	8.112,14	1.100,70	**N/A	-	mm	
	COMPRIMENTO LONGITUDINAL TOTAL [Y]	370,00	50,20	**N/A	-	mm	
	COMPRIMENTO VERTICAL TOTAL [X]	7.878,00	1.068,93	**N/A	-	mm	
	CARREGAMENTO VERTICAL DISTRIBUIDO INF.	44,66	2,07	**N/A	-	N/mm	
	CARREGAMENTO VERTICAL DISTRIBUIDO SUP.	27,15	1,26	**N/A	-	N/mm	
	CARREGAMENTO LATERAL CONCENTRADO INF.	25.620,00	161,06	****N/A	-	N	
	CARREGAMENTO LATERAL CONCENTRADO SUP.	12.810,00	80,53	****N/A	-	N	

* Não foi construído o estrutura com placa base pois o dispositivo contempla fixação direta. ** Consequência da construção sem placa base. *** Foi aplicado carregamento concentrado vertical. **** Não foi aplicado carregamento lateral.