



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica
09 de setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Ligações: concepção, projeto e elementos de fixação

UM INTERESSANTE ESTUDO DE CASO DE LIGAÇÃO VIGA-PILAR EM UM PÓRTICO DE AÇO RETANGULAR COM O PILAR EXTERNO SENDO INTERROMPIDO NA FACE INFERIOR DA VIGA

Pedro Wellington G. N. Teixeira¹
Gustavo Alves²

Resumo

Há vários tipos de ligação entre pilares externos e vigas de pórticos metálicos, porém, apesar das muitas tipologias possíveis, usualmente elas têm em comum a característica da viga ser interrompida na face interna do pilar. Solução menos usual é obtida interrompendo o pilar na face inferior da viga e, para esta tipologia, há menos estudos referentes à resistência e rigidez da ligação. Neste trabalho descreve-se a análise de um pórtico retangular com este tipo menos usual de ligação entre viga e pilar, sendo pilares e vigas perfis soldados. Além dessa tipologia de ligação, o pórtico analisado tem como característica interessante a grande relação entre a área da seção transversal e a área da alma dos perfis, o que resulta em trabalho a força cortante importante. Apresentam-se estimativas teóricas da rigidez da ligação feitas com base em modelos clássicos, discutem-se aspectos da modelagem numérica dessa ligação e, por fim, apresentam-se resultados de um ensaio do pórtico. Os resultados do ensaio demonstraram a dificuldade de obter estimativas numéricas adequadas da rigidez da ligação, dado essencial para a análise. Além disso, o trabalho a força cortante significativo também impõe dificuldades na estimativa da rigidez e, caso não seja considerado não é possível efetuar análise satisfatória. Ainda que as características peculiares do pórtico analisado neste trabalho não sejam usuais, entende-se que a apresentação e discussão dos resultados da análise pode ampliar a compreensão do funcionamento da ligação entre vigas e pilares externos de pórticos de estruturas de aço.

Palavras-chave: Ligação viga-pilar; Pórticos; Deformação por cisalhamento.

AN INTERESTING CASE STUDY OF BEAM-COLUMN CONNECTION IN A RECTANGULAR STEEL FRAME WITH THE EXTERNAL COLUMN BEING INTERRUPTED ON THE LOWER FACE OF THE BEAM

Abstract

There are several types of connection between the external column and the beam of steel frames, however, despite the many possible typologies, they usually have in common the characteristic of the beam being interrupted on the internal face of the column. A less common solution is obtained by





interrupting the column on the lower face of the beam and, for this typology, there are fewer studies regarding the strength and stiffness of the connection. This work describes the analysis of a rectangular frame with this less common type of connection between beam and column, being columns and beams built-up welded sections. In addition to this type of connection, the analyzed frame has as an interesting characteristic the great relationship between the cross-sectional area and the web cross-section area, which results in important deformations by shear stresses. Theoretical estimates of the stiffness of the connection based on classical models are presented, aspects of the numerical modeling of this connection are discussed and, finally, the results of a test are presented and discussed. The results of the test demonstrated the difficulty of obtaining adequate numerical estimates of the stiffness of the connection, which is an essential parameter for the analysis. In addition, the important shear work also imposes difficulties in estimating stiffness and, if it is not considered, it is not possible to perform a satisfactory analysis. Although the peculiar characteristics of the frame analyzed in this work are not usual, it is understood that the presentation and discussion of the results of the analysis can broaden the understanding of the operation of the connection between beams and external columns of steel structure frames.

Keywords: Beam-column connection; Frames; Shear deformation.

¹ Engenheiro Civil/Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo / São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheiro Civil/Graduado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2024.

1 INTRODUÇÃO

O pórtico analisado consiste em uma estrutura metálica de apoio à uma prensa hidráulica utilizada no Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tal prensa é capaz de aplicar forças de até 4000 kN e, assim, é ideal para o uso em corpos de prova com resistência elevada e ou elevada rigidez.

A estrutura consiste em um quadro fechado composto por duas vigas e duas colunas em perfil “I” ligadas entre si por meio de conexões rígidas parafusadas. O peso total do pórtico é de pouco mais de 100 kN e seu projeto é da década de 1980, de autoria do prof. P. B. Fusco. A fabricação ficou a cargo da empresa CODRASA. Trata-se de uma estrutura que além de estar funcional após cerca de 40 anos, apresenta importante valor histórico.

O apoio do pórtico é a laje de reação principal do laboratório, a qual apresenta ainda canaletas metálicas que permitem ancorar a viga inferior do quadro. Além disso, há pares de placas de apoio ancoradas na laje de reação que são niveladas e, portanto, garantem apoio em nível. A Figura 1 apresenta uma vista da estrutura e a figura 2 ilustra uma das bases de apoio.



Figura 1 – Vista do pórtico estudado neste trabalho.



Figura 2 – Detalhe do apoio: vista de uma base; pórtico posicionado sobre uma base.

Como pode ser visto na figura 1, o pórtico apresenta diversos enrijecedores de alma intermediários, os quais serão desconsiderados em algumas análises realizadas neste trabalho. A Figura 3 apresenta as dimensões principais do pórtico e a seção transversal bem como algumas de suas propriedades geométricas que interessam para análise.

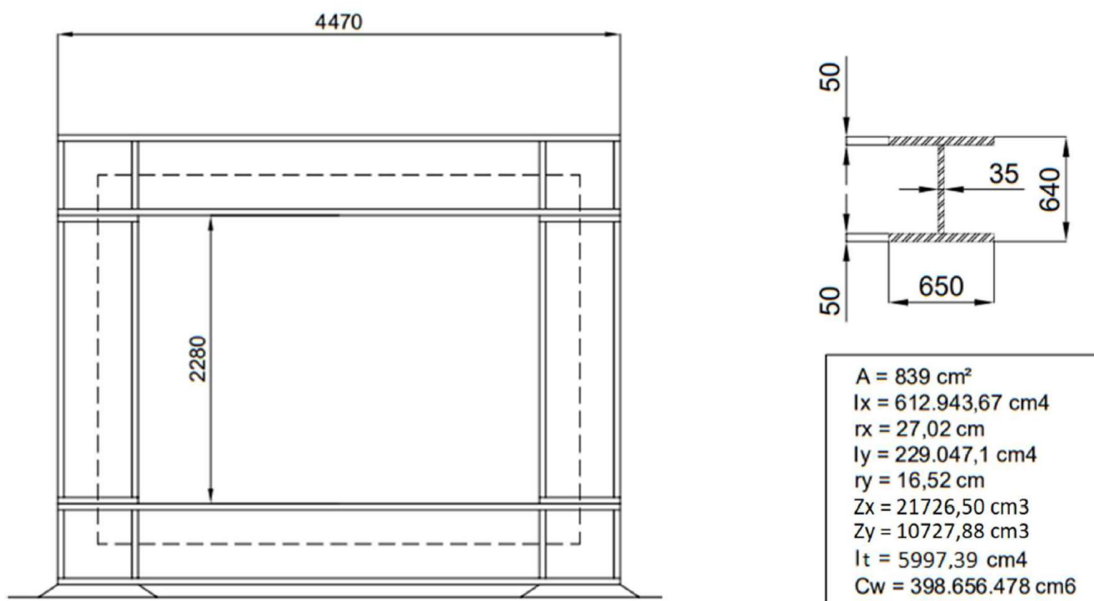


Figura 3 – Dimensões principais do pórtico e seção transversal com algumas propriedades geométricas. Na figura foram representados apenas os enrijecedores considerados relevantes para a análise da ligação entre viga e pilar do pórtico – dimensões (em mm)

Os documentos de projeto não se encontram disponíveis e, dessa forma, não se conhecem alguns parâmetros que permitiriam avaliar de forma mais completa a resistência e rigidez da estrutura – por exemplo, não foram encontrados registros das propriedades mecânicas do aço empregado, nem das soldas.

Recentemente, houve necessidade de realizar um ensaio em que as forças aplicadas poderiam alcançar valores próximos dos 4000 kN. Diante disso, planejou-se análise mais detalhada da estrutura que, naturalmente, iniciou-se com uma análise teórica.

Após análise teórica inicial considerando aço de média resistência, verificou-se que o limite de resistência deve estar associado à força cortante, pelo fato de a alma do perfil ser relativamente esbelta – relação $A_{\text{perfil}} / A_w = 3,75$. Porém, mesmo com aço de média resistência, a força cortante provavelmente poderia alcançar valores limite da ordem de 3000 kN, o que, em princípio, permitiria a aplicação de forças de até 6000 kN no centro da viga – valor a ser confirmado após as demais verificações de segurança.

O trabalho a momento fletor demonstrou-se de avaliação mais complicada, por dúvidas referentes ao funcionamento da ligação entre os pilares e as vigas. Tais ligações são diferentes das usuais, pelo fato de a emenda estar localizada em plano horizontal – o pilar é interrompido na face inferior da mesa inferior da viga. Como é sabido, a deformabilidade da ligação afeta a distribuição de momentos, o que pode impactar na resistência e, principalmente, na rigidez da estrutura.

Dessa forma, após análise inicial, decidiu-se prosseguir com o ensaio e efetuar medida de deslocamentos que auxiliassem uma análise posterior mais aprofundada. Porém, por conta de requisitos de segurança relacionados à natureza do ensaio, que envolvia compressão de um elemento relativamente esbelto, não haveria como dispor uma instrumentação completa. Assim decidiu-se medir apenas um parâmetro nesse primeiro ensaio e posteriormente realizar ensaios específicos.

Pretende-se ainda realizar ensaios de caracterização dos materiais que compõem a estrutura, mas, para este trabalho, ainda não dispunham desses estudos e foram adotados valores desses parâmetros. Entende-se que a ausência desses dados não prejudica as análises realizadas neste trabalho, haja vista que o objetivo está mais relacionado a aspectos conceituais do funcionamento da estrutura, com ênfase no comportamento das ligações.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da geometria das ligações

Inicialmente foi caracterizada a geometria das ligações entre vigas e pilares do pórtico. Trata-se de uma ligação na qual o pilar é interrompido abaixo da mesa inferior da viga. Para isso, o pilar é provido de chapa de extremidade, a qual é ligada por parafusos à mesa inferior da viga. A viga por sua vez apresenta nervuras – de ambos os lados da alma – alinhadas com as mesas do pilar. Essa solução é diferente da ligação rígida mais usual entre viga e pilar, na qual a viga é interrompida.

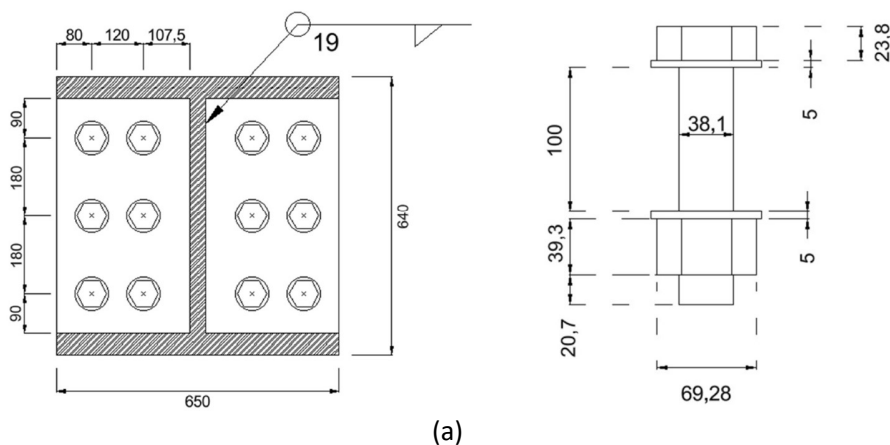
As ligações são compostas, cada uma, por 12 parafusos ASTM A325 de $1 \frac{1}{2}''$ ($d_b = 38,1$ mm) distribuídos de maneira aproximadamente simétrica com relação aos eixos centrais principais do perfil. A cabeça do parafuso possui largura de 60 mm. Os parafusos conectam a mesa da viga à uma chapa de extremidade com dimensões de 640x650x50 mm, soldada à coluna (iguais às dimensões externas do perfil) e, de acordo com as informações disponíveis, foi produzida como o mesmo aço do restante dos elementos do pórtico. As soldas entre a chapa de extremidade e perfil são feitas com penetração total. As arruelas possuem

diâmetro interno igual a 41,5 mm e diâmetro externo de 77 mm. As porcas utilizadas possuem seção transversal igual à cabeça do parafuso e espessura de 39,3 mm. A Figura 4 ilustra as dimensões mais relevantes do parafuso, da porca e da arruela utilizados na ligação analisada.



Figura 4 – Foto de um dos parafusos ASTM A325 de 1 ½” empregados na ligação do pilar com a viga do pórtico.

Após um levantamento manual, foi constatada uma diferença razoável entre as dimensões que caracterizam a distribuição dos parafusos ao longo da ligação. Foi adotado, por simplicidade, um modelo único de distribuição para todas as ligações com os valores médios obtidos no levantamento. A Figura 5 apresenta a distribuição adotada dos parafusos ao longo da ligação, bem como as dimensões dos parafusos, porcas e arruelas, empregadas para os cálculos e construção de modelos de análise.





(b)

Figura 5 – Detalhe da ligação do pórtico: (a) croquis esquemáticos da geometria da ligação e dos parafusos; (b) vista dos enrijecedores próximos ao nó de ligação entre viga e pilar

Não foi possível determinar com acurácia a força de protensão aplicada sobre os parafusos da ligação, pois não foram encontrados documentos ou memórias de cálculo relatando o torque aplicado sobre os parafusos durante o processo de montagem do pórtico, bem como também não foi possível obter instrumentos para realizar a medição dessa variável com precisão. A informação mais próxima foi obtida com os técnicos do laboratório que relataram terem aplicado um torque próximo a 600 N.m medido no próprio torquímetro no momento da aplicação da força de pré-tração. Considerando este valor, é possível chegar a uma estimativa da força de pré-tração com valor $T = 78,74$ kN, que é bem inferior ao valor exigido por norma: 458 kN (Tabela 8 da NBR 8800).

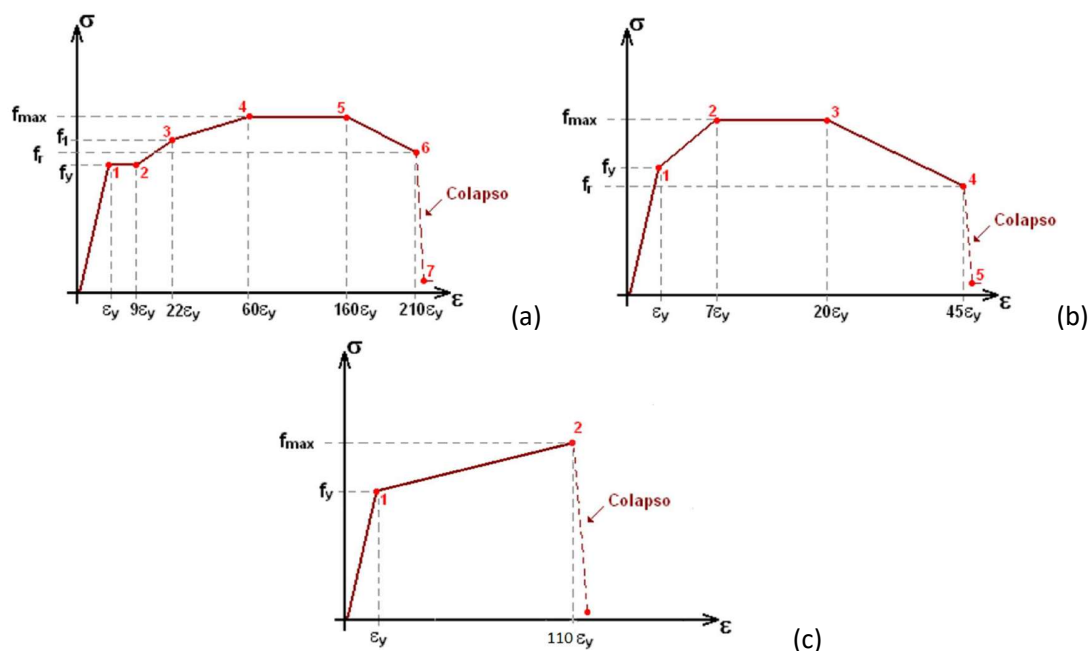
2.2 Análise teórica

2.2.1 Avaliação da rigidez e da resistência da ligação

A rigidez será analisada a partir de alguns diagramas momento-rotação da ligação e força normal-deslocamento que foram obtidos com modelos numéricos [1].

A figura 6 apresenta diagramas tensão-deformação que foram empregados em alguns dos modelos que serão usados como base e se encontram explicados de forma mais detalhada na referência [1]. Está além do objetivo deste trabalho apresentar e discutir em maiores detalhes os modelos numéricos.

A figura 7 apresenta uma vista que permite entender a geometria do modelo numérico descrito na referência [1], cujos resultados principais serão empregados neste trabalho.



Material	Ponto	Definição valores de engenharia		Valores de engenharia		Valores verdadeiros		Valores adotados	
		σ_{eng} (MPa)	ϵ_{eng}	σ_{eng} (MPa)	ϵ_{eng}	σ_{ver} (MPa)	ϵ_{ver}	σ_{ver} (MPa)	ϵ_{ver}
ASTM A572 Gr. 50		E (Gpa) = 200		f_y (MPa) = 345		f_u (MPa) = 450		$v = 0,3$	
	1	f_y	ϵ_y	345	0,001725	345,60	0,001724	345,00	0,001725
	2	f_y	$9\epsilon_y$	345	0,015525	350,36	0,015406	350,36	0,015406
	3	$f_y+0,5(f_u-f_y)$	$22\epsilon_y$	397,5	0,037950	412,59	0,037248	412,59	0,037248
	4	f_u	$60\epsilon_y$	450	0,103500	496,58	0,098487	496,58	0,098487
	5	f_u	$160\epsilon_y$	450	0,276000	574,20	0,243730	574,20	0,243730
	6	$f_y+0,2(f_u-f_y)$	$210\epsilon_y$	366	0,362250	498,58	0,309138	498,58	0,309138
	7	0,1	$212\epsilon_y$	0,1	0,365700	0,14	0,311667	0,10	0,311667
ASTM A325		E (Gpa) = 200		f_y (MPa) = 560		f_u (MPa) = 725		$v = 0,3$	
	1	f_y	ϵ_y	560,00	0,002800	561,57	0,002796	560,00	0,002800
	2	$f_y+0,25(f_u-f_y)$	$7\epsilon_y$	601,25	0,019600	613,03	0,019410	613,03	0,019410
	3	$f_y+0,25(f_u-f_y)$	$20\epsilon_y$	601,25	0,056000	634,92	0,054488	634,92	0,054488
	4	$f_y-0,15(f_u-f_y)$	$45\epsilon_y$	535,25	0,126000	602,69	0,118672	602,69	0,118672
	5	0,1	$45,5\epsilon_y$	0,10	0,127400	0,11	0,119914	0,10	0,119914
E7018		E (Gpa) = 200		f_y (MPa) = 400		f_u (MPa) = 484		$v = 0,3$	
	1	f_y	ϵ_y	400	0,002000	400,80	0,001998	400,00	0,002000
	2	f_u	$110\epsilon_y$	484	0,220000	590,48	0,198851	590,48	0,198851
	3	0,1	$111\epsilon_y$	0,1	0,222000	0,12	0,200489	0,10	0,200489

(d)

Figura 6 – Diagramas tensão-deformação considerados nos modelos numéricos: (a) aço dos perfis; (b) parafusos; (c) soldas. Valores extraídos da referência [1].

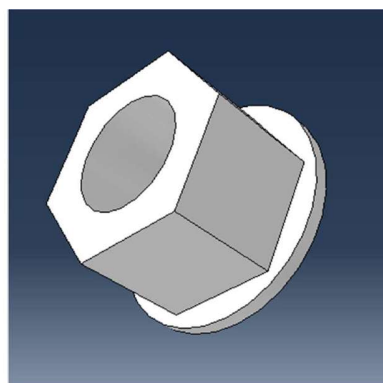
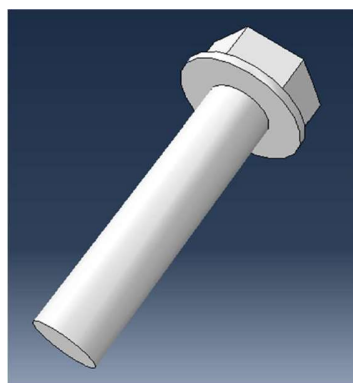
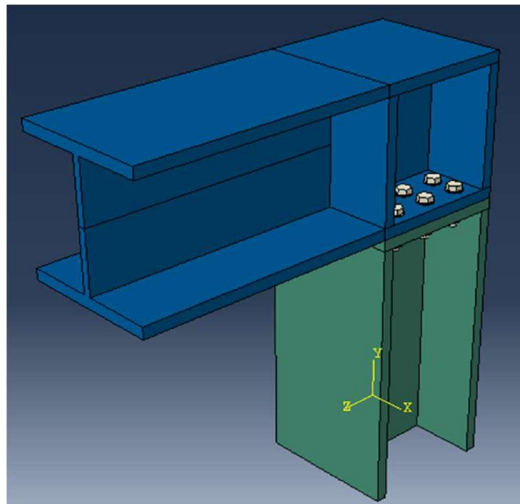
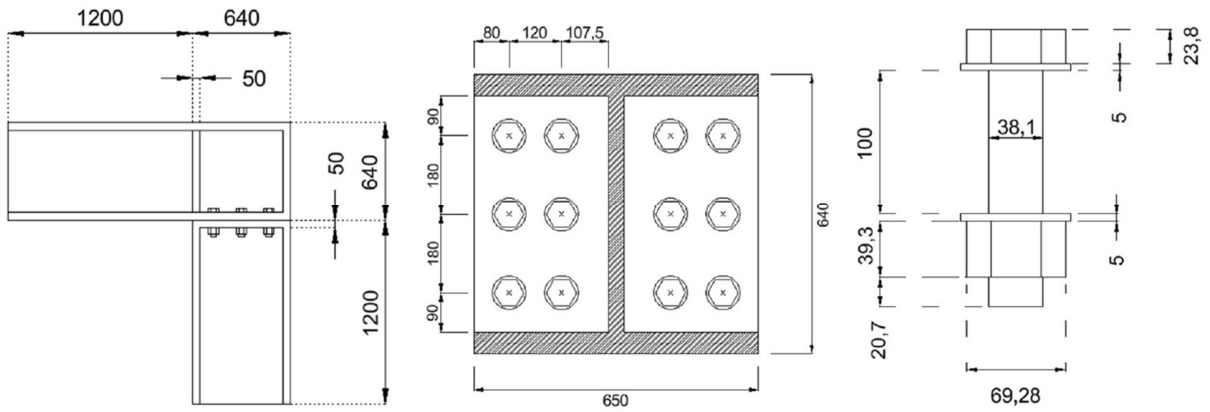


Figura 7 – Geometria básica do modelo numérico descrito de forma detalhada na referência [1] – medidas em mm.

Como foi lembrado ao longo deste trabalho, a distribuição de esforços ao longo de uma estrutura hiperestática é função da rigidez de seus elementos, incluindo a rigidez das conexões. Dessa forma, conclui-se que o valor da carga de colapso da ligação é função dentre outras coisas de sua rigidez, tornando, assim, imperativo a determinação da segunda antes da primeira.

A avaliação da resistência será feita buscando-se determinar os esforços limite da conexão com hipóteses de comportamento elástico e comportamento plástico. Na avaliação da resistência é necessário considerar além das condições intrínsecas do nó, o formato dos diagramas de esforços solicitantes da estrutura, uma vez que a distribuição dos carregamentos implica em diferentes valores limites para a ligação. Para o caso estudado, conforme será apresentado posteriormente, o nó estará submetido a uma força normal e um momento fletor.

2.3. Ensaio do pórtico

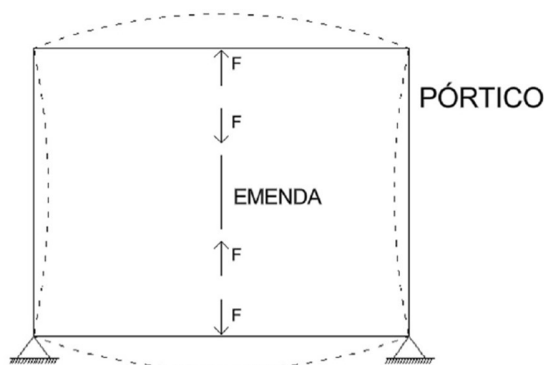
Como já foi comentado, aproveitou-se a necessidade de um ensaio para coletar dados adicionais referentes ao comportamento do pórtico. O ensaio em questão foi um teste de compressão num elemento metálico curto. O carregamento sobre o corpo de prova foi aplicado a partir do uso de uma prensa hidráulica com capacidade de 4000 kN, conforme figura 8. A partir dessas condições, a aplicação do carregamento de compressão sobre o corpo de prova gera, por reação, um carregamento de flexão no pórtico, provocando, dessa forma, flechas em ambas as vigas da estrutura.

A Figura 8a apresenta a prensa fixada no pórtico e a Figura 8b apresenta um esquema da aplicação de força sobre a estrutura e sobre o corpo de prova.

Por questões de segurança, foi construída uma gaiola de proteção em torno do protótipo utilizando grades metálicas convenientemente fixadas com uso de barras de aço de protensão. Como resultado, apenas um relógio comparador foi instalado para medir a flecha da viga superior. Para posicionar o relógio comparador foi empregada uma viga de referência sem contato com o pórtico.



(a)



(b)

Figura 8 – Detalhes adicionais sobre a montagem para o ensaio: (a) prensa hidráulica fixada na viga superior do pórtico; (b) esquema do carregamento e esboço da deformada do pórtico em linha tracejada.

O ensaio foi iniciado com uma primeira fase de aplicação de carga que visava acomodar o corpo de prova da emenda antes de coletar os dados. Nessa primeira fase foi utilizada uma velocidade de carregamento de 100 kN/min até se atingir valor de 400 kN. Em seguida houve o descarregamento completo do protótipo para que o ensaio fosse reiniciado.

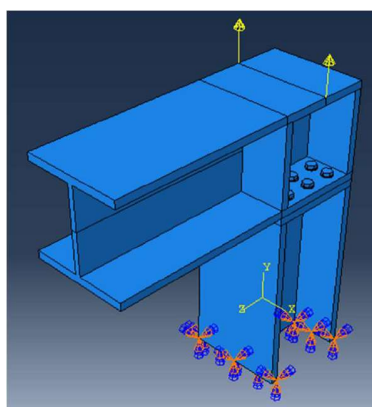
Na segunda fase foi aplicada novamente uma força inicial de 400 kN com velocidade de 100 kN/min. A partir do carregamento de 400 kN, a velocidade de carregamento foi alterada para, aproximadamente, 400 kN/min. O ensaio seria finalizado a partir do momento em que se identificasse o colapso do corpo de prova ou o que se alcançasse a capacidade da prensa (4000 kN).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

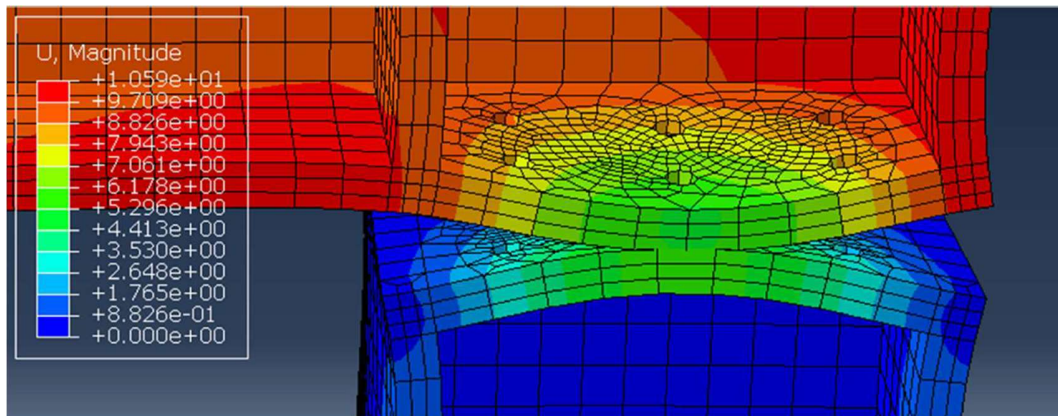
3.1 Resistência e rigidez da ligação

Para determinar a rigidez do nó é necessário inicialmente caracterizar a distribuição de esforços ao longo da ligação, uma vez que os coeficientes de rigidez são distribuídos por zonas de tração, compressão, cisalhamento ou flexão. A determinação dessas zonas é feita a partir da análise do equilíbrio da ligação quando submetida a um momento fletor. Essa análise permite também concluir o valor do momento último da ligação na ausência de demais esforços solicitantes, bem como a força normal de tração limite. Ou seja, é importante estimar os limites de resistência da ligação. Para estimar os limites de resistência na ligação foram adotadas algumas hipóteses, descritas a seguir:

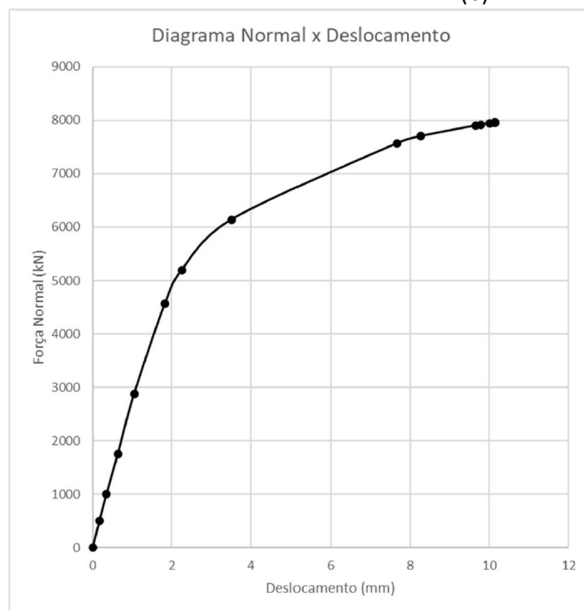
- **Tração centrada:**
 - Quando submetida exclusivamente à tração, admitiu-se que a ligação colapsa com todos os parafusos atingindo a ruptura simultaneamente. Com essa hipótese, a resistência estimada seria da ordem 8000 kN, valor usado para definições do modelo. Com esse valor definido, foi processado o modelo com tração centrada, chegando-se aos resultados que importam para este trabalho apresentados na figura 9.
 - Com relação à deformada, mostrada na figura 9b, é possível inferir que o efeito alavanca é crítico na segunda linha de parafusos, tanto na mesa da viga quanto na chapa de extremidade do pilar.



(a)



(b)



Nu	7960.08	kNm
ulim	10.14	mm
Sini	2313.895	kN/mm

(c)

Figura 9 – Alguns resultados que interessam para a análise no caso de tração centrada: (a) esquema do carregamento e vinculação; (b) vistas da deformada; (c) diagrama força normal-deslocamento e alguns valores chave [1].

- **Flexão simples:**

- Foram calculados dois valores limite de momento, respectivamente no regime elástico (figura 10a) e no regime plástico (figura 10b);
- Com base nesses resultados foram processados os modelos cujos resultados que interessam nesta análise se encontram na figura 11;

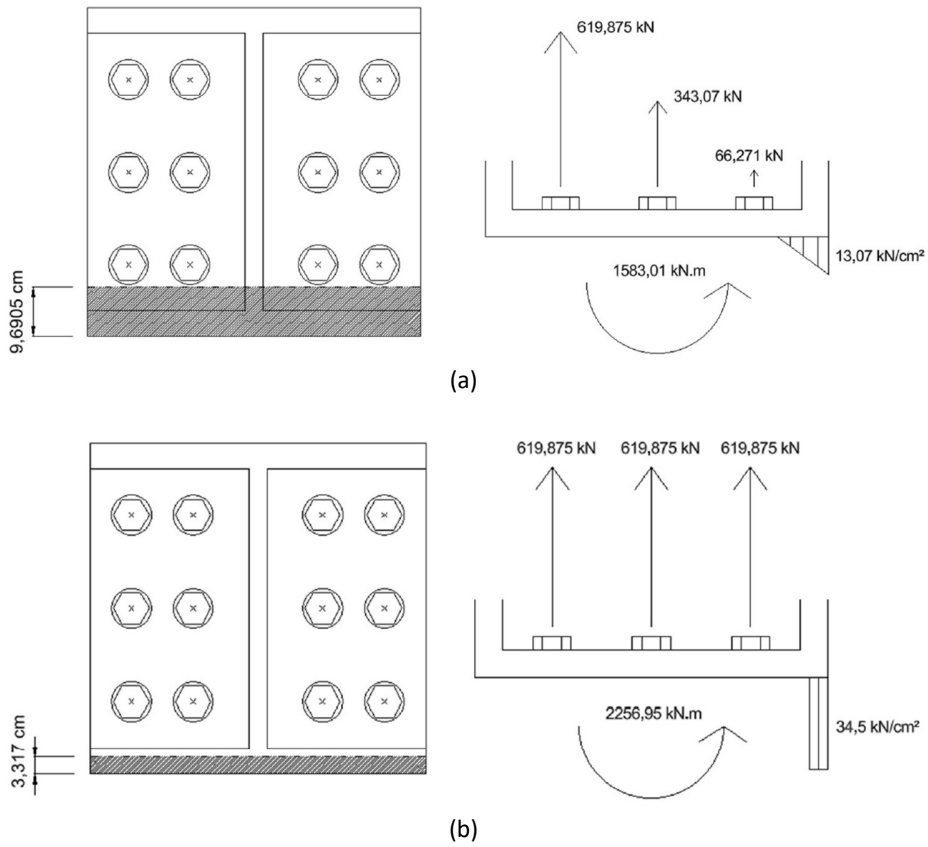
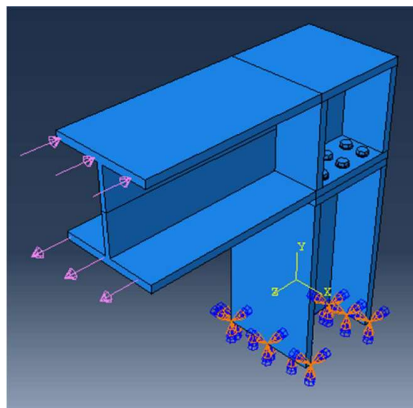
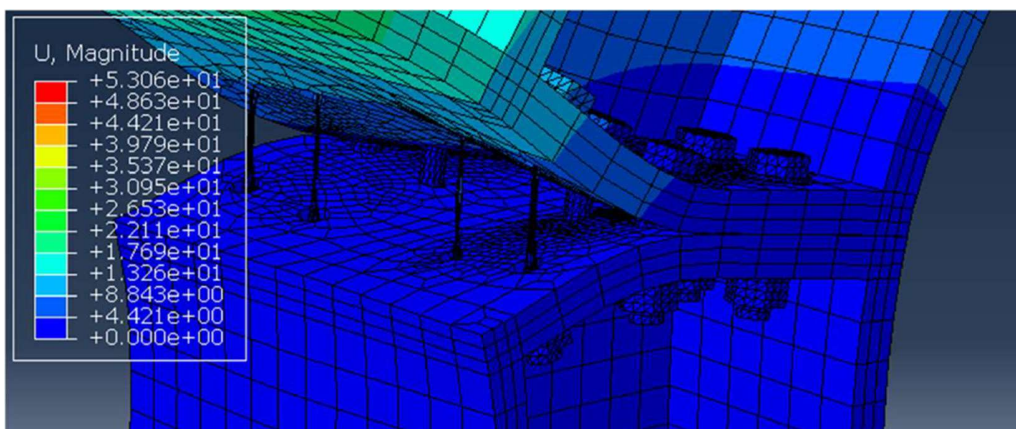


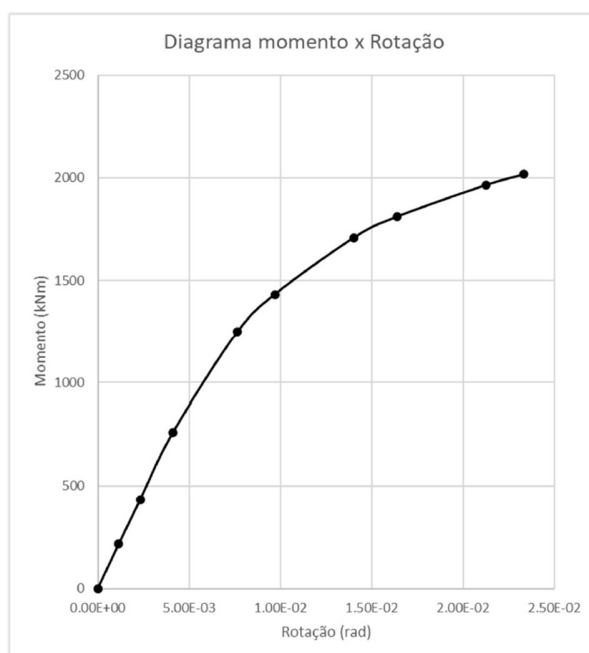
Figura 10 – Equilíbrio da ligação na iminência do colapso por momento fletor: (a) desprezando efeito alavanca e adotando hipótese elástica; (b) desprezando efeito alavanca e adotando hipótese plástica [1].



(a)



(b)

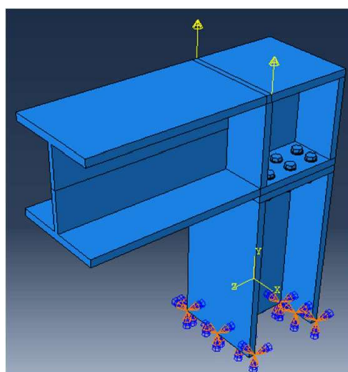


(c)

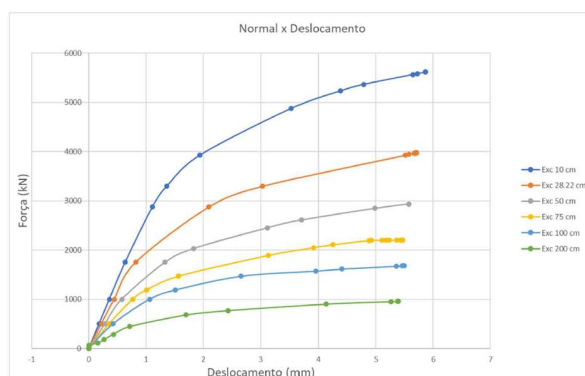
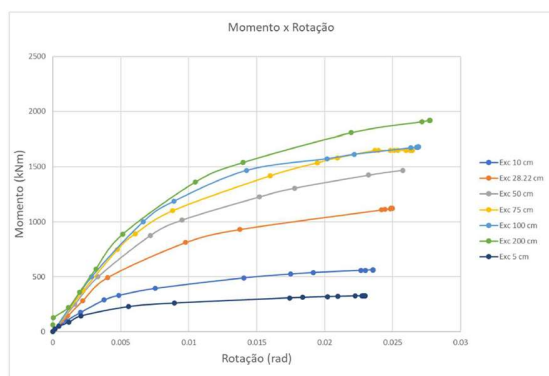
Figura 11 – Alguns resultados que interessam para a análise no caso de flexão simples: (a) esquema do carregamento e vinculação; (b) vistas da deformada; (c) diagrama momento fletor-rotação e valores chave [1].

A ligação real nunca está submetida exclusivamente à tração ou à flexão simples, sempre há uma combinação dos dois esforços. Conhecer a relação entre os principais parâmetros de rigidez e de resistência com a relação entre momento e normal (excentricidade) é fundamental para permitir o dimensionamento adequado da ligação quando submetida a sobrecarga em seus elementos. Alguns

desses resultados se encontram na figura 12. Conforme se observa nos gráficos da figura 13, há uma queda da resistência e da rigidez do pórtico à tração, conforme se aumenta a excentricidade do carregamento de tração na ligação. O movimento inverso ocorre para o caso da rigidez e da resistência ao momento fletor. Também se identifica uma aproximação assintótica do momento último e da tração última, respectivamente, aos valores calculados para a ligação submetida apenas ao momento fletor, ou seja, 2017,18 kNm e 0 kN.



(a)



(b)

e	cm	0	5	10	28.22	50	75	100	200
Mu	kNm	-	326.623	561.574	1121.576	1468.81	1649.475	1680.254	1916.404
θu	rad	-	0.022962	0.02354	0.024959	0.025745	0.02642	0.02688	0.027726
Nu	kN	7701.84	6532.46	5615.74	3974.4	2937.62	2199.3	1680.254	958.202
ulim	mm	10.1397	6.03306	5.86278	5.70677	5.57765	5.46544	5.48827	5.38613
Sini	kNm/rad	-	70152.57	100387.7	128791.1	150811	157447.7	150721.9	174852.7
kini	kN/m	2861.877	2839.385	2784.996	2139.15	1731.968	1303.504	942.8714	650.6889

(c)

Figura 12 – Alguns resultados que interessam para a análise no caso de flexão simples: (a) esquema do carregamento e vinculação; (b), (c) diagrama momento fletor-rotação e força normal-deslocamento e alguns valores chave [1].

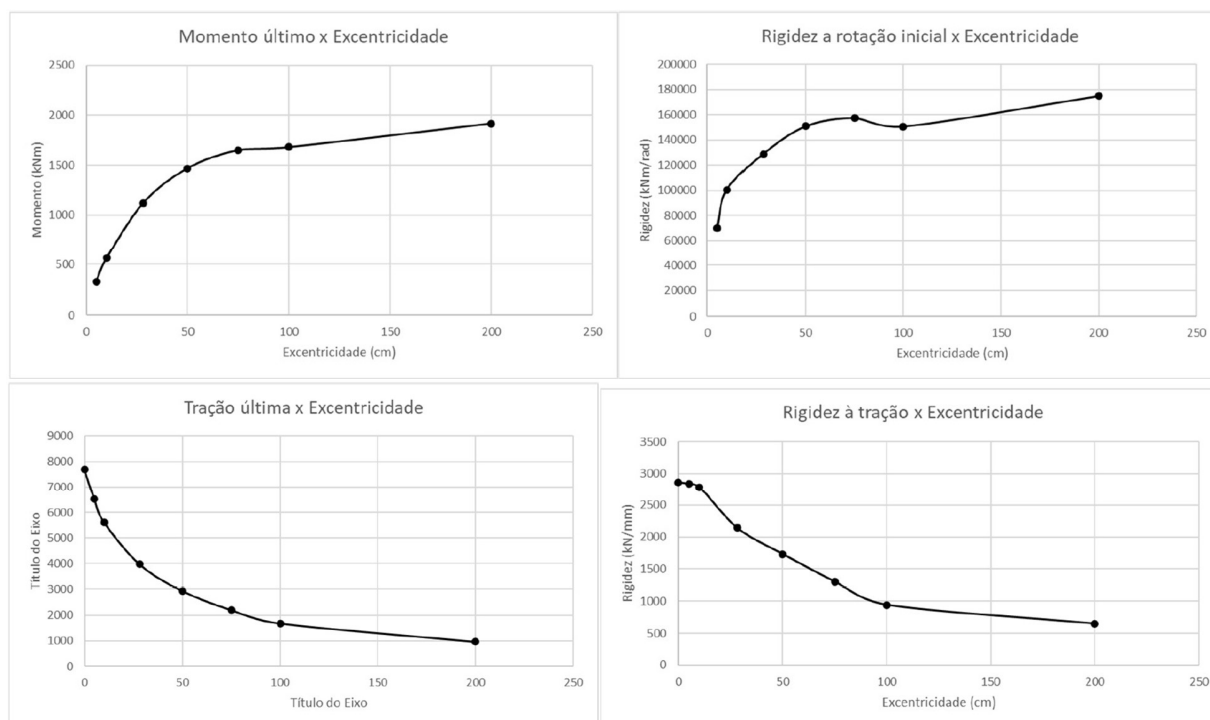


Figura 13 - Variação dos parâmetros de interesse da ligação com a excentricidade do carregamento de tração obtidos com os modelos numéricos de tração excêntrica [1].

3.2 Ensaio do pórtico

Finalmente, após ensaio do pórtico, foi possível ter um valor experimental de um parâmetro que pudesse validar a acurácia dos modelos teóricos. No ensaio a força máxima alcançou valor de 3160 kN e o deslocamento no centro do vão da viga chegou a 7,05 mm. A figura 14 apresenta o gráfico força-deslocamento obtido no ensaio.

Analisando o pórtico com modelo de barras tem-se os seguintes valores de deslocamentos:

- Considerando as ligações perfeitamente rígidas a momento fletor: 3,7 mm; que é um valor muito inferior ao obtido no ensaio. Esse valor pode ser obtido por análise do pórtico em um programa de análise de estruturas reticuladas planas, como o FTOOL, por exemplo;
- Considerando as ligações perfeitamente flexíveis a momento fletor: 5 mm; que ainda é um valor com diferença grande do obtido no ensaio, embora mais próximo que o anterior. Este resultado pode ser obtido com um modelo plano reticulado ou pode ser estimado diretamente com a expressão da Resistência dos Materiais ($\alpha_s = A_{tot}/A_w = 3,75$) :

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} \left(1 + \frac{12\alpha_s EI}{GA l^2} \right)$$

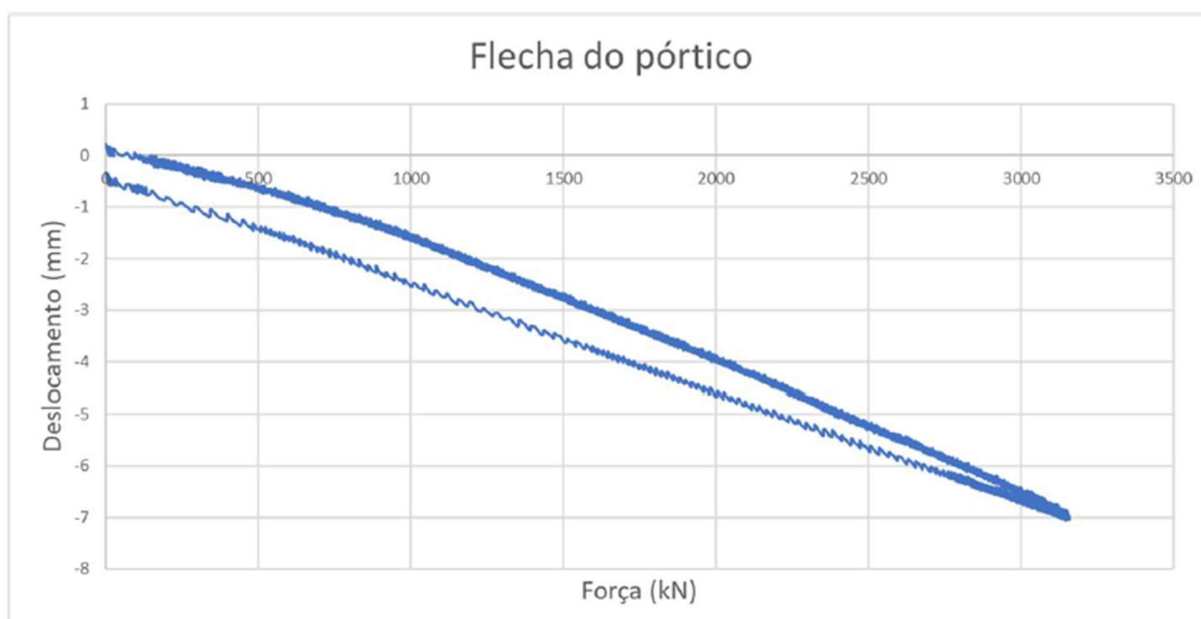


Figura 14 – Diagrama força-deslocamento obtido no ensaio.

Pelos modelos numéricos, a rigidez inicial pôde ser avaliada com valores de:

- $S_{ini} = 163 \text{ kN.m/mrad}$ (figura 10c) para o caso de flexão simples;
- $K_{ini} = 2314 \text{ kN/mm}$ (figura 8c) para o caso de tração;

Além disso, a resistência da ligação apresentou os seguintes valores:

- $M_{y,lig} = 1583 \text{ kN.m}$; $M_{p,lig} = 2257 \text{ kN.m}$ (figura 11);
- $M_u = 2017 \text{ kN.m}$ (figura 10);
- $N_u = 7960 \text{ kN}$ (figura 9);

Analisando o pórtico chega-se a valores de $N = 1580 \text{ kN}$ para o carregamento máximo. Logo, no ensaio, o valor de N foi muito inferior ao que levaria a ligação ao colapso considerando tração centrada ($N = 20\% N_u$).

Também é importante comparar o momento de plastificação da seção com os valores últimos estimados acima.

- $M_{pl} = Z_x f_y = 21726,5 \text{ cm}^3 \times 34,5 \text{ kN/cm}^2 = 7496 \text{ kN.m}$;
- $M_u / M_{pl} = 2017/7496 = 0,27$;
- $M_{p,lig} / M_{pl} = 2257/7496 = 0,30$;

Ou seja, o momento resistente da ligação é da ordem de 25% a 30% do momento de plastificação da seção, de acordo com as avaliações acima.

Para avaliar o momento fletor que solicitou a ligação no ensaio é necessário inicialmente determinar se a ligação poderia ser considerada rígida, flexível ou semirrígida. Isso pode ser feito de acordo com a NBR

8800, por exemplo. O passo inicial é avaliar a relação K_v/K_p , uma vez que os limites para a classificação como rígida dependem desse fator. Para o caso avaliado:

$$\frac{K_v}{K_p} = \frac{I_v/L_v}{I_p/L_p} = \frac{I_v L_p}{I_p L_v} = \frac{612943,67 \cdot 2,92}{612943,67 \cdot 3,83} = 0,762 > 0,1$$

Dessa forma o limite estabelecido para a ligação rígida pode ser aplicado para o caso avaliado. Os limites de classificação são, portanto:

$$\text{Flexível: } S_{ini} \leq 0,5 \frac{E \cdot I_v}{L_v} = 0,5 \frac{20000 \cdot 612943,67}{383} = 160037,51 \text{ kN/m}$$

$$\text{Rígida: } S_{ini} \geq 25 \frac{E \cdot I_v}{L_v} = 8001875,59 \text{ kN/m}$$

$$\text{Semirrígida: } 0,5 \frac{E \cdot I_v}{L_v} < S_{ini} < 25 \frac{E \cdot I_v}{L_v}$$

Logo, a ligação se encontra no limite de uma ligação flexível, pois $S_{ini} = 163 \text{ kN.m/mrad} \sim 160 \text{ kN.m/mrad}$. Dessa forma, em princípio, o momento fletor na ligação seria próximo de zero – e, nesse caso, o deslocamento seria de 5 mm.

Porém, o valor de 5 mm ainda é inferior ao que foi medido no ensaio. Um motivo para tal diferença pode ser a existência de força normal de tração de 1580 kN na ligação associado à rigidez da ligação a força normal. Essa força normal pode ser responsável por um deslocamento adicional da ordem de 1,5 mm – essa estimativa considera o valor de K_{ini} apresentado ($K_{ini} = 2314 \text{ kN/mm}$; figura 9c) e o fato de que devem ser somados os valores das duas ligações entre pilares e vigas, a inferior e a superior. Isso aproxima mais o deslocamento obtido. Dessa forma, o deslocamento teórico passa a ser de 6,5 mm e a diferença de 0,5 mm encontrada no ensaio pode ser atribuída a pequenas acomodações ou plastificações locais.

Conclusões

Após análise teórica da estrutura e análise dos resultados do ensaio, pode-se concluir que a ligação entre vigas e pilares do pórtico em questão apresenta capacidade de transmitir momento fletor muito além da capacidade resistente à flexão dos elementos que compõem a própria estrutura. Dessa forma, é possível identificar que um modelo de nó flexível é mais adequado para análise do pórtico.

Outro aspecto importante é que a grande relação entre a área da seção e a área da alma dos perfis da estrutura ($\alpha_s = A_{tot}/A_w = 3,75$) faz com que o trabalho a força cortante da viga assuma importância e não possa ser desconsiderado na análise.

A flexibilidade da ligação em questão não afeta a resistência da estrutura, devido às características geométricas da viga que fazem com que os valores de resistência sejam virtualmente iguais em caso de momento fletor positivo ou negativo.

Por fim, pode-se concluir que o projeto original conduziu a uma estrutura eficiente e de bom desempenho estrutural. No ensaio realizado foi aplicada uma força bastante elevada (3160 kN) no centro do vão da viga. A estrutura e suas ligações se comportaram de forma satisfatória como pode ser visto no gráfico



força-deslocamento do ensaio e como pôde ser avaliado no acompanhamento do ensaio. Isso demonstra a qualidade do projeto original que resultou numa estrutura com desempenho adequado, que consegue atender de forma satisfatória requisitos de segurança e de comportamento em serviço. Por outro lado, as peculiaridades do comportamento da estrutura, seja pela tipologia das ligações, seja pelas características da seção transversal, reforçam a necessidade de uma adequada manutenção e monitoramento da estrutura. Entende-se que os dados deste trabalho poderão ser úteis para essas atividades.

Os autores deste trabalho gostariam de expressar seus agradecimentos à EPUSP, pelo apoio fornecido pelo Laboratório de Estruturas e de Materiais Estruturais, em nome dos professores que coordenavam o LEM na época do ensaio: professores Ruy M. O. Pauletti e Leila M. Valverdes. E reforçar os agradecimentos aos técnicos do LEM Antônio Jacomini e Rui Jacomini, pela maneira como participaram e conduziram os ensaios com segurança e pelas informações sobre a estrutura. Por fim, agradecer ao prof. Claudius S. Barbosa, da EPUSP/PEF, que deu apoio para a instrumentação dos ensaios.

REFERÊNCIAS

[1] ALVES, G. Avaliação do comportamento mecânico das conexões em estruturas de aço via modelagem analítica, numérica e experimental - Estudo de casos: emenda soldada de estacas metálicas e ligação viga-pilar parafusada. Trabalho de Formatura do Curso de Engenharia Civil apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil. São Paulo: EPUSP, 2024.

[2] ABNT_NBR 8800 (2008). Projeto de estruturas de aço de edifícios. ABNT, Rio de Janeiro, 2008.

