

PILARES TUBULARES PREENCHIDOS COM CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: ENSAIOS COM FLAMBAGEM

Tiago Ancelmo de Carvalho Pires¹

João Paulo Correia Rodrigues²

José Jéferson do Rêgo Silva³

RESUMO

Os pilares tubulares em aço preenchidos com concreto apresentam vantagens como alta capacidade de carga e bom desempenho ao fogo. Neste artigo apresenta-se uma abordagem experimental sobre o comportamento destes pilares ao fogo avaliando-se parâmetros de grande influência em seu comportamento nesta situação tais como: esbeltez, nível de carga e restrição a deformação térmica. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra. A análise dos resultados é focada no modo de falha residual destes pilares mostrando-se a influência dos parâmetros estudados e chamando a atenção a ocorrência de flambagem local destes mesmo com pequenos valores de relação D/t aceitos pelas normas.

Palavras-chave: Resistência; Fogo; Aço; Concreto; Pilar; Restrição.

¹ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Doutor em Engenharia de Segurança Contra Incêndios pela Universidade de Coimbra – Portugal. Email: tacpires@yahoo.com.br

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Contra Incêndio da Universidade de Coimbra. Doutor em Engenharia Civil pelo Instituto Técnico da Universidade de Lisboa - Portugal. Email: jpaoloc@dec.uc.pt

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Doutor em Engenharia Civil pelo Wessex Institute of Technology Portsmouth University – Reino Unido. Email: jjrs@ufpe.br

BUCKLING COLUMNS TUBE FILLED WITH CONCRETE IN FIRE SITUATION

ABSTRACT

The tubular steel columns filled with concrete have advantages such as high load capacity and good performance to fire. This paper presents an experimental approach to the behavior of these columns fire evaluating major influence parameters in their behavior in this situation such as slenderness, charge level and restriction thermal deformation. The analysis is focused on residual failure mode of these columns showing the influence of the parameters and highlighting the occurrence of buckling place like this even with small ratio values D/t accepted by the regulations.

Keywords: Strngth; Fire; Steel; Concrete; Column; Restriction.

Artigo recebido em 30/10/15 e Aceito em 22/12/15.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas mistas, e em particular, de seções tubulares preenchidas por concreto na construção civil cresce devido a diversas vantagens tais como: alta capacidade de carga, permitirem o uso de seções transversais pequenas, possibilitarem uma construção rápida, dispensarem a utilização de formas, além de possuírem um bom desempenho em situação de incêndio.

O comportamento ao fogo de pilares tubulares preenchidos por concreto tem sido estudado por diversos autores (KODUR, 1999; HAN, *et al.*, 2003; LIE e KODUR, 1996; PIRES, *et al.*, 2010), no entanto, a maioria destes estudos não considera os efeitos das restrições nas deformações térmicas. Em uma situação real, o pilar encontra-se inserido na estrutura e possui um comportamento ao fogo diferente de quando é aquecido isoladamente. As restrições a deformação térmica impostas pela estrutura circundante regulam a estabilidade do pilar. Existem diversas formas em que o pilar pode interagir com a estrutura adjacente, entre elas: a restrição ao alongamento térmico, mudança da rigidez ao momento da coluna em relação à estrutura adjacente e o aumento do efeito $P-\Delta$ devido à sua deformação lateral. A estrutura circundante exerce novos esforços axiais e momentos no pilar em função da temperatura, estes novos esforços dependem do grau de restrição axial e rotacional impostos pela estrutura (ALI, 1998; NEVES, *et al.*, 2002).

Em 2000, Rodrigues, *et al.* apresentaram os resultados de uma série de 168 ensaios de resistência ao fogo em elementos comprimidos de aço em escala reduzida e com a deformação térmica restringida. Foram avaliadas variáveis tais como: rigidez da estrutura circundante, esbelteza, excentricidade de carga, tipo de ligação (apoio). Neste trabalho o autor afirma que quanto maior a rigidez da estrutura circundante menor é a temperatura crítica (resistência ao fogo) no caso de elementos rotulados e com carga centrada. Já

a flambagem dos elementos com carga centrada ocorreu de forma brusca enquanto que nos de carga excêntrica esta foi de uma forma suave.

Em 1999, Valente e Neves apresentaram um trabalho numérico utilizando o software de elementos finitos FINEFIRE para avaliar a influência da restrição axial e rotacional na temperatura crítica de pilares em aço. Estes mostraram que o aumento da restrição axial, em geral, diminui a resistência ao fogo ao contrário da rigidez rotacional que aumenta a resistência ao fogo, no momento em que é elevada.

Um dos estudos mais completos deste tipo de elemento foi apresentado em 1999 por Kodur, no qual vê-se os resultados de uma série de 75 ensaios de resistência ao fogo em pilares de aço preenchidos por concreto. Os resultados desta pesquisa sugerem que a resistência ao fogo de pilares em aço preenchidos apenas por concreto encontra-se entre 60 e 120 minutos, já nos preenchidos por concreto armado ou por concreto com adição de fibras é superior aos 180 minutos. Em geral o modo de falha destes elementos foi a flambagem global especialmente para os pilares com secção transversal inferior a 203mm.

No geral as pesquisas ressaltam o nível de carga, as dimensões da secção transversal, o comprimento de flambagem, a esbeltez do pilar, o grau e o tipo de material de preenchimento da secção como variáveis que exercem uma alta influência na resistência ao fogo.

Entretanto, a influência de outros parâmetros, tais como, a resistência do aço e do concreto, o tipo de agregado, a excentricidade de aplicação de carga é moderada. Já a taxa de armadura, a espessura da parede do tubo, e a espessura de recobrimento possuem uma pequena influência na resistência ao fogo.

Deste modo, com o objetivo de estudar a influência das principais variáveis que afetam a resistência ao fogo deste tipo de elementos em situação

de incêndio, um conjunto de ensaios de resistência ao fogo vem sendo executado no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra. Parâmetros como a esbeltez do pilar, o nível de carga, a rigidez da estrutura circundante, a taxa de armadura e a espessura do preenchimento com concreto foram avaliados.

Neste trabalho apresenta-se de forma detalhada o programa experimental executado com pilares tubulares circulares preenchidos com concreto em situação de incêndio com restrição à deformação térmica. O desenvolvimento das temperaturas ao longo da altura e da secção transversal do pilar, assim como, as forças de restrição, a deformação axial e lateral do pilar, a resistência ao fogo e o modo de falha foram medidos. Apresenta-se aqui uma discussão sobre o modo de falha, assim como, da influência dos parâmetros estudados no tipo de modo de falha destes pilares em situação de incêndio.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental é descrito a partir da concepção do sistema experimental, dissecando seus principais elementos e processos.

2.1 Sistema experimental

A figura 1 mostra uma vista geral do sistema de ensaio utilizado para os testes de resistência ao fogo de pilares com restrição a deformação térmica construído no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra.

O sistema é constituído por um pórtico de restrição 3D [1] que permite a aplicação de diferentes níveis de restrição simulando a rigidez da estrutura circundante imposta ao pilar submetido ao fogo. Diversos valores de restrição

foram testados, no entanto, neste artigo, serão apresentados resultados para dois valores: 13 e 128 kN/mm.

O pórtico de restrição é composto por quatro pilares periféricos, duas vigas superiores e outras duas inferiores dispostas ortogonalmente. As vigas deste pórtico foram feitas em perfis de aço HEB300 tipo S355. As ligações foram materializadas por quatro parafusos M24, tipo 8.8, exceto as ligações entre os pilares periféricos e as vigas superiores onde foram utilizados varões roscados M27 classe 8.8.

No centro do pórtico encontra-se o pilar a ser testado. Este é submetido a uma carga de compressão constante durante todo o ensaio simulando a carga de serviço do mesmo quando inserido em uma estrutura real. Esta carga é uma porcentagem da carga de projeto a temperatura ambiente calculada de acordo com o EN1994-1-1 (2005). Durante a aplicação da carga, os varões roscados que conectam as vigas superiores aos pilares periféricos encontram-se totalmente livres, permitindo a transferência completa da carga para o pilar central a ser ensaiado. Essas porcas são depois aparafusadas para se conseguir o efeito de restrição.

A carga é aplicada através de um macaco hidráulico de 3000 kN [2] e controlado por uma célula de carga de 1000 kN [3] localizada entre a viga superior do pórtico de restrição 3D e a cabeça do pistão do macaco hidráulico. Este é fixado em um pórtico de reação 2D [4] no qual foram montados estruturas de segurança [5] para evitar danos no sistema de ensaio no caso de uma ruptura brusca do pilar.

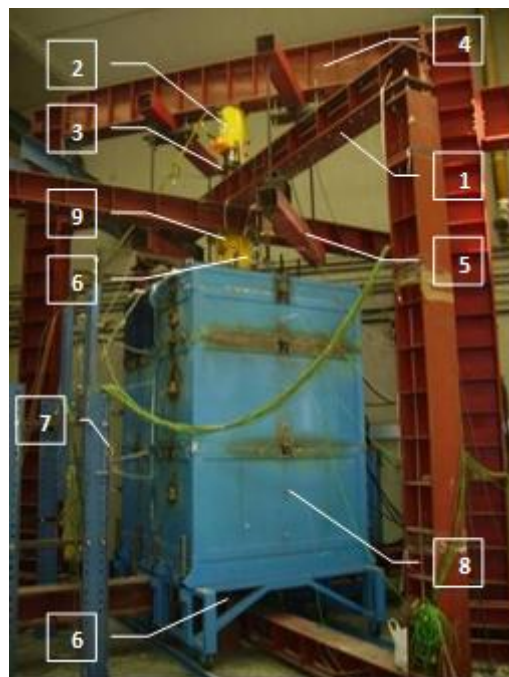


Figura 1: Sistema experimental

A deformação axial do pilar testado é medida através de sete transdutores de deslocamento de êmbolo (LVDT), sendo três localizados na placa de topo do pilar e quatro na placa da base [6]. Um esquema de suas localizações é apresentado na figura 2.

Outros seis transdutores de deslocamento de cabo [7] foram utilizados para medir o deslocamento lateral do pilar testado em três diferentes secções (S1, S2 e S3) e em duas direções ortogonais (fig. 2).

A ação térmica é aplicada por um forno elétrico modular [8] composto por dois módulos de 1m e um de 0,5m de altura. Os módulos são posicionados um sobre o outro formando uma câmara que envolve o pilar com dimensões internas totais de 1,5mx1,5mx2,5m. A meia altura de cada módulo existe um termopar tipo K para medir a temperatura no interior do forno.

Um dispositivo especial [9] foi desenvolvido para medir as forças de restrição impostas ao pilar testado durante o aquecimento. Este dispositivo é composto por um cilindro oco rígido em aço de alta resistência conectado a viga superior do pórtico de restrição 3D. No topo do pilar testado há um cilindro em aço maciço rígido que entra no cilindro oco. A superfície lateral de contato entre os dois foi revestida com Teflon (PTFE) para minimizar atritos entre eles.

As forças de restrição são medidas por uma célula de carga de 3000 kN localizada dentro do cilindro oco que é comprimido pelo cilindro maciço devido a deformação térmica do pilar aquecido durante o teste de resistência ao fogo.

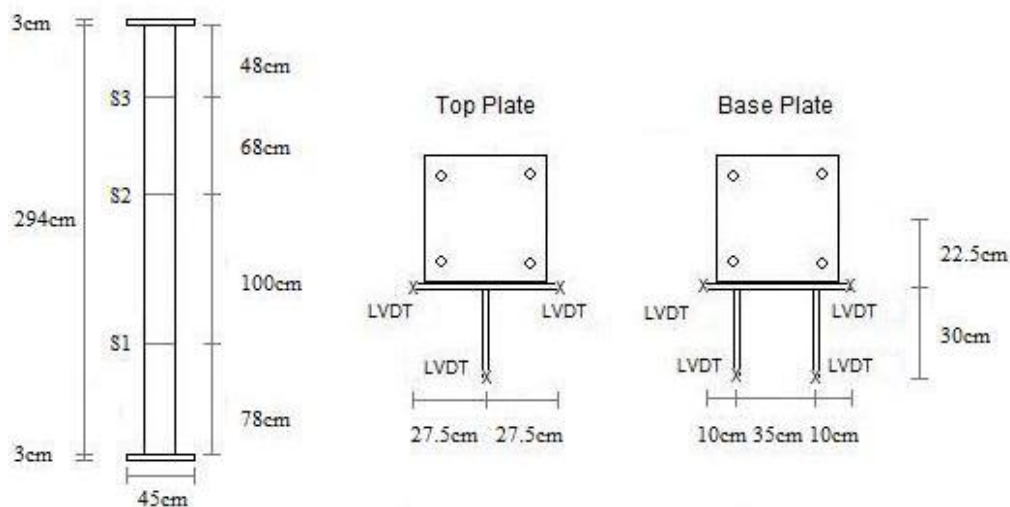


Figura 2: Localização dos transdutores de deslocamento (LVDT's)

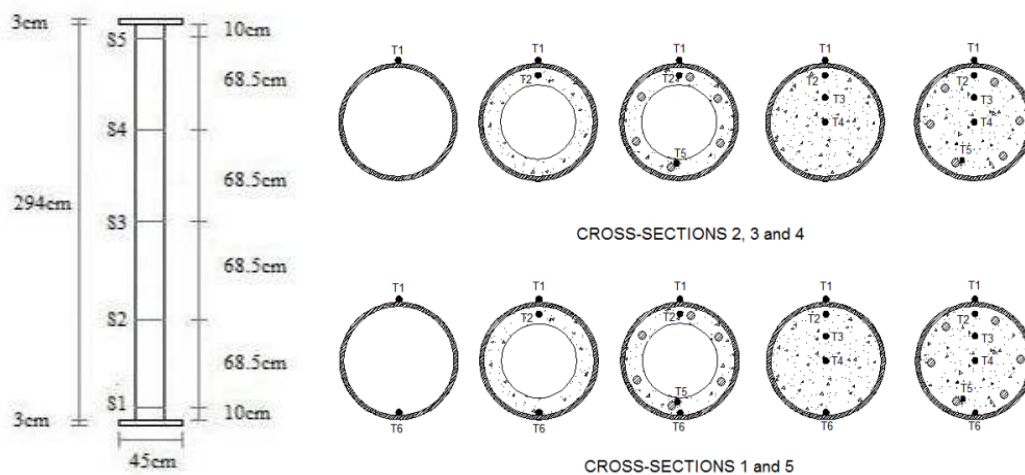
2.2 Corpos de prova

Na confecção dos corpos de prova foram utilizados perfis de aço tubulares de secção circular com diâmetros externos de 168,3 e 219,1 mm, com espessura de parede de 6mm e aço S355.

O concreto utilizado era da classe C25/30 de acordo com a NP EN206-1 (2007) preenchendo totalmente a secção transversal ou parcialmente formando um anel ao redor da parede interna do tubo de 50mm de espessura (nos pilares de 219.1mm) ou de 40mm (nos pilares de 168,3mm).

A armadura longitudinal possuía diâmetro de 12mm (pilares 219,1mm) ou 10mm (pilares 168,3mm). Os estribos possuíam diâmetro de 6mm espaçados a cada 200mm. O recobrimento das armaduras era de 30mm.

A temperatura nos pilares foram medidas por termopares tipo K localizados em cinco secções transversais ao longo da altura (S1 a S5) como mostrado na figura 3.



Foram realizados 40 testes de resistência ao fogo em pilares tubulares considerando-se os seguintes parâmetros:

- Restrição ao alongamento térmico: 13 e 128 kN/mm;
- Nível de carga: 30% e 70% da carga de projeto a temperatura ambiente ($N_{b,rd}$);
- Diâmetro da secção transversal: 168,3 e 219,1mm;
- Preenchimento da secção transversal: Total, Anel (40 ou 50mm) e sem preenchimento (pilares em aço);
- Tipo de preenchimento: concreto armado e concreto simples;

As cargas de serviço aplicadas foram calculadas de acordo com a EN1994-1-1 (2005) e a ação térmica seguiu a curva do incêndio padrão ISO 834.

3 RESULTADOS

No geral o modo de falha dos pilares estudados foi a flambagem global (fig. 4). Algumas destas apresentaram uma dupla curvatura lembrando um suave “s” (eg. A01 e A14).



Figura 4: Flambagem global

Alguns pilares, além da flambagem global, apresentaram também flambagem local (fig. 5) mesmo possuindo uma pequena relação D/t (28 para os pilares com 168.3mm e 37 para os com 219.1mm). O EN1994-1-1 (2005) afirma que a flambagem local pode ser ignorada para valores de D/t inferiores a 59 para os aços S355.

A flambagem local aconteceu sempre na metade superior da altura dos pilares.



Figura 5: Detalhes de flambagem local

A tabela 1 apresenta as características, a resistência ao fogo e os modos de falha observados nos pilares exemplificados neste artigo.

Tabela 1: Plano de ensaios e modo de falha dos pilares

Ref.	Diâmetro (mm)	Grau de preenchimento	Esbelteza λ	Concreto armado	Carga de serviço (kN)	Restrição axial α	Tempo crítico (min)	Modo de falha
A01	168.3	Total	0.883	Não	816 (70% $N_{b,rd}$)	0.038	16	Flambagem global
A05	168.3	--	0.826	--	593 (70% $N_{b,rd}$)	0.073	8	Flambagem global/local
A09	219.1	Anel (50 mm)	0.672	Sim	1363 (70% $N_{b,rd}$)	0.027	14	Flambagem global/local
A10	219.1	--	0.629	--	877 (70% $N_{b,rd}$)	0.056	11	Flambagem global/local
A14	168.3	Anel (40 mm)	0.885	Sim	323 (30% $N_{b,rd}$)	0.040	15	Flambagem global
A19	219.1	Anel (50 mm)	0.672	Sim	584 (30% $N_{b,rd}$)	0.027	23	Flambagem global/local
A21	168.3	Total	0.883	Não	816 (70% $N_{b,rd}$)	0.372	15	Flambagem global
A25	168.3	--	0.826	--	593 (70% $N_{b,rd}$)	0.722	10	Flambagem global
A35	168.3	--	0.826	--	254 (30% $N_{b,rd}$)	0.722	12	Flambagem global

A Figura 6 apresenta a porcentagem de ocorrência da flambagem local nos pilares estudados em função das variáveis nível de rigidez da estrutura circundante, nível de carga, diâmetro externo da secção transversal e preenchimento com concreto.

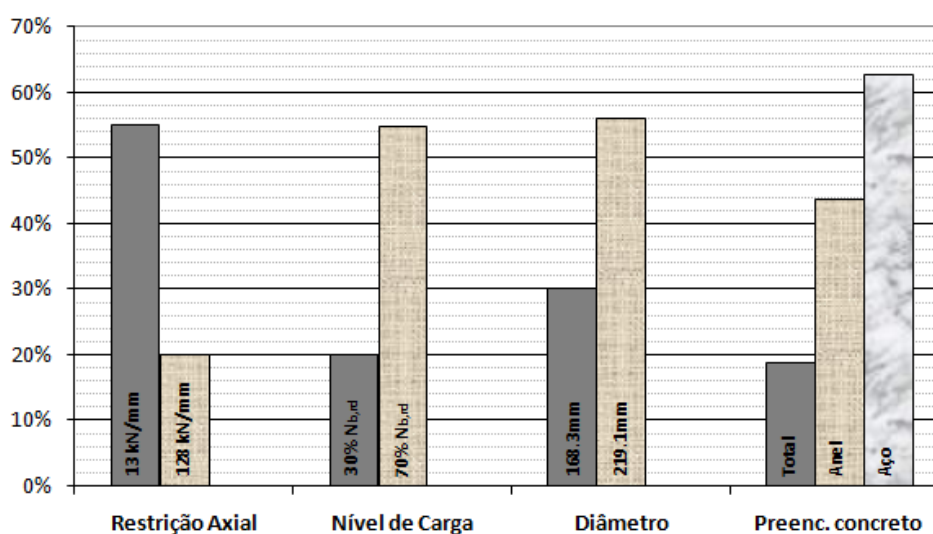


Figura 6: Porcentagem de ocorrência de flambagem local em função dos parâmetros avaliados

A flambagem local foi observada com mais frequência quando o nível de restrição axial era de 13 kN/mm do que quando era de 128 kN/mm.

Os pilares cuja carga aplicada era de 70% $N_{b,rd}$ apresentaram mais casos de flambagem local do que os carregados com 30% $N_{b,rd}$. Acredita-se que como valor absoluto das forças de restrição são maiores nos pilares com 70% $N_{b,rd}$, tenha-se favorecido a ocorrência da flambagem local. Por este motivo o modo de falha é mais evidente nos pilares com este nível de carga aplicada.

O aumento do diâmetro (168.3 para 219.1mm) e conseqüente aumento da relação D/t aumentou os casos de flambagem local como era de se esperar. No entanto ressalta-se que mesmo com um valor baixo na relação D/t , em situação de incêndio, a flambagem global pode acontecer.

Os pilares em aço (sem preenchimento com concreto) apresentaram uma maior ocorrência de flambagem local, em següidas os preenchidos com o anel de concreto e por último os totalmente preenchidos com concreto. Como o núcleo de concreto permanece menos quente do que o perfil de aço devido a menor condutibilidade térmica do concreto, este contrapõe-se à instabilidade do pilar, melhorando sua resistência ao fogo e evitando a flambagem local dos perfis. O preenchimento com o anel de concreto já não se mostrou tão eficaz.

Ressalta-se que a análise do modo de falha é feita após a fase de resfriamento do pilar, ou seja, após o teste. Tal fato dificulta a determinação do modo de falha prioritário do pilar.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta resultados de um estudo experimental sobre o comportamento de pilares tubulares em aço preenchidos por concreto sujeitos

a ação do fogo. Nestes foram quantificados o desenvolvimento das temperaturas no forno e no pilar, a resistência ao fogo, as forças de restrição, as deformações laterais e axiais e os modos de falha levando-se em conta variáveis de grande influência na performance ao fogo destes pilares tais como: esbeltez do pilar, o nível de carga, a rigidez da estrutura circundante, a taxa de armadura e a espessura do preenchimento com concreto. Em especial focou-se a discussão no modo de falha dos pilares e diante dos resultados apresentados pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- Os pilares falharam no geral por flambagem global, No entanto, diversos pilares também apresentaram flambagem local mesmo com uma relação D/t pequena;
- O número de casos de flambagem local aumentou quando se diminui a rigidez da estrutura circundante;
- O número de casos de flambagem local também aumentou quando o nível de carga ou o diâmetro externo da secção transversal aumentou;
- O preenchimento com concreto ajuda a impedir a flambagem local melhorando a resistência ao fogo. O preenchimento com o anel de concreto não se mostrou tão eficiente para prevenir a flambagem local.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao programa ISAC – Improving Skills Across Continents, a FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia e as empresas Metalcardoso S.A. e A. Costa Cabral pelo seu apoio.

6 REFERÊNCIAS

ALI F.A., SHEPHERD A., RANDALL M., SIMMS I.W., O'CONNOR D.J., BURGESS I., The effect of axial restraint on the fire resistance of steel columns, ***Journal of Constructional Steel Research***, 46 (1-3), paper nº 117, 305-306, 1998.

CORREIA A. M., PIRES T.A.C., RODRIGUES J. P. C., ***Behaviour of Steel Columns Subjected to Fire***, Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 2010.

EN 1994-1-1, ***Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings***, CEN - European Committee for Standardization, 2005.

EN 1994-1-2, ***Design of composite steel and concrete structures. part 1-2: general rules – structural fire design***, CEN - European Committee for Standardization, 2005.

HAN L.H.; YANG, Y.F., XU, L., An experimental study and calculation on the fire resistance of concrete-filled SHS and RHS columns. ***Journal of Constructional Steel Research***, n. 59, 427-452, 2003.

KODUR V.K.R. *Performance-based fire resistance design of concrete-filled steel columns*. ***Journal of Constructional Steel Research***, n. 51, 21-36, 1999.

LIE T.T. e KODUR V.K.R., Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete. ***Journal of Structural Engineering***, n. 122 (1), 30-36, 1996.

NEVES I.C., VALENTE J.C., RODRIGUES J.P.C., Thermal restraint and fire resistance of columns. ***Fire Safety Journal***, n. 37, 753-771, 2002.

NP EN 206-1, ***Concrete Part 1: Specification, performance, production and conformity***, IPQ – Instituto Português da Qualidade, Portugal, 84, 2007.

PIRES T.A.C.; RODRIGUES J.P.C.; SILVA J.J.R.S., ***Buckling of concrete filled steel hollow columns in case of fire***. SDSS´Rio2010 – Stability and ductility of steel structures, 2010.

PIRES T.A.C., RODRIGUES J.P.C., SILVA J.J.R.S.; CORREIA A.M., ***Concrete filled steel hollow columns subjected to fire***. International Symposium “Steel Structures: Culture & Sustainability 2010”, 2010.

Revista FLAMMAE

Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

Seção 1 – Artigos Técnico Científicos

Artigo publicado no Vol.02 Nº03 - Edição de JAN a JUN 2016 - ISSN 2359-4829

Versão on-line disponível em: <http://www.revistaflammaecbmpe.wix.com>.

RODRIGUES J.P.C., NEVES I.C., VALENTE J.C., Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*, n. 35, 77-98, 2000.

VALENTE J.C. e NEVES I.C. Fire resistance of steel columns with elastically restrained axial elongation and bending. *Journal of Structural Steel Research*, n. 52 (3), 310-331, 1999.