

O efeito do uso de parafuso frontal em ligação longarina-coluna de estruturas porta-palete: um estudo experimental

Maria Ávila Branquinho ^{1*}, Luiz Carlos Marcos Vieira Júnior ² e Maximiliano Malite³

¹ Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil, maria.branquinho@ufjf.br

² Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

³ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

The effect of a front bolt on the beam-to-column connection of racks: an experimental study

Resumo

De forma geral, as ligações longarina-coluna das estruturas porta-paletes são projetadas para trabalhar por encaixe a fim de facilitar mudanças no projeto das estruturas ao longo dos anos. A disseminação deste tipo de estrutura, principalmente em grandes alturas, tem levado à prática, ainda sem regulamentação, da adoção de parafusos. Neste contexto, o presente estudo experimental avalia o comportamento mecânico de uma ligação comercial longarina-coluna a fim de avaliar os efeitos de um parafuso frontal no comportamento mecânico da ligação. Com base em 8 ensaios de longarina em balanço, foram avaliados os efeitos em termos da curva momento-rotação, modo de falha, folgas e centro de rotação da ligação. Devido à existência de folgas, a determinação do centro de rotação da ligação requereu a proposta de uma instrumentação que permitiu sua determinação exata ao longo do ensaio. Como esperado, a proposta de ligação parafusada reduziu as folgas registradas durante o ensaio. Todavia, o acréscimo em termos de capacidade última foi acompanhado por uma maior deterioração das colunas e conectores.

Palavras-chave: Estruturas porta-paletes. Ensaio longarina em balanço. Ligação longarina-coluna. Ligação parafusada. Centro de rotação.

Abstract

In general, beam-to-column connections of steel racks are designed to allow engagement between beams and columns in the storage industry over the years. Due to the increasing use of taller structures, the storage industry has been presenting proposals for bolted joints, although there is still no standardization. This experimental study evaluates the mechanical behavior of a commercial beam-to-column connection to attest to the effects of a front bolt on the connection performance. Based on the results of eight specimens tested in a single cantilever test setup, the bolted joint effects were evaluated in terms of the moment-rotation curve, failure mode, gaps, and center of rotation of the connection. Due to the gaps, determining the center of rotation of the connection required the proposal of a new instrumentation that allowed its exact position throughout the cantilever test. As expected, the proposed bolted connection reduced the gaps recorded during the test. However, the increase in ultimate capacity occurred with greater deterioration of columns and connectors.

Keywords: Steel storage pallet rack. Cantilever test. Beam-to-column connection. Bolted connection. Center of rotation.

* autor correspondente

1 Introdução

Os porta-paletes seletivos (ou simplesmente “racks”) são estruturas largamente utilizadas no mercado por permitir a estocagem de grande quantidade de produtos e por serem prontamente desmontáveis permitindo alterações na logística das indústrias. Tal facilidade é promovida, principalmente, pelas ligações longarina-coluna (em inglês *beam-to-column connection*, BCC) que, frequentemente, é alvo de inovações no mercado, inclusive na previsão do uso de parafusos nas ligações (Dai, Zhao, Rasmussen, 2018; Gusella, Lavacchini, Orlando, 2018; Galeotti et al., 2021).

Configurando como um dos principais elementos do rack, as colunas geralmente são perfis formados a frio de seções mono ou duplamente simétricas com padrões de perfurações que permitem o encaixe das ligações BCC. Projetadas para trabalhar sem a utilização de soldas ou parafusos, a viabilidade das ligações longarina-coluna é promovida, essencialmente, pelos conectores de extremidade (geralmente, laminados) soldados às longarinas e encaixados às colunas por meio de garras (Shah et al., 2016; Dai, Zhao, Rasmussen, 2018; Galeotti et al., 2021). Esta flexibilidade é muito importante para que a montagem das estantes de aço seja feita com facilidade e reduza o tempo de montagem. Portanto, ligações parafusadas ou soldadas são, em geral, evitadas a fim de permitir maior conveniência na montagem e ajuste destas estruturas (Shariati et al., 2018; Dai, Zhao, Rasmussen, 2018).

Visando, também, aumentar a facilidade na estocagem dos materiais, os racks não são contraventados na direção do corredor. A estabilidade do rack, neste caso, fica dependente do desempenho das ligações semirrígidas longarina-coluna e bases dos pilares. Neste sentido, a adoção de parafusos tem sido vista no mercado como alternativa para promover estruturas de maior altura, mais estáveis e/ou de maior capacidade. Dai, Zhao e Rasmussen (2018) avaliaram experimentalmente 21 ligações BCC (incluindo 3 alturas de longarinas, 3 espessuras de coluna, e conectores com 2 ou 3 garras) e atestaram a alteração nos valores de capacidade última e de rigidez das ligações quando são utilizados parafusos. Além disso, a presença do parafuso promove a alteração do modo de falha das ligações. Em geral, as ligações longarina-coluna aparafusadas apresentam maior ductilidade em comparação com as ligações sem parafusos (Dai, Zhao, Rasmussen 2018; Chen et al., 2019) – sem, contudo, apresentar

falha nos parafusos (Dai, Zhao, Rasmussen 2018). Vale destacar que, assim como nas ligações por encaixe, o comportamento mecânico das ligações com uso do parafuso mostra-se, ainda, dependente de parâmetros geométricos da ligação como: a relação entre as espessuras da coluna e do conector de extremidade, altura da longarina, número de garras, entre outros (Zhao et al., 2014; Dai, Zhao, Rasmussen 2018).

Apesar de sua importância, atualmente, as normas vigentes destinadas aos racks, seja a brasileira ABNT NBR 15524-2:2012, a americana ANSI/RMI MH16.1:2012, como a europeia FEM 10.2.02:2001, não apresentam prescrições teóricas para avaliar a capacidade mecânica e/ou a deslocabilidade que a ligação BCC promove ao pórtico. A falta de prescrições é decorrente dos diferentes tipos de projetos de ligações longarina-coluna presentes no mercado. Neste sentido, a fim de avaliarem o comportamento semirrígido das ligações associado ao giro em torno do plano do montante, i.e., ao giro atrelado à deslocabilidade lateral do porta-palete, as normas brasileira ABNT NBR 15524-2:2007 e americana ANSI/RMI MH16.1:2012 recomendam o uso do ensaio da “longarina em balanço/*cantilever test*” e/ou o ensaio “efeito de pórtico/*portal test*”. Ambos os ensaios destinam-se a caracterizar a ligação BCC em termos da curva momento-rotação ($M-\theta$) e da rigidez inicial da ligação. Todavia, tais normas não apresentam, por exemplo, prescrições destinadas à determinação do centro de rotação destas ligações – essencial para a correta modelagem do sistema e, neste caso, de posicionamento não trivial devido aos diferentes projetos de ligação.

Altamente disseminado na área acadêmica e nos escritórios de projeto, o uso de elementos finitos unidimensionais de pórtico vem promovendo a análise estrutural de diversos tipos de estruturas, inclusive o de estruturas porta-paletes (e.g. Branquinho, Vieira Jr. e Malite (2019)). Neste sentido, torna-se essencial o conhecimento do centro de rotação desta ligação, a fim de propiciar a correta modelagem do pórtico, principalmente tendo em vista a elevada deslocabilidade lateral deste tipo de estrutura e as folgas existentes na ligação.

O presente estudo experimental apresenta uma proposta de instrumentação de ensaios BCC do tipo “longarina em balanço/*cantilever test*” que permite avaliar os efeitos da adoção de um parafuso frontal a uma ligação BCC comercial em termos de capacidade última, rigidez, modo de falha, folgas e centro de rotação da ligação.

2 Proposta de instrumentação

Salvo as diferenças entre as instruções de montagem, instrumentação e tratamento de resultados, o objetivo dos ensaios do tipo “longarina em balanço/*cantilever test*” nas normas ABNT NBR 15524-2:2007, ANSI/RMI MH16.1:2012 e FEM 10.2.02:2001 permanece o mesmo: obtenção da curva momento-rotação ($M-\theta$) e da rigidez inicial. De forma geral, o ensaio “longarina em balanço/*cantilever test*” proposto nas normas ABNT NBR 15524-2:2007, ANSI/RMI MH16.1:2012 e FEM 10.2.02:2001 trata-se de: (i) uma coluna curta fixada a um montante ou anteparo rígido apenas em suas extremidades; (ii) uma longarina de pequeno comprimento que deve ser conectada à coluna através de seu conector com suas travas ou pinos de segurança; e, por fim, (iii) uma força gravitacional aplicada na extremidade livre da longarina. A ABNT NBR 15524-2:2007 enfatiza, ainda, que movimentos laterais ou de torção da longarina devem ser evitados.

Visando à determinação da curva $M-\theta$, a instrumentação proposta pelas normas de projeto não é suficiente para a completa caracterização das folgas da ligação e sua influência na determinação do centro de rotação da ligação. O ensaio do tipo “longarina em balanço/*cantilever test*” proposto pela norma americana ANSI/RMI MH16.1:2012 prevê como instrumentação apenas o registro das deflexões verticais, por meio de relógio comparador, no ponto de aplicação da força na longarina. Na norma brasileira ABNT NBR 15524-2:2007 e na norma europeia FEM 10.2.02:2001, por outro lado, é prevista a utilização de dois transdutores próximos ao conector para determinação do giro da longarina – tais esquemas de instrumentação previstos já vêm sendo considerados insuficientes até mesmo para a adequada obtenção da curva $M-\theta$ (Zhao et al., 2014). Neste sentido, Zhao et al. (2014) propõe o esquema de instrumentação mostrado na Figura 1. Com base nesta proposta baseada na medição de 8 deslocamentos, a rotação do sistema pode ser entendida pela rotação relativa da longarina em relação à coluna (θ), como mostra a Equação (1).

$$\theta = \theta_b - \theta_c \quad (1)$$

Na Equação (1), θ_b trata-se da rotação da longarina e θ_c da rotação da coluna. Segundo a metodologia apresentada por Zhao et al. (2014), a rotação da longarina pode ser obtida por meio de transdutores horizontais posicionados o mais próximo

possível dos conectores ou por meio de transdutores de deslocamento verticais como mostra a Figura 1.

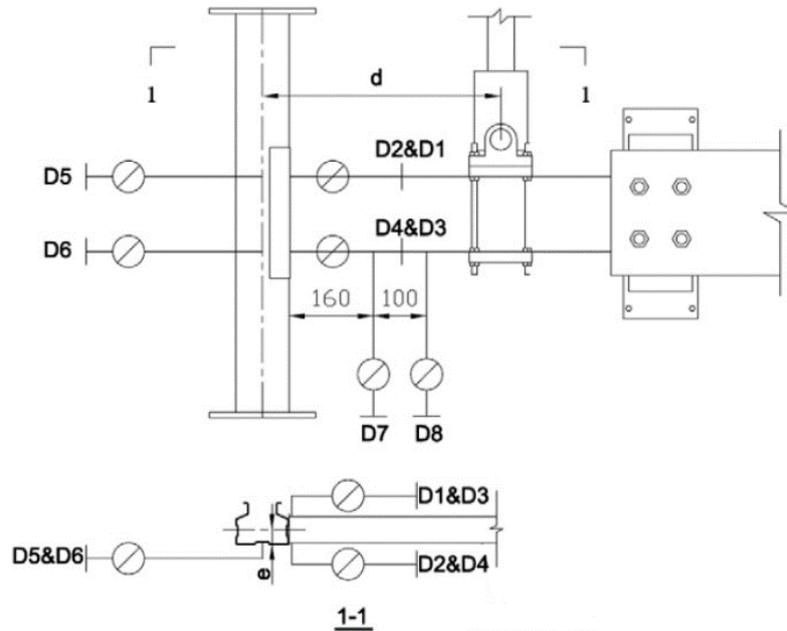


Figura 1 - Instrumentação utilizada por Zhao et al. (2014). Fonte: Zhao et al. (2014).

Por meio dos transdutores da Figura 1, o giro da longarina (θ_b) e da coluna (θ_c) podem ser obtidos por meio das Equações (2) e (3), respectivamente. Nas Equações (2) e (3), D_i trata-se dos deslocamentos obtidos por Zhao et al. (2014), em que i pertence ao intervalo [1,8] e h trata-se da altura da seção transversal da longarina.

$$\theta_b = \frac{1}{2} \left[\frac{D1 - D3}{h} + \frac{D2 - D4}{h} \right] \quad (2)$$

$$\theta_c = \frac{D5 - D6}{h} \quad (3)$$

Além disso, a rotação da viga por meio dos deslocamentos verticais (θ'_b) pode ser calculada a fim de verificar sua correspondência com o valor θ_b como mostra Zhao et al. (2014) por meio da Equação (4).

$$\theta'_b = \frac{D7 - D8}{100} \quad (4)$$

Apesar de similares, Zhao et al. (2014) alertam que os valores de θ'_b são muito próximos dos de θ_b apenas no início do carregamento. Desta forma, os autores concluem que a maneira mais adequada para obter a rotação da longarina é a dada pela Equação (2) visto que tal método evita contabilizar possíveis deformações da longarina.

Neste sentido, a fim de obter dados suficientes para a obtenção da curva $M-\theta$ e para a determinação do centro de rotação da ligação, é proposta a seguinte instrumentação mostrada na Figura 2:

- (i) 1 inclinômetro, posicionado na longarina o mais próximo possível do conector de extremidade, para aferição da rotação da longarina (θ_b) e determinação do centro de rotação do sistema (denominado ponto O);
- (ii) 2 transdutores de deslocamento posicionados na coluna (transdutores de numeração 1 e 2), conforme D5 e D6 de Zhao et al. (2014), para determinação de θ_c por meio da Equação (3). A distância entre os transdutores 1 e 2 foi adotada igual a 200 mm.
- (iii) 2 transdutores de deslocamento posicionados na longarina (um de medição horizontal e um de medição vertical – transdutores de numeração 3 e 4, respectivamente) a fim de promover, apenas, a obtenção do centro de rotação do sistema (ponto O).
- (iv) 1 transdutor de deslocamento posicionado no ponto de aplicação da força, conforme recomendação do ANSI/RMI MH16.1:2012.

Além da instrumentação proposta, a Figura 2 destaca os conectores de extremidade utilizados no estudo: tratam-se de conectores compostos por 5 garras que garantem o encaixe na coluna de forma frontal. Com base nesta instrumentação, a posição do centro de rotação é referenciada a partir do sistema X_{con} e Y_{con} localizado no canto inferior esquerdo do conector (próximo à 5ª garra, como mostra a Figura 2).

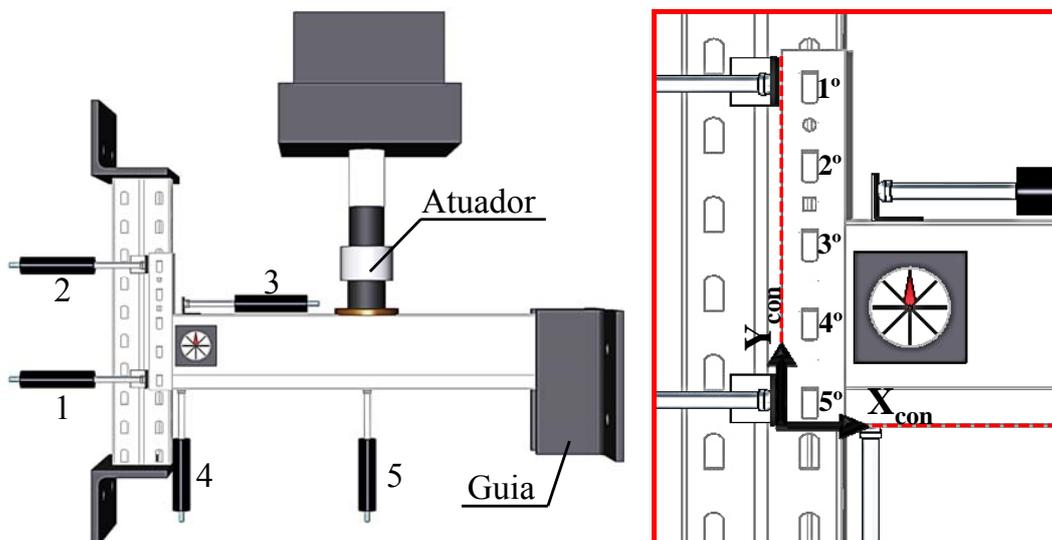
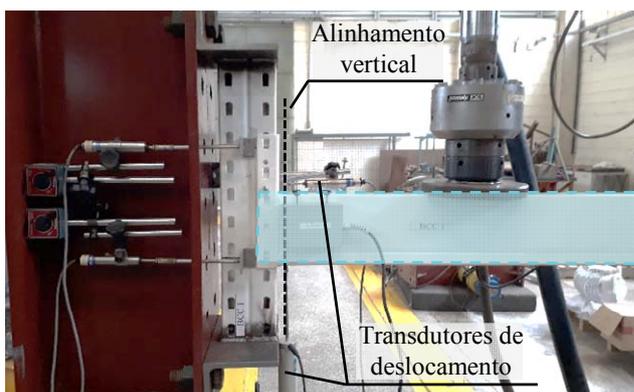
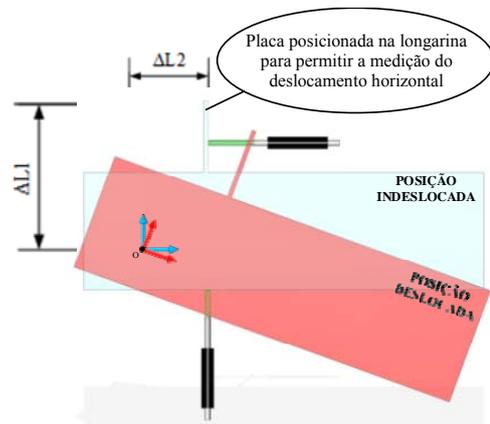


Figura 2 -Instrumentação dos ensaios de ligação BCC.

A Figura 3 mostra a definição do modelo para a obtenção da curva $M-\theta$ e do centro de rotação do sistema a partir do esquema experimental. Nele, considera-se que a região do conector adjacente à longarina forma, com a longarina, um único corpo rígido próximo à ligação. Além disso, assume-se, como hipótese, que os transdutores aplicados na longarina estão próximos o suficiente do conector para que haja apenas um giro de corpo rígido no modelo, i.e., deformações da longarina nesta região não estão sendo contempladas. Ademais, a Figura 3 mostra que o modelo foi definido para o caso em que os pontos de atuação dos transdutores horizontal e vertical (transdutores de numeração 3 e 4 da Figura 2) estão no mesmo alinhamento vertical. Assim, por meio do uso de dois transdutores de deslocamento próximos igualmente do conector de extremidade, e da utilização de um inclinômetro, é possível obter o centro de rotação da ligação que fica definido pelas dimensões $\Delta L1$ e $\Delta L2$.



(a) Ensaio efetuado com a proposta de instrumentação



(b) Modelo definido para determinação do centro de rotação

Figura 3 -Definição do modelo para a determinação do centro de rotação do sistema.

2.1 Determinação do centro de rotação

A Figura 4 mostra as relações trigonométricas determinadas para a obtenção da posição do centro de rotação (ponto O) definido pelas dimensões $\Delta L1$ e $\Delta L2$. Segundo a Figura 4, para a determinação do ponto O são necessários o conhecimento dos seguintes parâmetros: a posição em que o transdutor horizontal é posicionado (definida pela dimensão vertical d) e os valores das medições provenientes dos transdutores horizontal, vertical e do inclinômetro (x , y e α , respectivamente). A partir das relações trigonométricas definidas por meio dos triângulos ΔBCD , ΔOAB , ΔEFG e ΔOGH , a posição do centro de rotação pode ser determinada como segue.

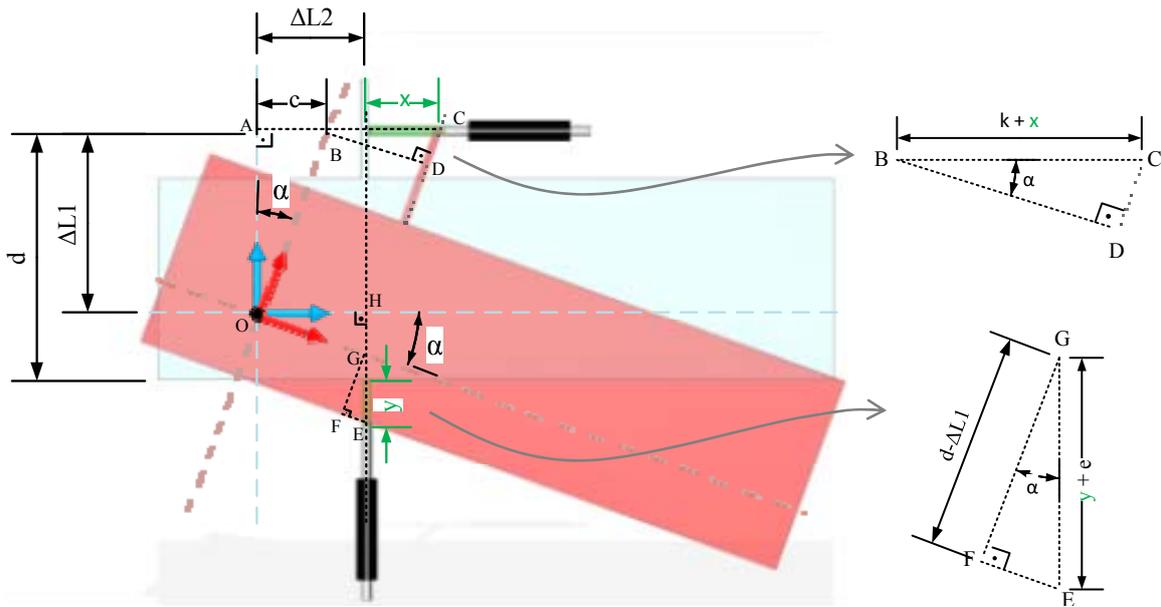


Figura 4 - Relações trigonométricas definidas para a obtenção do centro de rotação.

Dos $\triangle BCD$ e $\triangle OAB$ apresentados na Figura 4, obtém-se as relações trigonométricas apresentadas nas Equações (5) e (6), respectivamente:

$$\cos \alpha = \frac{\Delta L2}{k + x} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c}{\Delta L1} \quad (6)$$

A Figura 4 mostra que $\Delta L2$ pode ser obtido pela soma de k e c . Desta forma, a partir da Equação (6), k pode ser escrito como:

$$k = \Delta L2 - \operatorname{tg} \alpha \Delta L1 \quad (7)$$

Aplicando a Equação (7) em (5), tem-se:

$$\cos \alpha = \frac{\Delta L2}{\Delta L2 - \operatorname{tg} \alpha \Delta L1 + x} \quad (8)$$

A Equação (8) mostra que a posição do centro de rotação O , definida por $\Delta L1$ e $\Delta L2$, é dependente apenas dos parâmetros de entrada já definidos (x e α). Visto que há duas incógnitas e apenas uma equação, as seguintes relações trigonométricas foram definidas nos triângulos $\triangle EFG$ e $\triangle OGH$ como mostram as Equações (9) e (10), respectivamente.

$$\cos \alpha = \frac{d - \Delta L1}{y + e} \rightarrow e = \frac{d - \Delta L1}{\cos \alpha} - y \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d - \Delta L1 - e}{\Delta L2} \quad (10)$$

Aplicando a definição de e da Equação (9) na Equação (10), obtém-se:

$$tg\alpha = \frac{d - \Delta L1 - \frac{d - \Delta L1}{\cos\alpha} + y}{\Delta L2} \quad (11)$$

Note que, a Equação (11) é válida para $\frac{d - \Delta L1}{\cos\alpha} > y$ e $\frac{d - \Delta L1}{\cos\alpha} < y$ (neste último caso, as relações definidas no ΔEFG e ΔOGH devem ser reformuladas). Tal como a Equação (8), a Equação (11) relaciona a posição do centro de rotação apenas com os parâmetros de entrada do modelo (no caso: d , y e α). A partir da resolução do sistema linear definido pelas Equações (8) e (11), a posição do centro de rotação fica definida pelas relações mostradas nas Equações (12) e (13):

$$\Delta L1 = \frac{-2d - y + (d + y)\cos\alpha + d\sec\alpha + xsen\alpha}{2(-1 + \sec\alpha)} \quad (12)$$

$$\Delta L2 = \frac{1}{2} \left[y \cot\alpha + \cos\alpha \left(x + (d + y)\cot\alpha \right) - d \csc\alpha \right] \quad (13)$$

Válidas para quaisquer valores de inclinação α , as Equações (12) e (13) são as soluções exatas para a posição do centro de rotação.

3 Análise experimental

Os ensaios de ligação longarina-coluna (BCC) foram realizados no Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) como mostra a Figura 6. Os modelos são compostos por um trecho de coluna de 500 mm e um trecho de longarina de 750 mm soldada ao conector de extremidade, ora à direita, ora à esquerda.

As normas de projeto divergem acerca da determinação do comprimento da longarina a ser adotado no ensaio, variando os valores entre 400 e 610 mm. No presente estudo, o valor de 355 mm foi escolhido para a distância entre a coluna e o atuador servo-hidráulico por meio de um estudo numérico efetuado por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software* Abaqus, como apresentado em Branquinho (2021). Branquinho (2021) desenvolveu análises do rack na direção do corredor utilizando EFs de pórtico com as seções transversais de coluna e longarina adotadas no presente estudo visando avaliar os valores da razão momento/cortante atuantes no pórtico em todas as extremidades das longarinas para racks com 5 baias e 5 níveis e 10 baias e 4 níveis. Em ambos os estudos, Branquinho (2021) constatou que não houve observações de razão

M/V com valores acima de 400 mm. Além disso, para a faixa usual de valores de rigidez da ligação BCC – de 150 a 600 kN.m/rad – os valores de M/V foram aquém de 300 mm. Assim, tendo em vista a razão momento/cortante pode ser entendida como a distância da coluna e o ponto de aplicação da carga, foi adotado o valor de 355 mm, levando ao comprimento de 750 mm para a longarina. Este valor é próximo de 400 mm, recomendado pelas normas de projeto, e praticável no Laboratório de Estruturas Professor Dante Martinelli (LE) do Departamento de Engenharia de Estruturas devido às limitações do pórtico de reação.

A Figura 5 mostra as seções transversais da coluna e longarina e o tipo de conector adotado. Além da ligação efetuada por encaixe, em todas as montagens (8 ensaios), é prevista a utilização de um pino de segurança, como mostrado nas Figuras 5 e 6. Visando avaliar os eventuais ganhos promovidos pelo uso do parafuso, em metade dos ensaios (4 ensaios), foi adotado também o uso de um parafuso frontal de diâmetro nominal 5/16" posicionado entre a 1ª e a 2ª garra, como mostrado nas Figuras 5 e 6. Os ensaios desenvolvidos apenas com o pino de segurança foram denominados "controle", enquanto que as amostras conectadas com o pino e também com o uso de um parafuso frontal foram identificados com a letra "C" na descrição do modelo. Foram ensaiadas 4 amostras de longarinas com conector soldado à direita e 4 longarinas com conector soldado à esquerda (Figura 6). Em ambos os casos, foram definidos 2 modelos considerando somente pinos e 2 com pino e parafuso. Os ensaios cujas longarinas foram soldadas à direita foram denominados por "B". Assim, o ensaio BCC 2C-B mostrado na Figura 6 trata-se do segundo ensaio realizado com longarinas soldadas à direita (B) e com o parafuso frontal (C).

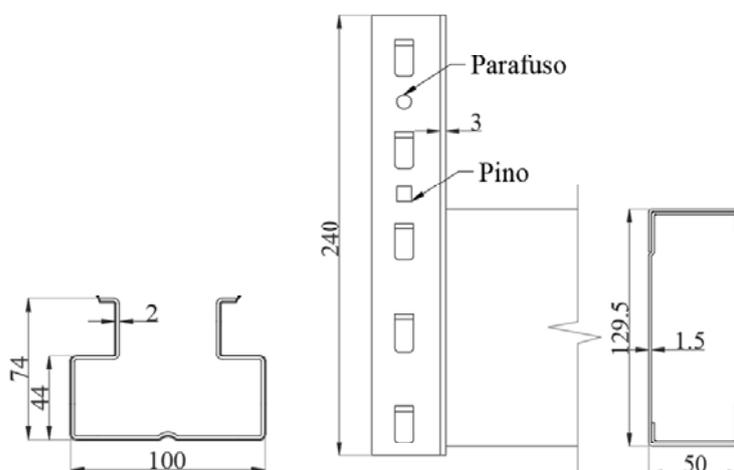


Figura 5 - Perfis utilizados. Dimensões em milímetros. Material: aço CIVIL 300 (valores nominais: $f_y = 300$ MPa e $f_u = 400$ MPa).



(a) Ensaio BCC 2 com longarina soldada à esquerda.



(b) Ensaio BCC 2C-B com longarina soldada à direita.

Figura 6 - Ensaios BCC realizados com e sem parafuso frontal.

Como apresentado na Figura 2 e na Figura 6, movimentos laterais ou de torção da extremidade livre da longarina foram evitados por meio da guia posicionada no pórtico de reação que restringe o movimento da longarina apenas na direção do carregamento, atendendo às prescrições da norma brasileira ABNT NBR 15524-2:2007. O carregamento foi aplicado a 355 mm da coluna por um atuador servo-hidráulico de capacidade 100 kN com controle de deslocamento a uma taxa de 0,01 a 0,04 mm/s e capacidade de deslocamento do pistão de 40 cm.

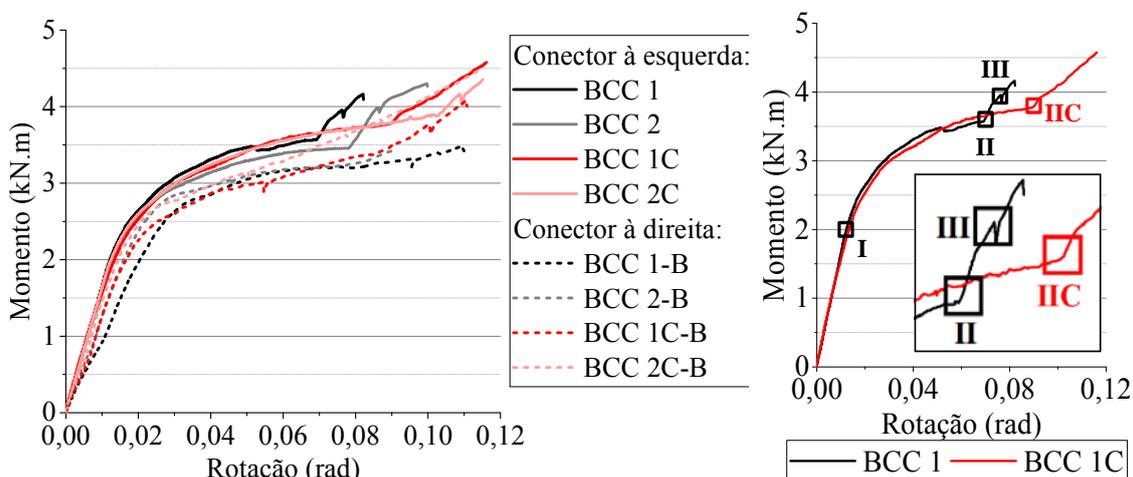
4 Análise dos resultados e discussões

Como não foram observadas diferenças significativas entre os ensaios efetuados com o conector à direita ou à esquerda, a presente seção discute o efeito da presença do

parafuso frontal em termos do diagrama momento-rotação, rigidez inicial e folgas da ligação, avaliadas por meio da posição do centro de rotação do sistema.

4.1 Curva $M-\theta$ e rigidez inicial

A Figura 7 apresenta o comportamento mecânico da ligação em termos da curva $M-\theta$.



(a) Comparação entre os diagramas momento-rotação. (b) Mecanismos de falha.

Figura 7 - Reunião dos ensaios BCC.

A Figura 7a mostra que a repetitividade dos ensaios com o parafuso frontal (amostras BCC 1C, BCC 2C, BCC 1C-B e BCC 2C-B) é similar à observada nos ensaios somente com o pino de segurança (BCC 1, BCC 2, BCC 1-B e BCC 2-B). Em todos os casos, a Figura 7a mostra que, com ou sem a adoção de parafuso central, as folgas das ligações não são diretamente detectáveis por meio da curva $M-\theta$. Vale lembrar que, Zhao et al. (2014) relataram que a existência de folgas poderia alterar o trecho inicial das curvas $M-\theta$. A Tabela 1 mostra o resumo dos resultados de rigidez inicial, obtida pelo método das áreas iguais da EN 15512 (CEN, 2009), e de capacidade última em consonância às conclusões de Zhao et al. (2014).

Tabela 1 - Resultados das amostras ensaiadas.

Amostra		Rigidez inicial (kN.m/rad)	Capacidade última (kN.m)
Amostras ensaiadas apenas com pino de segurança	BCC 1	164,50	3,57
	BCC 2	161,80	3,46
	BCC 1-B	98,00	3,21
	BCC 2-B	125,00	2,98
Amostras ensaiadas com pino de segurança e parafuso frontal	BCC 1C	162,00	3,79
	BCC 2C	162,00	3,94
	BCC 1C-B	122,00	2,94
	BCC 2C-B	145,00	3,08

Fonte: próprio autor.

A Tabela 1 mostra que a presença do parafuso frontal não altera significativamente a rigidez inicial do sistema, mas lhe garante uma capacidade última um pouco superior. Em comparação, a média dos valores de capacidade última do grupo controle é de 3,31 kN.m frente ao valor médio de 3,44 kN.m das amostras com parafuso frontal – acréscimo de aproximadamente 4%. Quanto aos modos de falha das amostras com parafuso e às do grupo controle, ambos podem ser classificados como um modo de distorção e ruptura provocada por rasgamento do conector e/ou da coluna na região dos furos – porém, com maior ductilidade atestada nas ligações com parafuso. Como mostrado pela Figura 7b, o que muda é como essa ruína se desenvolve. A Figura 7b apresenta, em detalhe, as características das curvas momento-rotação típicas de ensaios efetuados somente com o pino ou com o parafuso frontal. Como esperado, as diferenças entre os mecanismos de falha dos ensaios com parafuso frontal em comparação ao grupo controle estão relacionadas às diferenças no comportamento dos diagramas momento-rotação observadas na Figura 7b, em especial, a partir do regime elástico.

Para os ensaios desenvolvidos somente com o pino de segurança (BCC 1, BCC 2, BCC 1-B e BCC 2-B), a Figura 7b mostra que a primeira mudança de comportamento da curva momento-rotação, ponto I, ocorre em função do início da distorção e do rasgamento do 3º furo, que é o furo mais próximo da posição do pino de segurança – a numeração dos furos pode ser observada na Figura 2. Este comportamento segue até o ponto II, ponto que foi adotado como estágio de ruptura, referente, portanto, ao momento último mostrado na Tabela 1. O ponto II caracteriza o início do rasgamento do 2º furo. A partir do ponto II, o sistema segue até o início do rasgamento do 1º furo (ponto III). Nota-se, portanto, que dada uma falha, os esforços se redistribuem até mobilizar a falha de outro mecanismo. Porém, a partir do ponto II, entende-se que o estágio de ruína já caracteriza a falha da estrutura.

Para o grupo com o parafuso frontal (BCC 1C, BCC 2C, BCC 1C-B e BCC 2C-B), a falha no ponto I é similar, porém acompanhada com a fissuração também do 2º furo – menos pronunciada que a do 3º, porém presente – e de uma deformação local do conector mais pronunciada. Estes fenômenos ocorrem, principalmente, devido à concentração de tensão extra provocada na região do 2º furo por meio do parafuso frontal. Deste ponto, o sistema segue até a falha (ponto IIC). No ponto IIC, o diagrama momento-rotação sofre uma mudança abrupta ascendente, diferentemente do comportamento serrilhado do grupo

controle característico dos sucessivos rasgamentos. O ponto IIC marca o início da mobilização da capacidade resistente do parafuso. Isto é, a partir de IIC, o sistema apresenta um acréscimo de capacidade devido à resistência ao cisalhamento mobilizada pelo parafuso frontal. Foi observado, inclusive, no modelo BCC 1C e.g., o início do esmagamento do conector na região do furo em que foi posicionado o parafuso.

4.2 Modo de falha

A Figura 8 mostra o modo de falha observado nas amostras controle e com parafuso frontal para os modelos com a longarina soldada à esquerda. A falha de BCC 1 e BCC 2 ocorreu por distorção do conector somada à ruptura do conector, primeiramente, na posição do 3º furo, depois no 2º, e, finalmente, no 1º furo. Por outro lado, a falha dos modelos BCC 1C e BCC 2C ocorrem em função da concentração de tensão extra provocada na região do 2º furo por meio do parafuso frontal. A Figura 9 mostra a diferença na deformação do conector em função da presença do parafuso e a Figura 10 apresenta mais detalhes destes modos de falha, indicando, inclusive, que os rasgamentos observados no conector (Figura 8) também ocorrem nos furos da coluna.

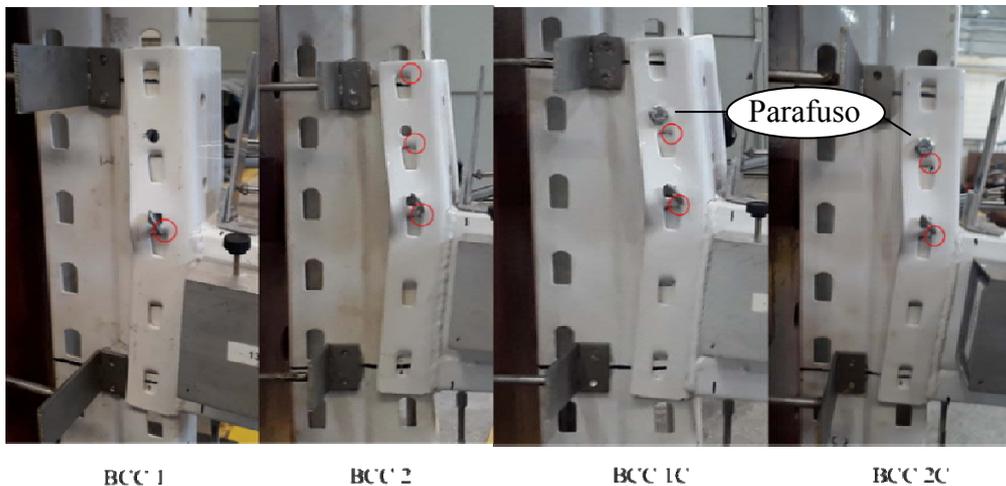


Figura 8 - Comparação entre falha das amostras sem e com parafuso frontal.



Figura 9 - Comparação entre as deformadas das amostras sem e com parafuso frontal.

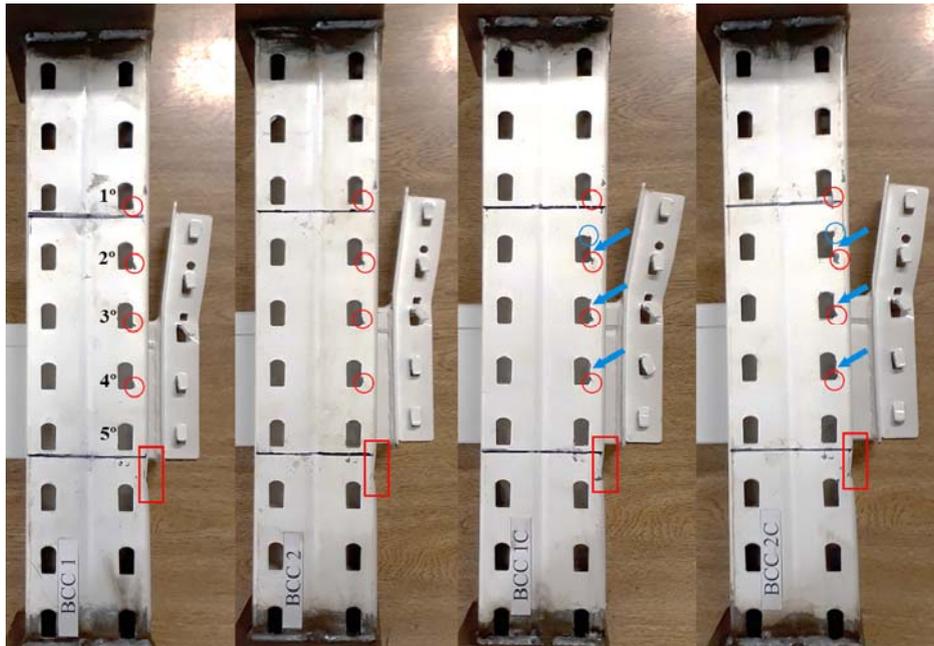


Figura 10 - Detalhe para a falha nas colunas.

Na Figura 10, são indicados com círculos as regiões de rasgamento de furos, com setas os esmagamentos, e com retângulos a deformação localizada provocada pelo contato entre o conector e a coluna. Além disso, em vermelho são características observadas em todas as amostras, enquanto que, em azul, são falhas observadas somente nas amostras com parafuso frontal. É importante ressaltar não houve falha dos parafusos e nem nos pinos de segurança em nenhum dos ensaios, como mostra a Figura 11 para as amostras BCC 1C e BCC 2C. Na BCC 2C nota-se furos com sinais de aperto do parafuso enquanto que em BCC 1C observa-se um início de esmagamento do furo – em ambas as amostras os pinos mostram-se intactos, e os parafusos em bom estado.



(a) Detalhe para o furo após a retirada do parafuso.

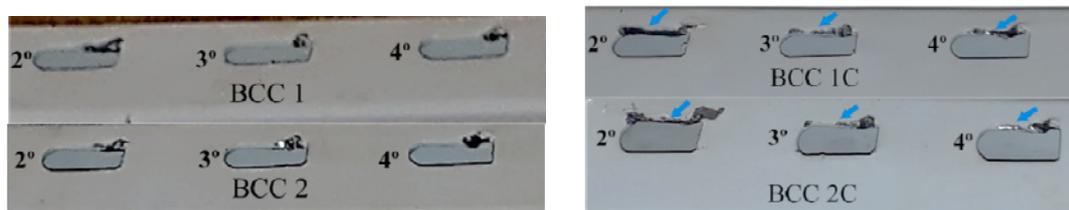


(b) Estado do parafuso e pino de segurança.

Figura 11 - Detalhe para os furos e para os parafusos e pinos de segurança pós ensaio das amostras BCC 1C e BCC 2C.

Os esmagamentos apontados na Figura 10 (setas em azul) são destacados na Figura 12. Para as amostras controle, os esmagamentos são causados pelo contato entre as garras do conector e os furos das colunas. Em contrapartida, os esmagamentos mais pronunciados são observados nas amostras BCC 1C e BCC 2C, ocasionados, principalmente, pela restrição

extra imposta pelo parafuso frontal. Isto é, nota-se que, a falha das ligações propostas com o uso do parafuso frontal, representada por BCC 1C e BCC 2C na Figura 12, promove mais danos às colunas que as falhas em ligações compostas apenas por pinos.



(a) Somente pino.

(b) Com parafuso frontal.

Figura 12 - Esmagamentos observados nas amostras.

Por fim, por meio do ensaio do líquido penetrante (ABNT NBR NM 334:2012) foi possível verificar possíveis fissurações na região soldada longarina-conector a fim de atestar a validade da hipótese da Figura 3 sobre o conector e a longarina serem considerados um corpo único. A Figura 13 mostra que a falha de todas as amostras foi também acompanhada da fissuração do cordão de solda entre o conector e a longarina na região em que há a descontinuidade da solda. Trata-se de uma fissuração da interface solda-conector que não afetou significativamente o comportamento mecânico da ligação visto que as curvas momento-rotação das amostras BCC 1C (com fissuras) e BCC 2C (apenas com o início da fissuração) são praticamente coincidentes. Isto é, conclui-se que o início de fissuração observado pelo manchamento apresentado na Figura 13 não é suficiente para descumprir a hipótese adotada na Figura 3.



Figura 13 - Resultados ensaio de líquido penetrante.

4.3 Centro de rotação

Utilizando as Equações (12) e (13), a posição do centro de rotação (ponto O) é avaliada em relação ao sistema coordenado definido por X_{con} e Y_{con} na Figura 2, e tais resultados são apresentados na Figura 14 e na Figura 15 juntamente com a projeção do conector e da longarina em linha tracejada. A comparação da posição do centro de rotação com o conector e a longarina, em especial, com os furos do conector, facilita a compreensão de como ocorre as mudanças do posicionamento do centro de rotação ao longo do ensaio devido, principalmente, às folgas da ligação.

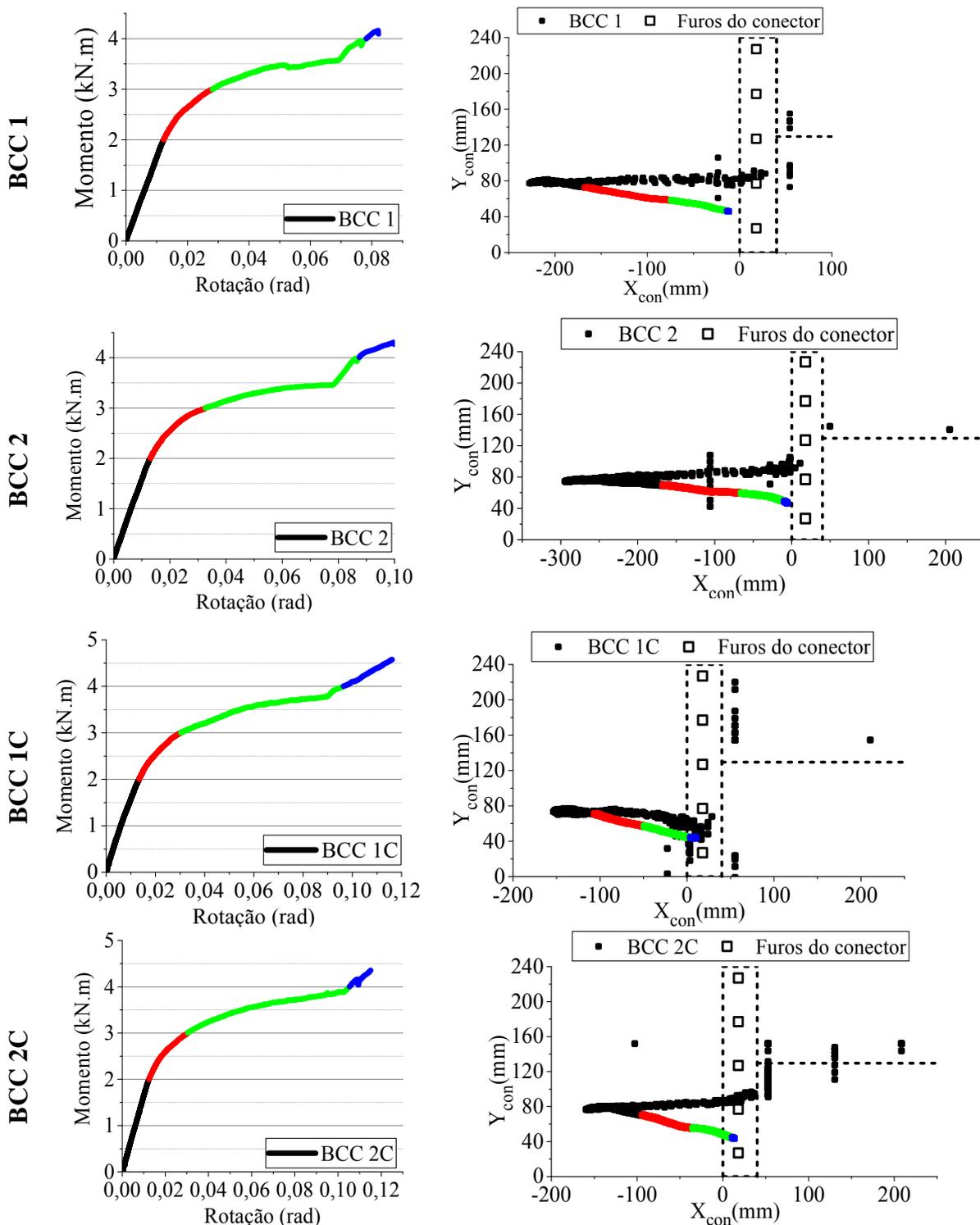


Figura 14 - Análises do centro de rotação para os ensaios com a longarina soldada à esquerda. Para cada amostra, as cores adotadas nos gráficos X_{con} versus Y_{con} são referentes às cores da sua respectiva curva Momento versus Rotação.

Como esperado, a posição do centro de rotação da ligação altera-se em virtude do comportamento mecânico do sistema durante o ensaio. Em seu primeiro estágio de carregamento, o modelo experimental tende a eliminar suas folgas e a se deslocar

verticalmente como um corpo rígido. Nesta etapa, observa-se na Figura 14 e na Figura 15, pontos (de cor preta) mais esparsos. Após este estágio, o centro de rotação (ponto O) se desloca até atingir sua posição final definida pela falha do modelo que, em todos os ensaios, ocorreu entre o 4º e o 5º furo do conector.

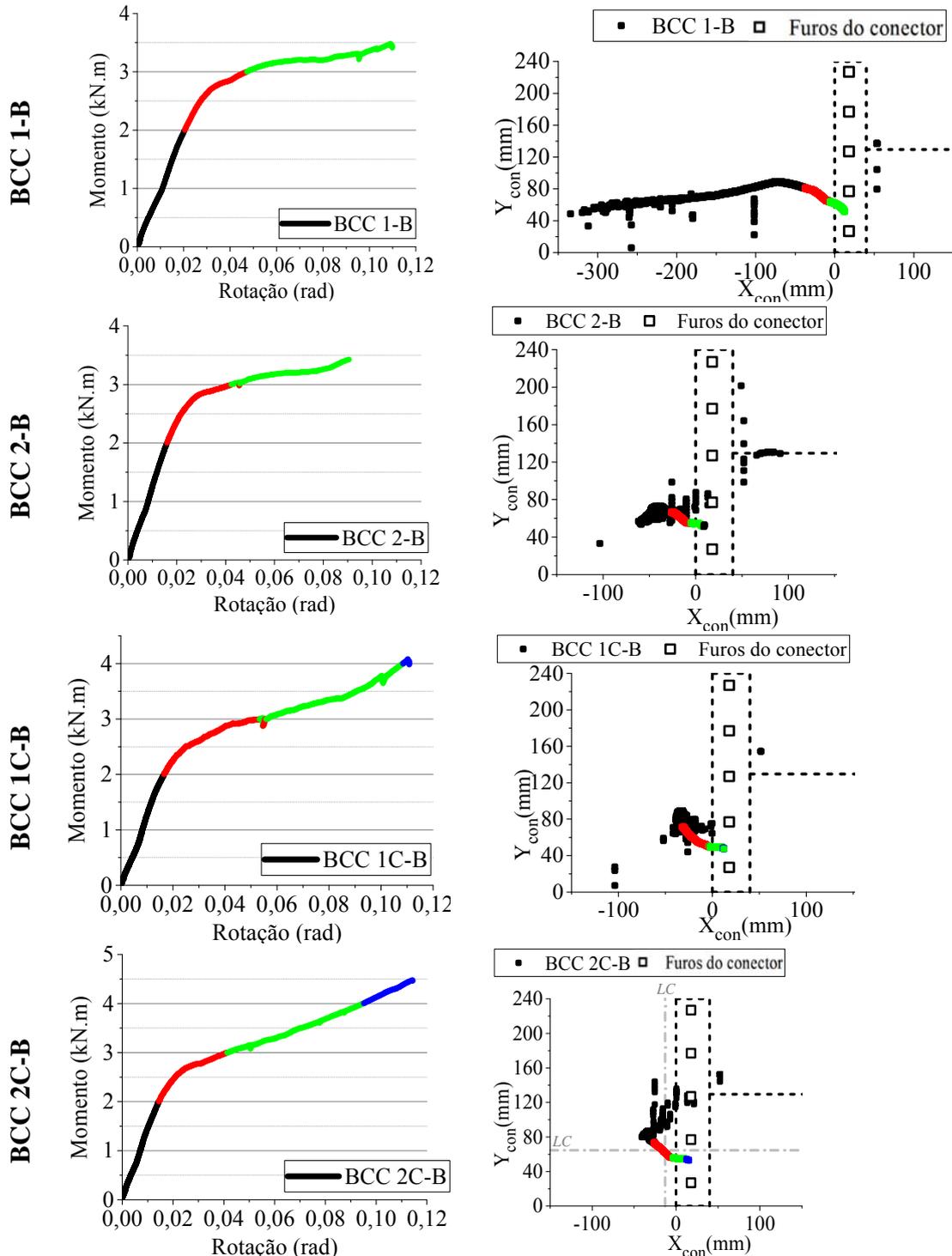


Figura 15 - Análises do centro de rotação para os ensaios com a longarina soldada à direita. Para cada amostra, as cores adotadas nos gráficos X_{con} versus Y_{con} são referentes às cores da sua respectiva curva Momento versus Rotação.

Em termos de modelagem numérica, nota-se que a adoção de um centro de rotação único como a intersecção entre as linhas de centro (LC) da coluna e longarina, como mostra o caso BCC2C-B na Figura 15, de fato, trata-se de uma simplificação adequada. Com exceção dos estágios iniciais do ensaio, em que há a acomodação do modelo e supressão das folgas, em todos os modelos a transição do regime elástico para o plástico e o trecho já no regime plástico (trechos em vermelho e verde claro, respectivamente) situam-se próximos da intersecção entre as linhas de centro (LC) da coluna e longarina.

Como esperado, a Figura 14 e a Figura 15 mostram que o comportamento da posição do centro de rotação dos modelos apenas com o pino de segurança é caracterizado por uma folga maior do sistema nas ligações BCC controle. Ou seja, comparativamente aos resultados com parafuso, mais estágios de carregamento são necessários nos modelos controle até que a posição do centro de rotação fique próxima de seu estágio final.

5 Conclusões

Com base nos resultados apresentados, nota-se que o ganho proporcionado pela adoção do parafuso frontal, neste projeto de ligação, não foi determinante para o comportamento do sistema até sua falha – convencionalmente adotada pelo ponto II. A maior contribuição da adoção do parafuso se faz a partir do ponto IIC, estágio em que o parafuso passa a representar grande parte da capacidade resistente do sistema. Em contrapartida, esse ganho de resistência pós-falha provoca maiores deteriorações na integridade das colunas (como mostrado em detalhe pela Figura 12), além de anular a possibilidade da estrutura ser prontamente desmontável (uma das principais vantagens deste sistema).

Além disso, a proposta de instrumentação atrelada às Equações (12) e (13) mostra-se promissora pois configura-se como uma instrumentação simples e que, associada à análise da curva $M-\theta$, proporciona mais informações sobre a ligação BCC, como a avaliação das folgas da ligação.

6 Agradecimentos

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, financiamento

concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), nº processo 140485/2017-4 e, apoio da empresa NSF Tecnologia em Instalações Comerciais de São Carlos-SP com doações do material para ensaio.

7 Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15524-2: Sistemas de armazenagem. Parte 2: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 334: Ensaio não destrutivo – Líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- BRANQUINHO, M.A. **Análise de estabilidade e dimensionamento de porta-paletes seletivos com base no método da análise direta**. 2021. 368 p. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.
- BRANQUINHO, M.A., VIEIRA JR., L.C.M., MALITE, M. Stability analysis of unbraced steel storage racks: discussions and alternatives. In: SSRC ANNUAL STABILITY CONFERENCE, 2019, Saint Louis, Missouri, USA, **Proceedings...Missouri**, 2019.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). **EN 15512: Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design**. Brussels, 2009.
- CHEN, C., SHI, L., SHARIATI, M., TOGHROLI, A., MOHAMAD, E.T., BUI, D.T., KHORAMI, M. Behavior of steel storage pallet racking connection - A review. **Steel and Composite Structures**, v. 30, n. 5, p. 457-469, 2019.
- DAI, L., ZHAO, X., RASMUSSEN, K.J.R. Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. **Thin-Walled Structures**, v. 124, p. 202-217, 2018
- FEDERATION EUROPEENNE DE LA MANUTENTION (FEM). 10.2.02. Section X. **The design of static steel pallet racking**, Racking Design Code, 2001.
- GALEOTTI, C., GUSELLA, F., ORLANDO, M., SPINELLI, P. On the seismic response of steel storage pallet racks with selective addition of bolted joints. **Structures**, v.34, 2021.
- GUSELLA, F., LAVANCCHINI, G., ORLANDO, M. Monotonic and cyclic tests on beam-column joints of industrial pallet racks. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 140, p. 92-107, 2018.
- RACK MANUFACTURERS INSTITUTE (RMI). MH16.1. **Specification for the Design, testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks**. Charlotte (USA): Rack Manufacturers Institute, 2012.
- SHAH, S.N.R., SULONG, N.H.R., JUMAAT, M.Z., SHARIATI, M. State-of-the-art review on the design and performance of steel pallet rack connections, **Engineering Failure Analysis**, v. 66, p. 240-258, 2016.
- ZHAO, X., WANG, T., CHEN, Y., SIVAKUMARAN, K.S. Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections, **Journal of Constructional Steel Research**, v.99, p. 161-175, 2014.