

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/328768259>

# Comportamento termoestructural de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio

Article · November 2018

CITATION

1

READS

61

3 authors, including:



Jorge Munaíar Neto

University of São Paulo

66 PUBLICATIONS 93 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Yagho Simões

University of São Paulo

23 PUBLICATIONS 22 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Avaliação do comportamento das chuvas no estado da Bahia, Brasil [View project](#)



Structures in fire [View project](#)

## Comportamento termoestructural de pilares mistos de aço e concreto em situação de incêndio

Thermo-structural behavior partially encased steel and concrete composite columns in a fire situation

Mariana Lavagnolli Rossi (1); Yagho de Souza Simões (2); Jorge Munaiar Neto (3)

(1) Mestranda, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos (USP)

(2) Doutorado, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos (USP)

(3) Professor Doutor, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos (USP)

Departamento de Engenharia de Estruturas - Av. Trabalhador São-carlense, 400 / São Carlos - SP / Brasil

### Resumo

Sobre os pilares mistos de aço e concreto em elevadas temperaturas, os códigos normativos atuais como a norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, já contemplam a ação do fogo, considerando os elementos isolados com aquecimento em suas quatro faces. Apesar disso, a estrutura circundante que fornece apoio aos pilares não é levada em consideração no seu dimensionamento o que pode tornar as estruturas antieconômicas. Os ensaios experimentais representam de forma mais próxima o comportamento das estruturas na realidade, porém seu custo operacional é elevado o que pode comprometer a sua exequibilidade. Diante do exposto, é crescente o desenvolvimento de estudos na área de modelagem numérica que tem se mostrado mais viável, e, além do mais, apresenta resultados satisfatórios. A partir disso, este trabalho tem como objetivo estudar o desempenho de pilares mistos de aço e concreto isolados considerando o efeito da restrição térmica nas extremidades, submetidas a elevadas temperaturas através de modelagens numéricas com a utilização do código computacional ABAQUS. De forma complementar, um conjunto de análises paramétricas com o modelo validado também foi desenvolvido, visando avaliar parâmetros como a influência do nível de restrição térmica e o nível de carga aplicado na resistência ao fogo do elemento estrutural. Os resultados apontam que o nível de carga influencia diretamente a resistência ao fogo do pilar, de forma que quanto maior o carregamento aplicado, menor é o tempo crítico obtido. Por outro lado, o nível de restrição axial e rotacional não interfere significativamente na resistência ao fogo do pilar, pois o tempo e a temperatura críticos pouco variaram quando houve a alteração dessas grandezas.

*Palavra-Chave: Pilares Mistos, Aço, Concreto, Modelagem Numérica, Fogo*

### Abstract

In respect of steel-concrete columns under high temperatures, the normative codes such as the Brazilian norm ABNT NBR 14323: 2013, already include the action of the fire, considering isolated elements with heating in its four faces. Otherwise, the surrounding structure that provides support to the pillars is not taken into account in its design, which can lead to non-optimal structures. Experimental tests represent in a more precisely way the behavior of structures in reality, but they have an elevate operational cost, which may compromise their feasibility. Under those circumstances, one can remark the increase of studies in the numerical modeling field, which can be considered more viable, and, furthermore, presents satisfactory results. Hence, this research aims to develop a study on the performance of steel-concrete columns under fire situation taking into account the effect of the thermal restriction on the extremities, through numerical modeling using ABAQUS computational code. In addition, a set of parametric analyzes with the validated model was also developed, aiming to evaluate parameters such as the influence of the thermal restriction level and the level of the applied load on the fire resistance of the structural element. The results indicate that the load factor directly influences the column fire resistance, in a way the higher the load applied is, the lower is the critical time obtained. On the other hand, the level of axial and rotational restriction does not significantly influence in the fire resistance of the column, since the critical time and temperature did not change when these values were changed.

*Keywords: Steel-concrete columns, Steel, Concrete, Numerical Modeling, Fire*

## 1 Introdução

Uma das vantagens da utilização das estruturas mistas de aço e concreto é a sua boa resistência ao fogo. Segundo Correia e Rodrigues (2011), o concreto, por possuir menor condutividade térmica que o aço, ao se unir ao mesmo tende a aumentar a resistência ao fogo pois age como revestimento, além de contribuir estruturalmente. O aço, por sua vez, reduz os efeitos de fissuração e *spalling* do concreto.

Este tipo de concepção estrutural surgiu no século XIX com a utilização do concreto apenas para combate ao fogo e à corrosão. A seção era completa ou parcialmente revestida usando muitas vezes concretos de baixa resistência e desprezando a resistência adicional que o concreto conferia a seção. Somente a partir do século XX, as estruturas mistas de aço e concreto passaram a ser dimensionadas de forma que ambos os materiais passassem a resistir juntos aos esforços atuantes, razão pela qual no contexto desta pesquisa será realizado um estudo em face do comportamento de pilares mistos parcialmente revestidos (Rocha, 2012)..

As normas vigentes que abordam o dimensionamento de estruturas mistas em situação de incêndio, em especial a norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, assim como o EUROCODE 4 Parte 1-2 (2005), tratam apenas dos pilares com distribuição uniforme da temperatura na seção transversal.

Além disso, os pilares, sejam isolados ou inseridos em paredes, fazem parte de uma estrutura global, de modo que interagem com as vigas ou lajes que podem estar apoiados sobre eles. Portanto, durante um incêndio, naturalmente esse elemento tende a se deformar, mas o restante da estrutura impõe restrições térmicas a essa deformação, o que promove o aparecimento de esforços adicionais aos pilares que podem afetar a estabilidade dos mesmos, alterando a sua resistência ao fogo.

Basicamente, são dois os tipos de restrição térmica: a *restrição axial*, que impõe certo impedimento à deformação longitudinal do pilar, acarretando no aumento de suas forças axiais, e aquela responsável por impedir parcialmente o giro nas extremidades do mesmo, nomeada de *restrição rotacional*, que promove o aparecimento de momentos fletores. Correia (2011) e Bubach (2016) afirmam que ambas restrições possuem efeitos contrários na resistência ao fogo de pilares, de modo que a restrição axial age de forma a diminuir essa mesma resistência, enquanto a rotacional tende a aumentá-la.

Portanto, necessita-se de estudos científicos, sejam eles numéricos, experimentais e analíticos, para verificar os impactos das questões citadas no comportamento de pilares. As pesquisas com relação a incêndio em estruturas no Brasil, especificamente, para pilares mistos parcialmente revestidos, são escassas, e, por conseguinte, ainda há lacunas que precisam ser estudadas principalmente no que diz respeito aos elementos estruturais restringidos e com gradientes térmicos na seção transversal.

Huang et al. (2007) ensaiaram pilares mistos isolados parcialmente revestidos considerando apenas restrição axial (com níveis variados) nas extremidades e com aquecimento nas quatro faces. Os autores concluíram que o colapso dos mesmos ocorreu por instabilidade global e que a restrição axial aumentou a força compressiva, o que diminuiu a resistência ao fogo. Além disso, outro fenômeno que também ajudou nessa diminuição foi o *spalling* no concreto. Em 2008, os autores realizaram outra modelagem numérica com o intuito de avaliar a influência do nível de carga aplicado no pilar misto e

das dimensões da seção transversal. Os resultados apontam que para altos níveis de carga, seções com dimensões pequenas apresentam resistência ao fogo diferente daquela fornecida pelo Eurocode 4 Parte 1-2.

Correia e Rodrigues (2011) realizou um estudo experimental de pilares metálicos parcialmente revestidos com concreto. Os autores propuseram um novo conjunto experimental que possibilitou levar em consideração o efeito da estrutura circundante no comportamento de pilares em situação de incêndio, a partir da criação de uma estrutura de restrição com rigidez variável. Foi constatado que o nível de carregamento é parâmetro que mais influenciou a redução da resistência ao fogo, uma vez que, com o seu aumento sucedeu numa diminuição da resistência ao fogo dos pilares.

Ellobody (2013) realizou um estudo numérico de pilares revestidos em situação de incêndio, variando os níveis de carga, a rigidez axial, as dimensões da seção transversal e o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto. O estudo concluiu que os pilares mistos sem restrição axial apresentaram um colapso brusco, diferentemente daqueles com restrição térmica, que apresentaram no gráfico “força de restrição x tempo”, um ramo descendente mais suave.

Além disso, Huang et al. (2015) verificou que a relação de excentricidade da carga aplicada e a forma do perfil de aço tem pouca influência sobre a resistência ao fogo dos pilares mistos revestidos. Esse estudo ainda propôs um método simplificado, a partir da análise paramétrica realizada pela modelagem numérica, para determinar a resistência ao fogo dos pilares.

Portanto, de modo a avaliar o comportamento térmico e termoestructural dos pilares mistos de aço e concreto sujeitos as restrições térmicas axiais e rotacionais, foi desenvolvido neste trabalho um conjunto de análises numéricas, com a utilização do código computacional ABAQUS. Outras análises com o modelo validado também foram desenvolvidas, visando avaliar parâmetros como a influência do nível de restrição térmica e o nível de carga aplicado na resistência ao fogo do elemento estrutural.

## **2 Materiais e métodos**

O presente estudo possui um caráter numérico relativo ao comportamento térmico e termoestructural, em situação de incêndio, de pilares mistos de aço e concreto visando representar o comportamento do pilar sob ação do fogo.

Após a definição de cada modelo, os resultados numéricos passam por um processo de validação, que consiste em compará-los com resultados experimentais, em particular, com aqueles apresentados em Rocha (2016). A seguir estão descritos de maneira geral os ensaios experimentais de referência e cada etapa realizada para o desenvolvimento dos modelos numéricos.

### **2.1 Modelo experimental de referência**

O programa experimental de referência foi realizado no Laboratório de Ensaio de Estruturas e Materiais da Universidade de Coimbra, Portugal, e contou com um total de doze protótipos considerando pilares de aço e mistos de aço e concreto, inseridos ou não em paredes.



Destacando os pilares utilizados nesse trabalho, foi empregado o perfil de aço HEA 220 com altura de 2940 mm. Para os pilares mistos, foi utilizado o concreto de classe C30/37 colocado entre as mesas. Além disso, o concreto foi armado longitudinalmente com barras de diâmetro igual a 20 mm, do tipo CA50, bem como transversalmente com estribos de diâmetro igual a 8 mm e espaçamento de 15 cm. As dimensões da seção transversal utilizada estão esquematizadas na Figura 1a.

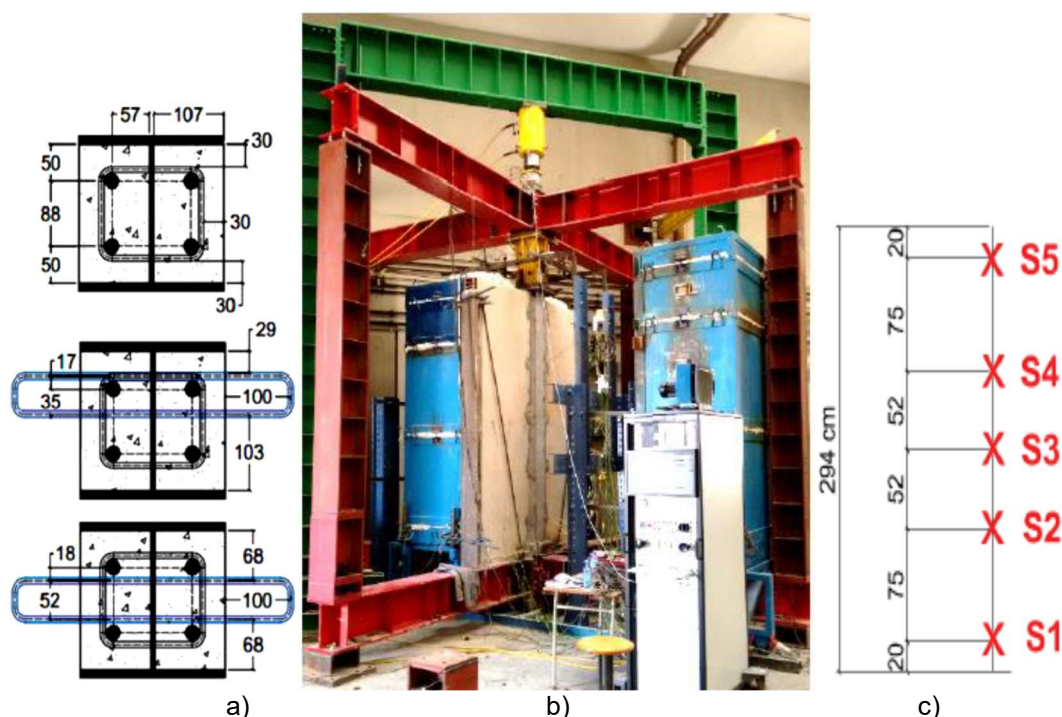


Figura 1- Representação dos componentes de ensaio descritos em Rocha (2016): (a) Dimensões da seção transversal dos pilares mistos; (b) Sistema de ensaio; (c) representação das seções para medição das temperaturas

No que concerne aos procedimentos de ensaio, os pilares foram carregados com 30% da sua carga última teórica à temperatura ambiente, de acordo com as prescrições do EUROCODE 3 Parte 1-1 (2005). Posteriormente, o sistema tridimensional de restrição foi devidamente travado para que, em seguida, os pilares fossem aquecidos.

O forno utilizado foi do tipo modular elétrico, composto por três módulos, sendo dois deles com 1,0 m de altura e o outro com 0,5 m. Quando unidos, formavam uma estrutura com dimensões 1,5 x 1,5 x 2,5 m<sup>3</sup>, de maneira que apenas 2,5 m centrais do pilar eram aquecidos. A Figura 1b ilustra o sistema completo utilizado no ensaio experimental de um pilar em contato com paredes.

As grandezas essenciais a serem determinadas em ensaios em temperaturas elevadas são: as temperaturas ao longo das seções do elemento, os deslocamentos e as forças aplicadas ou que discorrem ao longo do ensaio.

À vista disso, para medir as temperaturas ao longo do pilar foram instalados cabos termopares do tipo K em cinco seções diferentes dos perfis (Figura 1c). Na Figura 3, presente no item validação dos modelos numéricos, é possível visualizar as posições dos termopares do pilar misto de aço e concreto estudado. A nomenclatura utilizada para os

pontos de leitura foram TX.Y, em que X representa a seção do pilar que está sendo estudado e Y indica o ponto de leitura. No entanto, a apresentação dos resultados e a validação dos modelos propostos serão feitos tendo como referência a seção 3 (central). Além da temperatura, foram medidos o deslocamento axial e a força de restrição durante os experimentos, pois representam parâmetros importantes em ensaios termoestruturais de pilares com restrição térmica. Para a determinação do deslocamento axial, quatro transdutores do tipo LVDT foram instalados no topo e na base do pilar. A partir disso, essa grandeza foi obtida pela média aritmética dos quatro medidores seguido da diferença entre o deslocamento médio do topo e da base. Em relação à força, instalou-se uma célula de carga entre o pilar e o pórtico de restrição, responsável por medir as forças geradas pela expansão térmica do pilar restringido.

## 2.2 Modelagem numérica proposta

A análise numérica deste trabalho fundamenta-se em três fases. A primeira denominada, análise térmica, determina-se numericamente o campo de temperatura da seção transversal, tendo como base, os resultados dos ensaios experimentais de referência. A segunda, está condicionada em inserir imperfeições geométricas iniciais, como um deslocamento no meio do vão do pilar. E por fim, a última etapa consiste na análise termoestrutural, com intuito de caracterizar o comportamento estrutural do pilar em situação de incêndio. Nesse estágio, o pilar é carregado e recebe progressivamente o campo térmico previamente determinado.

A modelagem numérica foi realizada com o código computacional ABAQUS, que utiliza a formulação do Método dos Elementos Finitos. Para representar os perfis de aço foram utilizados elementos finitos do tipo casca, para concreto elemento do tipo sólido e elemento de barra para as armaduras. No que se refere ao processo de geração de malha, adotou-se elementos finitos com tamanho de 30 mm para todos os elementos estruturais. Tal valor corresponde aquele que gerou resultados mais consistentes no refinamento da malha.

### 2.2.1 Modelagem térmica

No modelo térmico, as condições de contorno estão relacionadas aos fenômenos de trocas de calor (convecção, radiação e condução) entre o meio e o elemento, em conjunto com seus respectivos coeficientes que os definem e as regiões que atuam.

O princípio da conservação de energia é adotado pelo ABAQUS para a realização de suas análises térmicas, a partir do uso das equações de equilíbrio térmico. No modelo numérico a inclusão da condução do calor ocorre a partir de parâmetros relativos ao próprio material da seção, como a densidade, condutividade térmica e calor específico. Já para considerar os fenômenos de convecção e da radiação algumas constantes são essenciais, como: o coeficiente de convecção ( $\alpha_c$ ), para o primeiro, e ainda a emissividade do material ( $\varepsilon$ ) como também a constante Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ) para o segundo mecanismo.

Com relação aos parâmetros referentes aos mecanismos de transferência de calor, durante o processamento dos modelos numéricos térmicos para fins de calibração e validação, os mesmos não apresentaram resultados satisfatórios utilizando os parâmetros fornecidos pela ABNT NBR 14323:2013,  $\alpha_c = 25\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\varepsilon = 0,7$  para a superfície formada pelo aço e pelo concreto. Por essa razão, houve a necessidade de realizar uma análise de sensibilidade desses parâmetros. A partir disso, adotou-se 0,8 como a emissividade para o aço e 0,7 para o concreto, uma vez que eles forneceram resultados que melhor se adequaram aos experimentais. Em relação ao coeficiente de convecção, o valor fornecido pela norma se mostrou razoável.

Vale ressaltar também que as curvas de evolução da temperatura dos gases inseridas no ABAQUS condiz exatamente às temperaturas obtidas na análise experimental realizada por Rocha (2016). Essas curvas foram fornecidas por cada módulo do forno vertical do experimento. Cita-se ainda que essas curvas não coincidiram com aquela referente ao incêndio padrão definida pela ISO 834:1999.

Na construção dos modelos numéricos foi considerado interação completa entre as zonas de contato entre o aço e concreto, por meio da função “*tie-constraint*” do tipo “*master-slave surfaces*”, que acopla todos os graus de liberdade das superfícies que estão em contato.

## 2.3 Modelagem termoestrutural

Para a análise termoestrutural aqui desenvolvida foi adotado o método sequencial para realização da modelagem numérica. Esse método consiste em desenvolver modelos térmico e termoestrutural inicialmente independentes e, posteriormente, conectá-los por meio da transferência do campo térmico como carregamento para o modelo estrutural. Para facilitar o processamento de dados, utilizou-se a mesma malha, ou seja, a quantidade e a posição dos nós e dos elementos foram iguais em ambos os modelos.

Em relação às propriedades mecânicas, o aço foi modelado seguindo o critério de plastificação de von Mises em conjunto dos diagramas tensão versus deformação em função da temperatura apresentados na ABNT NBR 14323:2013. Porém, para as armaduras dos pilares mistos de aço e concreto não foi considerada a degradação das propriedades mecânicas com a elevação da temperatura, pois no ensaio experimental o valor dessa grandeza foi inferior ou próximo a 400°C na maior parte dos casos, valor que inicia a perda de resistência do aço.

Para o concreto, observou-se que adotando as propriedades elásticas para esse material o modelo resultava suficiente para representar de forma efetiva o comportamento termoestrutural dos pilares mistos. Além do mais, na construção dos modelos numéricos as armaduras longitudinais e transversais foram consideradas por meio do comando *embedded reinforcements*, de modo a permitir a interação entre o concreto e as armaduras. Sobre a estratégia numérica termoestrutural adotada, ela se baseia na inserção de uma mola de rigidez axial e rotacional na extremidade superior do elemento estrutural com intuito de representar o sistema de restrição do ensaio experimental como indicado na Figura 2.

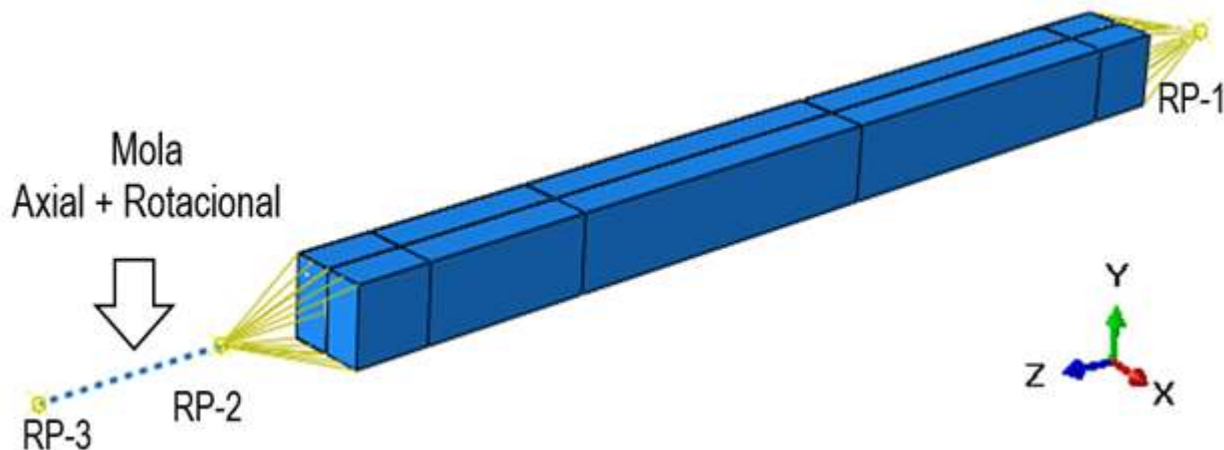


Figura 2 – Modelagem numérica do pilar misto.

De acordo com Neves (1995), a resposta ao incêndio da estrutura que envolve o pilar pode ser comparada a ação de uma mola, de modo que a rigidez da mesma depende das características físicas e geométricas da própria estrutura que interage com o elemento incendiado. Diante disso, essa mola foi construída para representar de maneira satisfatória os valores de rigidezes axiais e rotacionais do pórtico de restrição. Tendo em vista que tais valores não foram mensurados nos ensaios experimentais, foi necessário realizar calibrações numéricas.

No que diz respeito à elaboração da mola, foram criados nós de referência nas extremidades dos pilares para os quais foram acoplados os graus de liberdade das partes superior e inferior do elemento estrutural. Na parte inferior foi criado o nó RP-1 e na parte superior foram criados os nós RP-2 e RP-3 que receberam graus de liberdade do topo do pilar e representaram o comportamento de uma mola.

O desenvolvimento do modelo termoestructural foi realizado em 2 passos. O primeiro consistiu na etapa de carregamento do pilar com a carga utilizada no ensaio experimental, na qual foi aplicada a força axial no nó RP-2. Além disso, como condição de contorno, foi adotado engaste no nó RP-1 e fixados os deslocamentos na direção X e Y e a rotação em torno do eixo Z no nó RP-2, de modo que os demais graus de liberdades fossem livres para se manifestar. No nó RP-3 não foi aplicada condição de contorno, pois durante o carregamento mecânico a extremidade superior do pilar se encontra livre para se deformar e não ocorre a participação da mola.

O segundo passo representa o aquecimento do pilar, e fundamenta-se no acoplamento entre o campo térmico, previamente definido, e as deformações obtidas pelo carregamento do pilar. Portanto, as temperaturas do modelo numérico foram transferidas para essa etapa, de modo a simular o aquecimento da peça estrutural. Além disso, foi inserida a participação da mola na extremidade superior como condição de contorno do nó RP-1, de modo que ela atuasse restringindo as deformações longitudinais (eixo Z) e as rotações em torno do eixo X e Y que no passo anterior estavam livres para se deformar. Os modelos numéricos foram processados até o instante em que o pilar, após apresentar o pico de força axial, voltou a apresentar a carga inicial aplicada, utilizando, portanto, o critério de resistência ao fogo definido em Neves (1995).



### 3 Validação dos modelos numéricos

Seguindo a estratégia numérica já mencionada nesse artigo para a análise térmica, associada aos procedimentos do programa experimental de referência, foi desenvolvido o modelo numérico térmico correspondente ao pilar misto estudado. A Figura 3 apresenta a validação da proposta de modelagem a partir da comparação entre as curvas de evolução de temperatura numérica e experimentais na seção localizada na meia altura do pilar metálico (Seção 3).

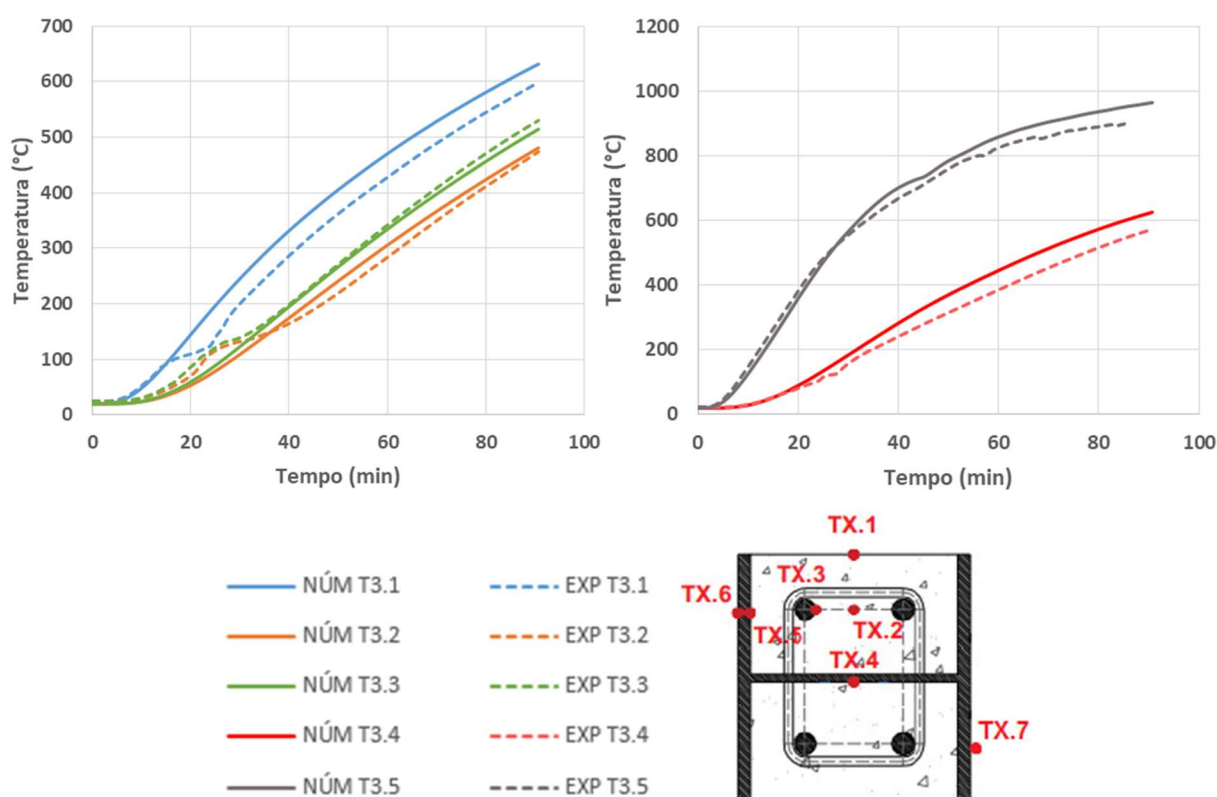


Figura 3- Validação numérica térmica (AUTORA DA PESQUISA (2018))

Com o modelo térmico validado, partiu-se para a análise dos resultados termoestruturais. Nesse aspecto, o primeiro passo consistiu em determinar o valor da rigidez da mola presente na extremidade dos elementos. A calibração numérica para as molas correspondentes ao sistema de restrição foi feita em Simões (2018) para pilares isolados de aço. Os valores encontrados no estudo citado serão utilizados nos modelos desta pesquisa em razão de os ensaios experimentais terem sido desenvolvidos em uma mesma estrutura. A partir dessa abordagem, definiu-se que o valor correspondente à rigidez axial e à rigidez rotacional resultam iguais a 30 kN/mm e 5000 kN.m/rad, respectivamente.

Analisando primeiramente a força axial, os resultados numéricos e experimentais são próximos principalmente até os 50 primeiros minutos. A partir desse instante, as curvas se distanciam, com o modelo numérico não representando a queda brusca de força ao fim do ensaio. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de no modelo numérico não ser

considerada a perda das propriedades mecânicas nas armaduras pela ação do fogo, de modo que as barras longitudinais conseguem manter a sua resistência original durante todo o tempo de aquecimento. Até esse tempo de exposição, a temperatura das armaduras foi inferior àquela em que o aço começa a perder rigidez. Possivelmente, ao considerar a redução das propriedades mecânicas, as curvas numéricas e experimentais ficariam mais próximas. Além do mais, pode-se verificar também que os deslocamentos axiais possuem um comportamento bastante semelhante ao observado nas forças, com uma diferença no pico de aproximadamente 1 mm.

A partir da Figura 3 e da Figura 4, pode-se verificar que o modelo numérico consegue representar satisfatoriamente os comportamentos térmico e termoestructural do pilar mistos de aço e concreto ensaiados.

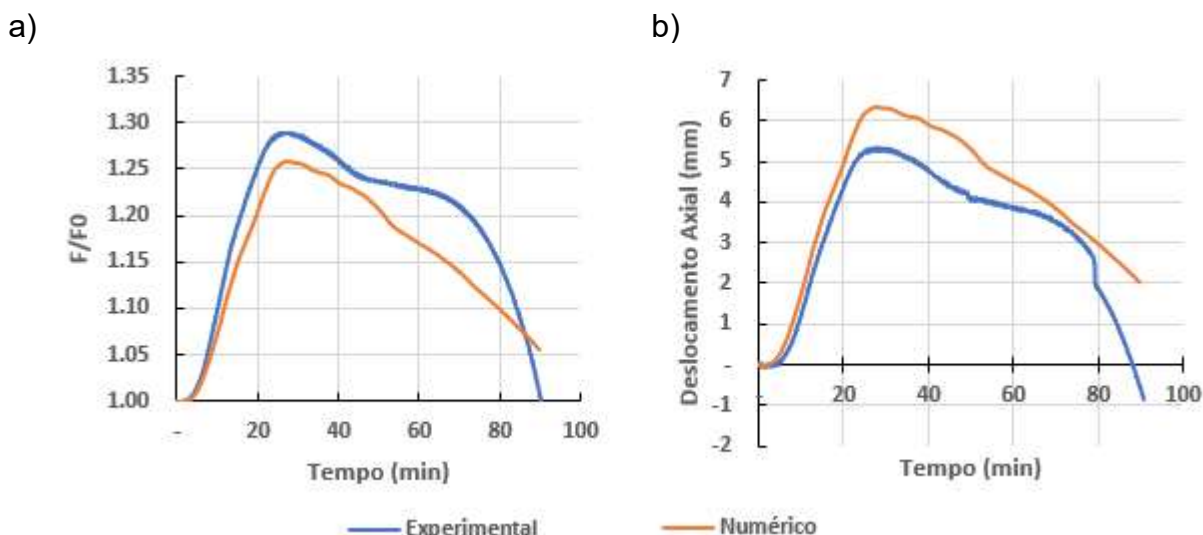


Figura 4 – Validação numérica termoestructural para: a) forças de restrição relativa e b) deslocamento axial (AUTORA DA PESQUISA (2018))

## 4 Análise Paramétrica

Tomando por base a proposta de modelagem numérica termoestructural apresentada anteriormente para o pilar misto, aquela mesma estratégia será aqui utilizada com o intuito de estender as análises desenvolvidas para casos diferentes daqueles expressos no programa experimental de referência, Rocha (2016).

É importante ressaltar que as curvas de aquecimento identificadas na análise experimental e utilizadas no processo de validação dos modelos numéricos não resultaram em concordância com a curva de incêndio-padrão proposta pela ISO 834:1999, recomendada pela ABNT NBR 14323:2013.

Diante disso, como a ideia é verificar a coerência de resultados obtidos com base nas prescrições da ABNT NBR 14323:2013, para fins de contribuições futuras, no presente item serão realizadas análises paramétricas para avaliar o comportamento estrutural de pilares mistos considerando as disposições previstas na norma. Assim, os pilares serão modelados utilizando a curva de incêndio-padrão em concordância com a ISO 834:1999, com os parâmetros térmicos definidos pela norma brasileira.

O tempo de análise do modelo térmico, a princípio, foi limitado ao instante em que a força axial que atua no pilar volta ao seu valor inicial, caracterizando a resistência ao fogo, conforme descrito em Neves (1995).

Dentre os parâmetros monitorados nas análises numéricas realizadas, foram considerados o fator de carregamento do pilar e o nível de restrição térmica imposta ao elemento estrutural. Como níveis de carregamento, foram adotados valores correspondentes a 30%, 50% e 70% da força normal resistente do pilar à temperatura ambiente, cuja determinação da força última desse mesmo elemento seguiu as prescrições disponibilizadas pela ABNT NBR 8800:2008.

No que concerne às restrições térmicas, essas se dividem em restrição axial e restrição rotacional. O foco dessa pesquisa está direcionado principalmente na influência do nível de restrição axial no comportamento termomecânico dos pilares, de modo que foram avaliados os seguintes valores adimensionais: 0 - 0,01 - 0,05 - 0,1 - 0,3 - 0,5 - 0,7 e 1.

A restrição axial relativa é fornecida por um valor adimensional ( $\alpha_A$ ) definido como a razão entre a rigidez axial da estrutura envolvente ( $K_{A,S}$ ) e a rigidez axial elástica do pilar ( $K_{A,C} = 1000 \text{ kN/mm}$ ), expressa pela Equação 1.

$$\alpha_A = \frac{K_{A,S}}{K_{A,C}}$$

Equação 1

Outras abordagens sobre a atuação da restrição rotacional também foram realizadas e serão discutidas adiante. Nos itens que seguem, será apresentada a forma como cada um dos parâmetros citados anteriormente deverá influenciar no comportamento termoestructural dos pilares em situação de incêndio, analisando, principalmente, a contribuição no desenvolvimento das forças axiais relativas ao longo do aquecimento.

#### 4.1 Quanto ao fator de carga

Nas Figuras 5a - 5c são apresentadas as curvas de evolução da força axial relativa considerando para a rigidez axial os parâmetros adimensionais iguais a 0,05 - 0,1 e 0,3. Na apresentação dos resultados referentes a influência do fator de carga, considera-se fixo um dado nível de rigidez axial relativa. Nessa análise, a modelagem numérica foi realizada sem considerar a rigidez rotacional do pilar.

De modo geral, observa-se por meio dos resultados obtidos, que quanto maior o nível de carga aplicado antes do aquecimento, menor será o valor atingido da força axial relativa. Analisando, por exemplo, a Figura 5a, os resultados mostram que para os pilares de aço com  $\alpha_A = 0,05$ , as forças axiais relativas máximas para os fatores de carga de 30%, 50% e 70% resultaram iguais a 1,36 - 1,18 e 1,1, respectivamente. Além do mais, tais picos foram observados em tempos aproximadamente semelhantes.

Após esse pico, as forças apresentam uma queda até o instante de tempo em que elas voltam a apresentar a mesma intensidade aplicada antes do aquecimento, o qual é aqui considerado como o tempo de resistência ao fogo.

No caso da Figura 5b, os tempos críticos encontrados para o pilar analisado resultaram aproximadamente iguais a 94, 65 e 46 minutos para fatores de carga iguais a 30%, 50% e 70%, respectivamente, o que permite estabelecer, assim como para os valores de pico, que

os tempos críticos observados são sempre maiores quanto menor for o fator de carga empregado.

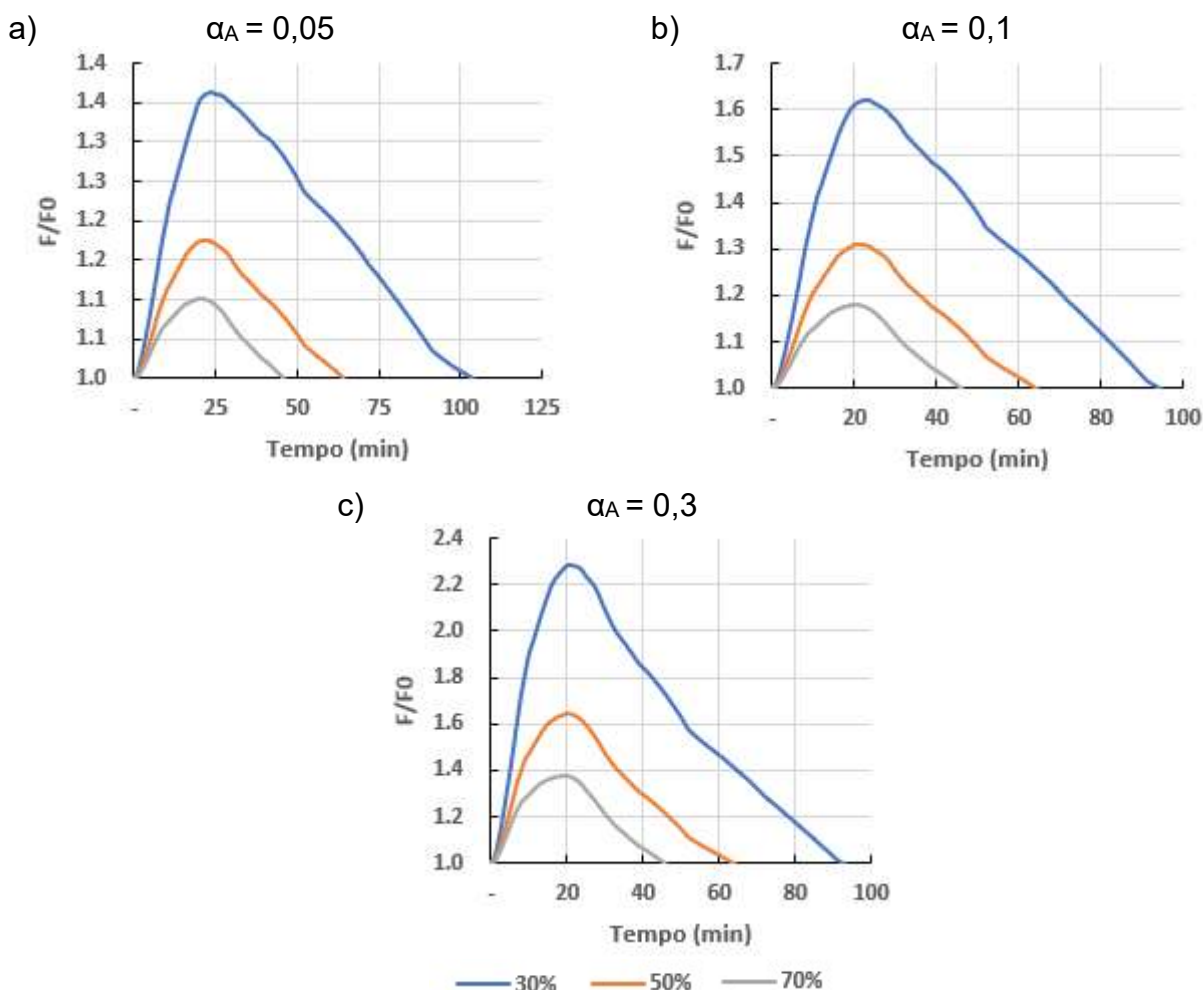


Figura 5 – Influência da variação do fator de carga no desenvolvimento das forças axiais relativas para o pilar misto de aço e concreto (AUTORA DA PESQUISA (2018))

## 4.2 Quanto à restrição axial

De forma semelhante ao que foi realizado no item anterior, é apresentado nas Figuras 6a - 6c o comportamento da força axial relativa para um dado nível de carregamento, com relação à variação da rigidez axial da estrutura circundante. Mais uma vez, destaca-se o fato de a modelagem numérica ter sido realizada sem considerar a rigidez rotacional do pilar.

Dentre as principais considerações, atenções especiais devem ser direcionadas ao fato de a variação da rigidez axial da estrutura circundante pouco (ou quase nada) ter afetado o tempo crítico dos pilares dado um mesmo nível de carregamento, aspecto esse que



apresenta coincidência com as observações identificadas e apresentadas em Neves (1995).

Ainda por meio da Figura 6, é possível notar o modo como a mudança da rigidez da estrutura circundante afeta a intensidade da força gerada no pilar. Observa-se que quanto maior a rigidez axial, maior será a restrição à expansão térmica, gerando assim um esforço maior nos pilares.

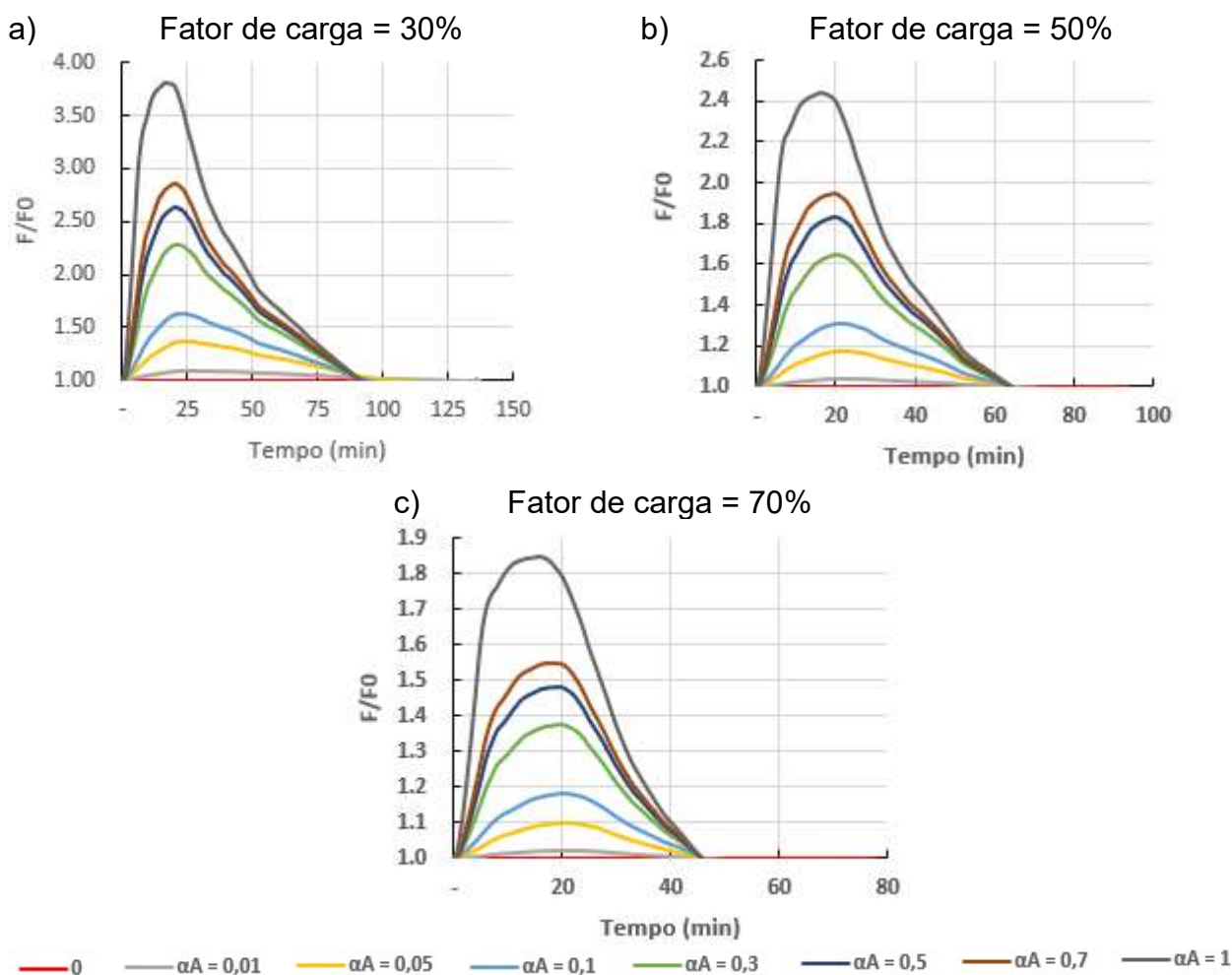


Figura 6 – Influência da restrição axial no desenvolvimento das forças axiais relativas para o pilar misto de aço e concreto (AUTORA DA PESQUISA (2018))

### 4.3 Quanto à restrição rotacional

Esse subitem busca identificar a influência da restrição rotacional no comportamento termomecânico do pilar misto. A seguir é mostrado o resultado para o elemento estrutural modelado com o fator de carga equivalente a 30% e a rigidez axial relativa igual a 0,05. Diante do proposto, buscou-se verificar o quanto a presença da restrição rotacional impacta no desenvolvimento das forças axiais do elemento estrutural. Para tanto, foram testados

quatro valores de rigidez: 500, 5000, 50000 e 500000 kN.m/rad. A Figura 7 traz os resultados numéricos obtidos.

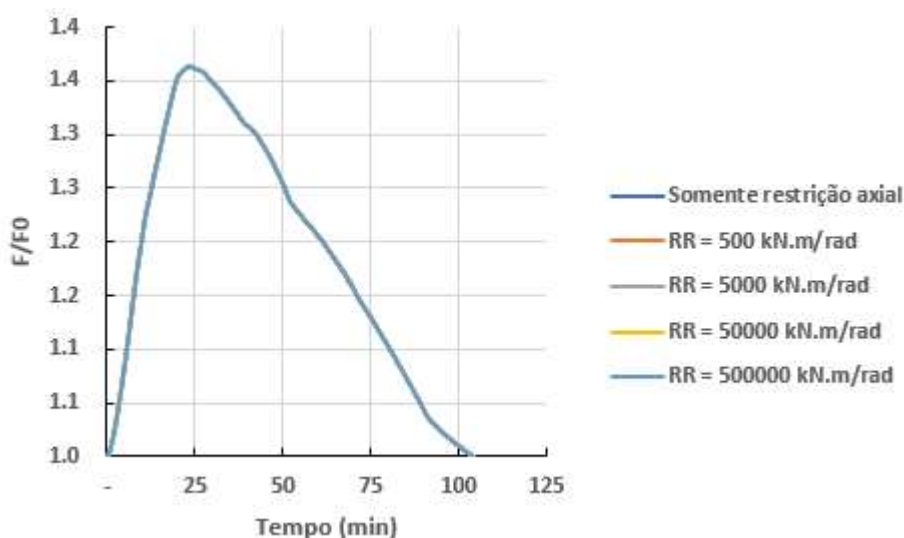


Figura 7 – Influência da restrição rotacional no desenvolvimento das forças axiais relativas para o pilar misto de aço e concreto (AUTORA DA PESQUISA (2018))

A análise da Figura 7 permite constatar que para esse tipo de pilar, a restrição rotacional não afeta o comportamento das curvas referentes ao crescimento das forças axiais relativas em função do tempo, tendo em vista que as curvas de cada um dos parâmetros testados ficaram sobrepostas.

## 5 Conclusões

A partir da modelagem numérica realizada com o uso do pacote computacional ABAQUS, pode-se concluir que o modelo desenvolvido consegue representar bem o comportamento térmico e termoestructural do pilar misto de aço e concreto considerando o incêndio atuando em todas as faces. Analisando os resultados obtidos pela análise paramétrica, pode-se verificar que o fator de carga influencia diretamente a resistência ao fogo do pilar, de forma que quanto maior o carregamento aplicado, menor é o tempo crítico obtido. Por outro lado, a força máxima relativa atingida durante o teste foi maior nos casos em que se aplicou menos carga, uma vez que o acréscimo de força comparado com o carregamento aplicado é maior nestes casos. Por fim, o nível de restrição axial e rotacional às deformações nas extremidades não interfere significativamente no tempo crítico do pilar. No caso das restrições axiais, elas ainda alteram a força axial máxima atingida durante do ensaio, de modo que quanto maior o nível de restrição maiores são as forças obtidas.

## 6 Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

(CAPES) e ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos/USP pelo apoio direcionado à realização do presente trabalho.

## 7 Referências Bibliográficas

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

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

BUBACH, C.R. **Pilares de aço com restrição axial e rotacional em situação de incêndio**. 2016. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

CORREIA, A.J.P.M.; RODRIGUES, J.P.C. Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 4, p. 593-601, 2011.

ELLOBODY, E. A consistent nonlinear approach for analysing steel, cold-formed steel, stainless steel and composite columns at ambient and fire conditions. **Thin-Walled Structures**, v. 68, p. 1-17, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1993-1-2 - **Eurocode 3** - Design of Steel Structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design. Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1994-1-2 - **Eurocode 4** - Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design. Brussels, 2005.

ISO. INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 834**: Fire-resistance tests – Elements of building construct – Part 1: General requirements. ISO, 1999.

NEVES, I.C. The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation. **Fire Safety Journal**, v. 24, n. 3, p. 211-227, 1995.

ROCHA, F.M. **Modelos numéricos de vigas mistas de aço e concreto pertencentes a sistemas de pisos mistos de pequena altura em situação de incêndio**. 2012. 269p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.



Anais do  
60º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2018  
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ROCHA, F.M. **Pilares de aço e misto de aço e concreto inseridos em paredes em situação de incêndio.** 2016. 256p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SIMÕES, Y.S. **Análise numérica de pilares de aço isolados e inseridos em paredes em situação de incêndio.** 2018. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.