

Experimental analysis of the spalling phenomenon in precast reinforced concrete columns exposed to high temperatures

Análise experimental do fenômeno de deslocamento em pilares de concreto armado pré-fabricados submetidos a elevadas temperaturas



A. M. GIL^a
augustomg@unisinis.br

B. FERNANDES^b
fernandes.brn@gmail.com

F. L. BOLINA^a
fabriciolb@unisinis.br

B. F. TUTIKIAN^a
bftutikian@unisinis.br

Abstract

Among the processes that involve the degradation of concrete structures subject to the high temperatures of a fire there is the spalling phenomenon. Its mechanisms are related to the thermal stress of the materials dilatations and pore pressure the process of vaporization of water during heating. The factors that influences in its occurrence are related to concrete properties, structural member characteristics or the exposure conditions, and their parameters are not clearly known yet. This paper aimed to study the influence of three concrete mixtures, four coating thicknesses and two bars diameters of longitudinal reinforcement in the spalling phenomena exposed to ISO 834 fire curve. The characterization of concrete were performed either of the axial compression strength tests, water absorption by capillary and mercury intrusion porosimetry, besides the fire resistance tests in real-scale specimens. It was concluded that the diameter of the bar does not have influence, while the mixture and the concrete cover thickness does. More spalling was recorded for the columns with thicker concrete cover and concrete compressive strength at 61,9 MPa, and although higher strength concrete have less permeability, this characteristic can be balanced with the higher tensile strength of this type of concrete.

Keywords: fire resistance, precast columns, fire, spalling.

Resumo

Dentre os processos que envolvem a degradação das estruturas de concreto submetidas às elevadas temperaturas tem-se o fenômeno de deslocamento, amplamente conhecido como *spalling*. Seus mecanismos estão relacionados às tensões térmicas da dilatação dos materiais e às poropressões do processo de vaporização da água. Dentre os fatores que influenciam em sua ocorrência, destacam-se as propriedades do concreto, características do elemento estrutural e condições de exposição, sendo seus parâmetros ainda não conhecidos claramente. O presente artigo teve como objetivo avaliar a influência que três composições de concreto, quatro espessuras de cobrimento e dois diâmetros de barras da armadura longitudinal exercem no fenômeno de deslocamento em pilares de concreto armado pré-fabricados expostos à curva de aquecimento padrão ISO 834:2014. Para tanto, foram procedidas caracterizações das misturas através de ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e porosimetria por intrusão de mercúrio, além do ensaio de resistência a altas temperaturas em amostras em escala real. Foi possível concluir que o diâmetro da barra não exerce influência sobre o deslocamento, diferentemente da relação água / cimento e da espessura de cobrimento, para os materiais desta pesquisa. Constatou-se maior deslocamento ocorreu nos pilares com maior espessura de cobrimento, com resistência à compressão de 61,9 MPa, sendo que, apesar de concretos de elevada resistência possuírem menor permeabilidade, esta característica pode ser balanceada com maiores valores de resistência à tração.

Palavras-chave: resistência a altas temperaturas, pilares pré-fabricados, incêndio, deslocamento.

^a Itt Performance, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, Brasil;

^b Faculdade de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

1. Introdução

O fenômeno de deslocamento, conhecido internacionalmente como *spalling*, consiste na perda de camadas superficiais de elementos de concreto quando expostos a uma elevada taxa de aquecimento, similares às de um incêndio. A forma de ocorrência do deslocamento pode ser variável e até mesmo imprevisível, de forma insignificante ou grave, de acordo com a quantidade de concreto deslocada [1]. Phan et al. [2] esclarecem que o elemento sofre um alto gradiente de temperatura entre a face exposta ao calor e o interior ainda resfriado, que pode ocasionar o seu deslocamento pelo desenvolvimento de tensões termomecânicas e termo-hidráulicas. A expansão térmica da camada superficial de concreto induz o surgimento de esforços de compressão pelas restrições impostas, ocasionando tensões indiretas de tração com o núcleo resfriado [3-4]. Segundo Anderberg [5], este mecanismo também pode se desenvolver no canto dos elementos, no encontro entre duas superfícies perpendiculares. Durante o aquecimento, parte da umidade presente no interior do concreto é evaporada para o exterior enquanto outra parte migra para o interior do elemento, formando uma camada saturada, paralela à superfície do elemento. O aumento de temperatura conduz ao processo de vaporização da água, cuja expansão volumétrica ocasiona pressões no interior dos poros do concreto [6-7]. Quando estas tensões, provocadas por mecanismos mecânicos ou hidráulicos, superam a resistência à tração do concreto ocorre o seu deslocamento. Estudos como o de Mindeguia et al. [8] demonstram que a ocorrência do fenômeno só é possível por uma combinação dos dois mecanismos. As principais consequências do deslocamento são a exposição direta da armadura ao fogo e a redução da seção transversal do elemento, que podem levar a perda de sua capacidade e estabilidade estrutural [9]. Diversos fatores influenciam a ocorrência do deslocamento e o fato de estes estarem inter-relacionados aumenta a complexidade na definição dos parâmetros para previsão de sua ocorrência. Os principais fatores estão relacionados com a composição do concreto, ca-

racterísticas do elemento estrutural e sua forma de exposição. Assim, destacam-se a resistência e a idade do concreto, o tipo e tamanho dos agregados, teor de umidade e permeabilidade do material, temperatura máxima e a taxa de aquecimento, forma e tamanho da seção transversal, configuração das armaduras, presença de fibras e a forma e a intensidade de carregamento do elemento estrutural [6,10-11].

Hedayati et al. [11] apresentam uma extensa revisão bibliográfica sobre os principais estudos conduzidos nas últimas décadas com o objetivo de compreender os parâmetros que influenciam na ocorrência do fenômeno. Verifica-se que a maior parte destes trabalhos se limitam a avaliação da influência de diferentes tipos de carregamento no deslocamento e na forma como a adição de fibras na composição do concreto pode contribuir para sua mitigação. Conforme verificado em diversos trabalhos, a aplicação e aumento do nível de carregamento em uma estrutura conduzem ao aumento do deslocamento do concreto [12], da mesma forma que a incorporação de fibras aumenta a resistência à tração do material e o derretimento de fibras sintéticas cria pontos de alívio das poropressões [1].

Estudos como os de Guerrieri e Fragomeni [13] e Miah et al. [12], avaliando as propriedades do concreto como relação água/cimento (a/c) e uso de adições minerais, respectivamente, demonstram haver uma influência sobre o fenômeno. A menor permeabilidade de concretos com elevadas resistências limita a sua capacidade de eliminar a umidade em expansão durante o processo de aquecimento, o que resulta em um acréscimo nas tensões internas por poropressão. Ali [14], no entanto, defende que este tipo de concreto apresenta maiores valores de resistência à tração, sendo capazes de absorver estas tensões. Neste sentido, Sanjayan [15] demonstra que as propriedades do concreto não são os principais fatores de influência no grau de deslocamento. Estudos conduzidos por Ali [14], Kodur [16] e Morita et al. [17], utilizando amostras em escala real, demonstraram que diversos parâmetros de projeto, como as dimensões e forma da seção transversal, presença e configuração de armaduras, intensidade e forma de carregamento, influenciam na ocorrência do fenômeno de deslocamento. Kodur e Raut [18] verificaram que a forma de

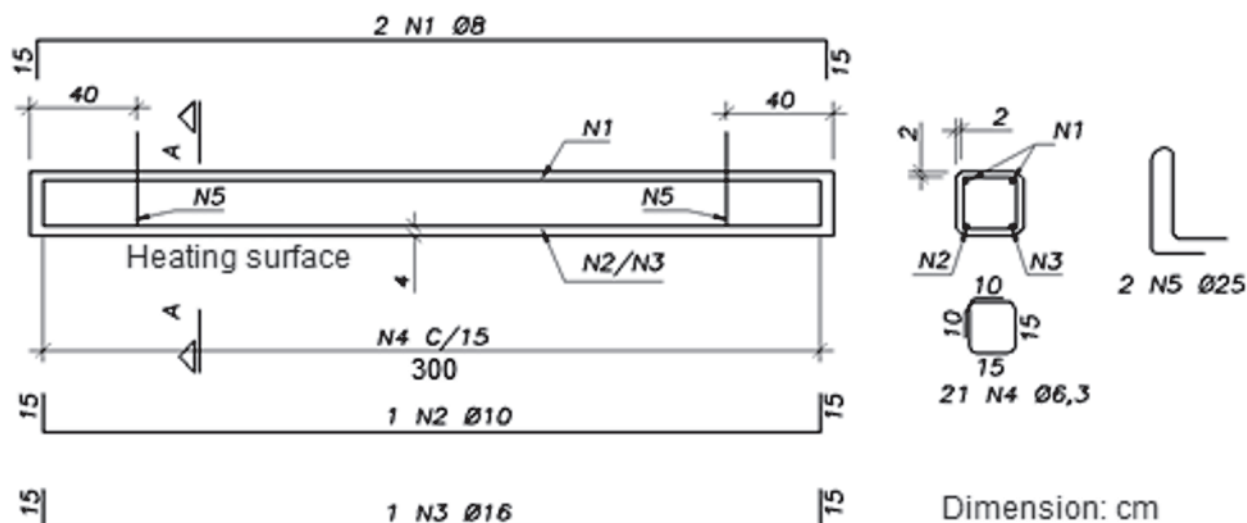


Figura 1
Configuração das armaduras dos pilares

Tabela 1

Traço unitário definido por classe de agressividade ambiental

Traço	Classe de agressividade	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Composição (massa unitária)					
				Cimento	Areia industrial	Areia natural	Brita 0	Brita 1	Água
1	I	0,65	260	1,0	1,19	2,22	1,23	2,88	0,65
2	II	0,60	280	1,00	1,10	2,04	1,15	2,67	0,60
3	IV	0,45	360	1,00	0,91	1,69	1,00	2,33	0,55

amarração e o maior espaçamento dos estribos podem contribuir para ocorrência do fenômeno. Park e Lee (2008) constataram um aumento do grau de deslocamento com o aumento da espessura de cobrimento, o que pode ser um fator preocupante, uma vez que a maioria das normas e códigos tem como princípio a utilização do concreto como um isolante térmico para proteção das barras de aço, sem considerar a ocorrência do fenômeno de deslocamento. Este artigo teve como objetivo avaliar a influência que a relação a/c da composição de concreto, a espessura de cobrimento e o diâmetro das barras das armaduras principais exercem sobre a ocorrência do fenômeno de deslocamento. Para tanto, foram avaliados pilares de concreto armado pré-fabricados em escala real, expostos a uma curva de aquecimento padrão ISO 834 [19]. Durante os ensaios de resistência ao fogo foram registradas a variação de temperatura das armaduras longitudinais e na região de cobrimento das armaduras,

assim como a ocorrência de ruído e liberação de vapor e água que pudessem caracterizar a ocorrência do fenômeno. Os resultados da análise pós-incêndio foram comparados com as propriedades do material e o comportamento dos elementos durante a exposição.

2. Programa experimental

2.1 Visão geral das amostras ensaiadas

As amostras ensaiadas foram representativas de pilares de concreto armado de edificações prediais em escala real com uma face e dois cantos expostos ao fogo. Foram produzidos 12 pilares, projetados a partir da relação entre quatro espessuras de cobrimento e três composições de concreto. Os parâmetros projetuais adotados foram definidos com base nos critérios estabelecidos para as

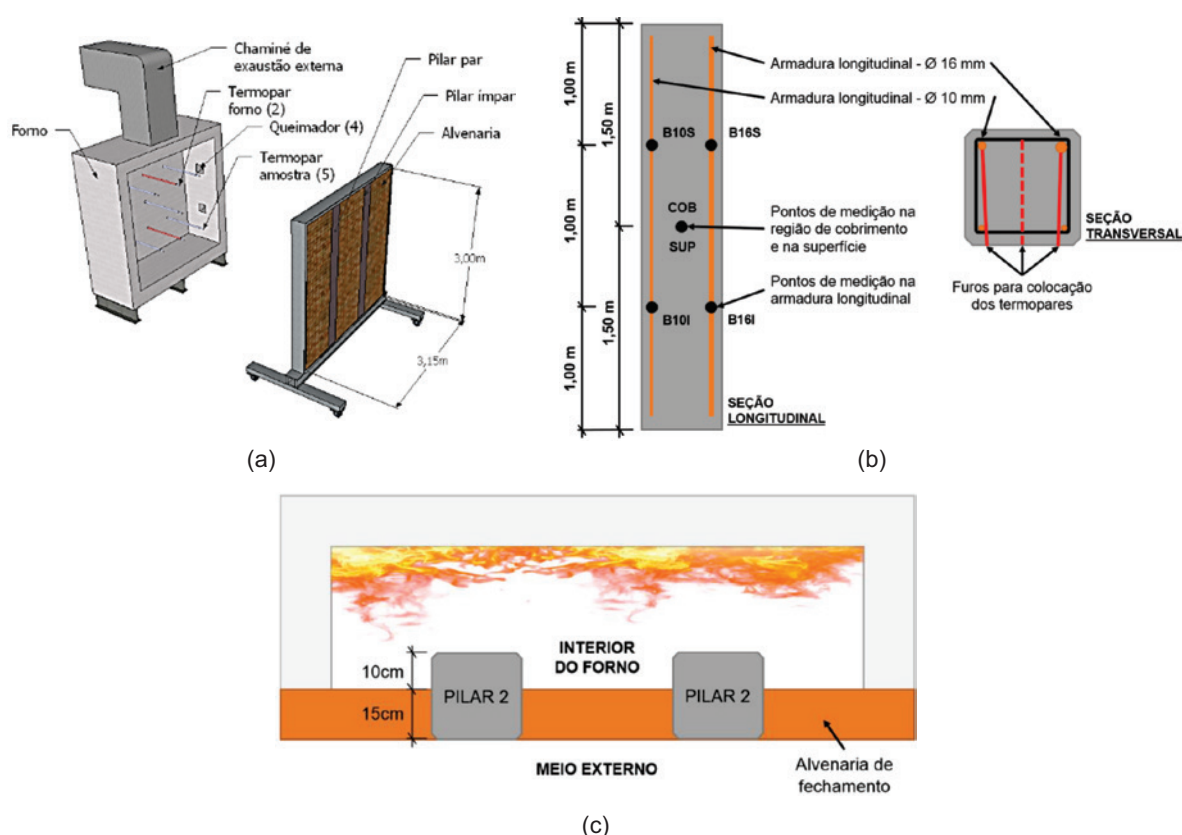


Figura 2

(a) perspectiva da instalação do sistema no forno vertical, (b) locação dos termopares e (c) esquema do sistema em planta

diferentes classes de agressividade ambiental descritos pela NBR 6118 [20] e pela NBR 12655 [21]. A etapa de produção dos pilares foi realizada em uma indústria de pré-fabricados, utilizando-se uma central dosadora automatizada para mistura do concreto.

Os pilares possuíam 300 cm de altura e seção transversal quadrada com 25 cm de lado. A Figura 1 apresenta a configuração de armaduras empregada em todos os pilares, variando-se a espessura de cobrimento (25 mm, 30 mm, 40 mm e 50 mm), definidas para representar cada uma das quatro classes de agressividade ambiental. Na face dos pilares exposta ao aquecimento, foram adotados dois diâmetros de armadura longitudinal comumente empregados neste tipo de elemento estrutural: 10 mm e 16 mm. A armadura longitudinal na face não exposta ao aquecimento é constituída por duas barras com diâmetro de 8 mm. Os estribos, constituídos por barras de diâmetro 6,3 mm e espaçados a cada 15 cm, foram amarrados com gancho de amarração em ângulo reto. Todas as armaduras foram constituídas por aço CA-50.

Três composições de concreto foram utilizadas na produção dos pilares, com teor de argamassa seca de 52% e abatimento fixado em 100 mm, com uso de aditivo superplastificante a base de policarboxilato. Os traços foram determinados pelo método de dosagem IBRACON [22], fixando-se a relação a/c e consumo de cimento de acordo com os requisitos de três classes de agressividade ambiental. A Tabela 1 apresenta o traço unitário de cada composição.

O cimento utilizado foi o CPV-ARI, por conter pouca quantidade de adições e possuir alta resistência inicial, desejável para o içamento dos pilares em pequenas idades na indústria de pré-fabricados. Os agregados graúdos utilizados são de origem basáltica, extraídos da cidade de Bento Gonçalves/RS, divididos em duas zonas de distribuição granulométricas: 0,15/6,3 e 2,4/19. O material da zona 0,15/6,3 apresenta módulo de finura 5,17 e diâmetro máximo 9,5 mm, enquanto que os materiais da zona 2,4/19 possui módulo de finura 6,77 e diâmetro máximo 19 mm. Os materiais foram empregados nas proporções 30% e 70%, respectivamente.

Foram utilizados dois tipos de agregado miúdo, identificados como areia natural e areia industrial. A areia natural é de origem quartzosa, proveniente do Rio Jacuí/RS, possuindo módulo de finura 2,14 e diâmetro máximo 2,4 mm. A areia industrial, resultado da britagem de rochas basálticas na cidade de Bento Gonçalves/RS, possui módulo de finura 2,44 e diâmetro máximo 2,4 mm. Os materiais foram empregados nas proporções 65% e 35%, respectivamente.

2.2 Ensaios de resistência ao fogo

Os pilares foram transportados da indústria de pré-fabricados ao laboratório onde os ensaios de resistência ao fogo foram realizados em um forno vertical aquecido por quatro queimadores a gás liquefeito de petróleo, localizados nas paredes laterais da câmara interna do forno, que possui 2,5 m de altura, 2,5 m de largura e 1,0 m de profundidade. O forno é controlado por pressão diferencial, com potência de aquecimento total de 65,4 kcal/h, sendo 396 kcal/h na parte inferior e 258 kcal/h na parte superior, programado para realizar o aquecimento automático de acordo com a curva de incêndio em edificações descrita pela norma ISO 834 [19], expressada na Equação 1.

$$T = 345 \times \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

Onde t é o tempo, em minutos, e T é a temperatura média do forno, em °C. Todos os ensaios tiveram duração de 240 minutos e a temperatura máxima atingida no interior do forno foi de, aproximadamente, 1153°C.

O sistema desenvolvido para o ensaio consiste em dois pilares embutidos em uma parede de alvenaria sobre uma estrutura metálica acoplável ao forno vertical, de modo que um lado e dois cantos dos pilares (ou 45% de sua seção transversal) fossem expostos às elevadas temperaturas. A Figura 2 apresenta um esquema do sistema desenvolvido para avaliação dos pilares. Devido às limitações impostas pelo sistema ensaiado, as amostras foram ensaiadas sem a presença de carregamento, limitando a sua avaliação apenas ao fenômeno de deslocamento.

No decorrer do ensaio foram realizadas medições de temperatura na mostra e monitorados ruídos que pudessem caracterizar a ocorrência de deslocamento, principalmente do tipo explosivo. De modo a simular a fase de resfriamento real de um incêndio, o forno foi desligado e a amostra resfriada a temperatura ambiente [23]. Para medição das temperaturas foram utilizados termopares do tipo K 8 AWG, de 3,26 mm de diâmetro, com temperatura máxima admissível de 1260°C. Os termopares foram instalados junto às barras metálicas longitudinais em que se desejava analisar as temperaturas antes da concretagem. A locação destes pontos seguiu as prescrições da JIS A1304 (JIS, 1994), sendo dois pontos de medição nos terços médios de cada barra longitudinal e um no centro geométrico do pilar, na região de cobrimento da armadura (Figura 2).

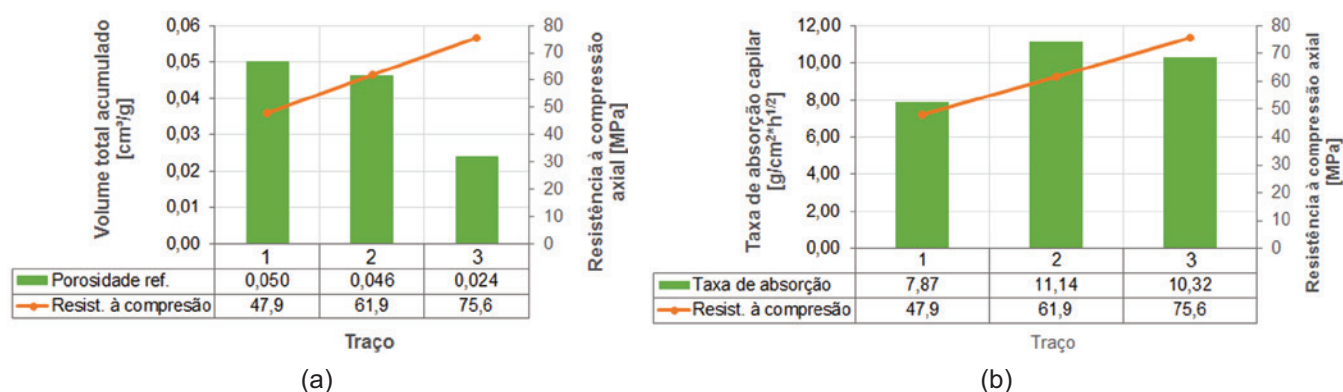


Figura 3

Relação da resistência à compressão com (a) a porosidade total e (b) com a taxa de absorção capilar

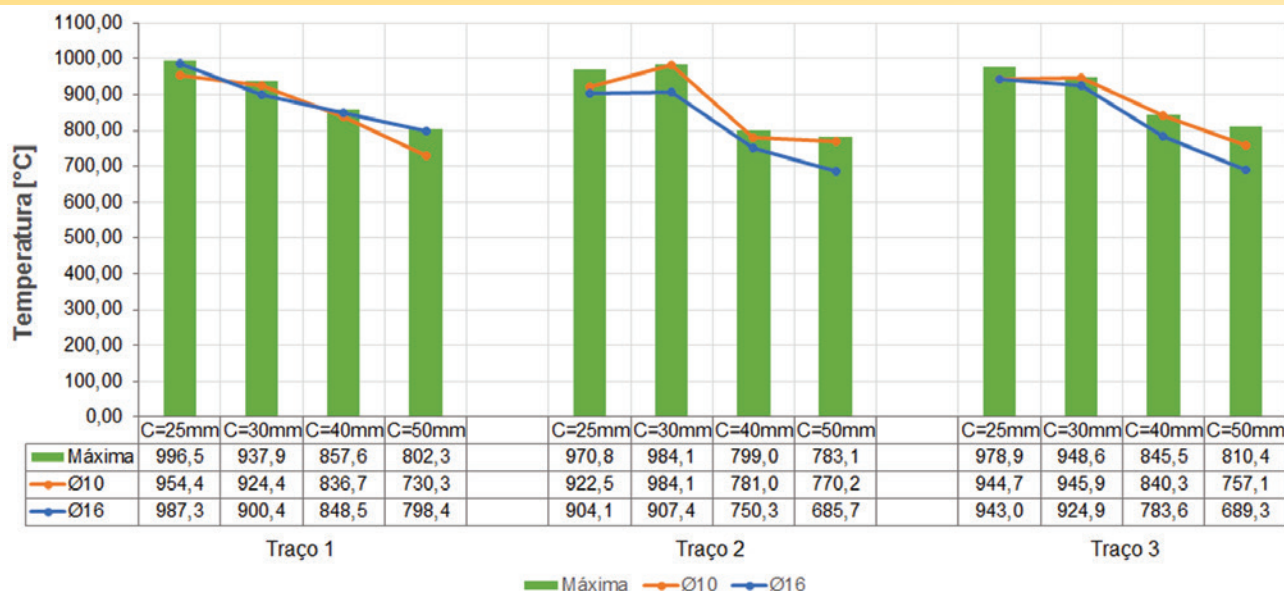


Figura 4
Temperaturas máximas atingidas

2.3 Avaliação dos pilares pós-incêndio

A avaliação dos pilares após os ensaios de resistência ao fogo ocorreu através da inspeção visual e da determinação da perda de seção transversal. Por meio da inspeção visual foi possível identificar os tipos de deslocamento ocorridos, assim como alterações na aparência superficial do concreto. A determinação da perda de seção transversal foi realizada por meio da medição da área deslocada a cada 10 cm de altura, utilizando-se um esquadro e um paquímetro, verificando a profundidade de deslocamento frontal e lateral em cada aresta.

3. Resultados

3.1 Caracterização do concreto produzido

A partir dos concretos produzidos para fabricação dos pilares, foram moldados corpos de prova cilíndricos para caracterização do material. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, porosimetria por intrusão de mercúrio e absorção de água por capilaridade. A Figura 3 apresenta a relação dos resultados de resistência à compressão com a taxa de absorção capilar e a porosidade total obtida nos ensaios de caracterização. Para análise comparativa dos resultados foram utilizados os valores potenciais de resistência à compressão axial, sendo 47,9 MPa, 61,9 MPa e

75,6 MPa, representativos dos traços 1, 2 e 3, respectivamente. Os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio demonstraram haver uma redução da porosidade com o aumento da resistência à compressão axial. Observa-se, no entanto, que a taxa de absorção capilar do traço 1 foi menor que a dos traços 2 e 3, que demonstra uma menor conectividade entre os poros do concreto quando comparado aos demais.

3.2 Ensaios de resistência ao fogo

A partir das medições realizadas foi possível determinar a temperatura máxima atingida durante o ensaio na região de cobrimento das armaduras, assim como a temperatura média máxima atingida em cada barra (Figura 4). Apesar destes valores não representarem o momento de ocorrência do deslocamento, estes foram adotados para a análise comparativa dos resultados por se manterem sob as mesmas condições ao longo de todo o ensaio. Verificou-se que a espessura de cobrimento tem influência nas temperaturas atingidas nas barras de aço e na região de cobrimento. Para os pilares com espessura de cobrimento de 25 mm, a temperatura máxima registrada está entre 970,8°C e 996,5°C, enquanto que para os pilares com espessura de cobrimento de 50 mm a temperatura máxima registrada está entre 783,1°C e 810,4°C. Isto ocorre devido ao isolamento térmico proporcionado

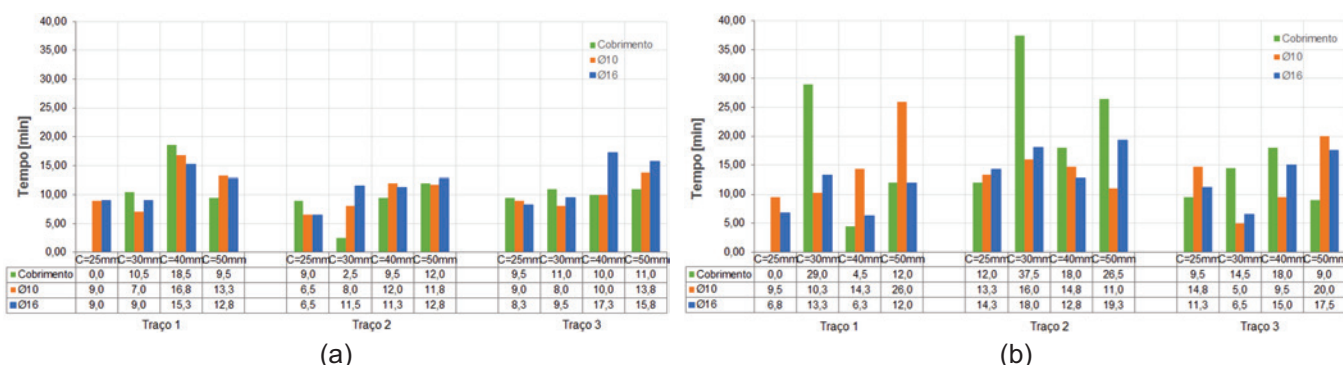


Figura 5
Tempo (a) para chegar em 100°C e (b) de permanência em 100°C

pelo concreto, onde é possível observar que o aumento da espessura do cobrimento de concreto em 25 mm pode reduzir em até 194,2°C a temperatura atingida pela armadura longitudinal.

No que se refere à influência da composição de concreto na distribuição de temperaturas, não foi possível identificar relação entre os traços estudados e os valores de temperatura registrados. Apesar de as barras com diâmetro de 10mm terem apresentado, na maioria dos casos, maiores valores de temperatura do que as de 16mm, não foi possível encontrar relação entre o diâmetro das barras e as temperaturas atingidas. Esta variabilidade nos resultados pode estar atrelada ao deslocamento do concreto que pode acarretar na distribuição de temperaturas que não representem a estrutura como um todo.

A partir dos registros de temperatura ao longo do ensaio, foi possível perceber que todos apresentam um período de tempo no qual a temperatura permanece constante, em torno de 100°C. De acordo com Mehta e Monteiro [24], a temperatura do concreto aumenta somente após a evaporação de toda a água livre no concreto, que ocorre em, aproximadamente, 100°C. Sendo assim, por meio dos registros de temperatura foi possível determinar o tempo necessário para alcançar a temperatura de 100°C em cada ponto de medição (Figura 5a) e o tempo em que os registros permaneceram nesta temperatura (Figura 5b), pois representam o tempo necessário para evaporar toda a água do concreto. Salienta-se que estas informações podem ser importantes para caracterizar o transporte de água nos pilares, fator de influência na ocorrência do deslocamento do concreto.

Verifica-se que existe a tendência ao aumento do tempo para o ponto de medição alcançar a temperatura de 100°C com o aumento da espessura de cobrimento. Isso também pode ser explicado pelo atraso térmico proporcionado pelo concreto às armaduras, onde a ocorrência de deslocamento pode ter influenciado os dados registrados. É possível perceber uma tendência ao aumento no tempo de permanência na temperatura de 100°C com o aumento da espessura de cobrimento e da resistência do traço do concreto utilizado, corroborando com o fato já apresentado de o concreto atuar como uma proteção térmica às armaduras.

Durante a realização dos ensaios de resistência ao fogo foram observados comportamentos distintos entre as amostras, principalmente no que se refere à liberação de água pelos pilares e aos ruídos que pudessem caracterizar a ocorrência do deslocamento do concreto no interior do forno. Como os ensaios foram realizados a cada dois pilares, as análises qualitativas não permitiram distinguir os pilares de sua ocorrência. A duração destas manifestações não ultrapassou 35 minutos do ensaio e foram acompanhadas por liberação de água e vapor pela superfície não exposta às altas temperaturas.

3.3 Avaliação pós incêndio

O aspecto dos 12 pilares após os ensaios é apresentado na Figura 6. É possível verificar que a ocorrência do deslocamento do concreto se deu predominantemente nas arestas dos pilares e em alguns

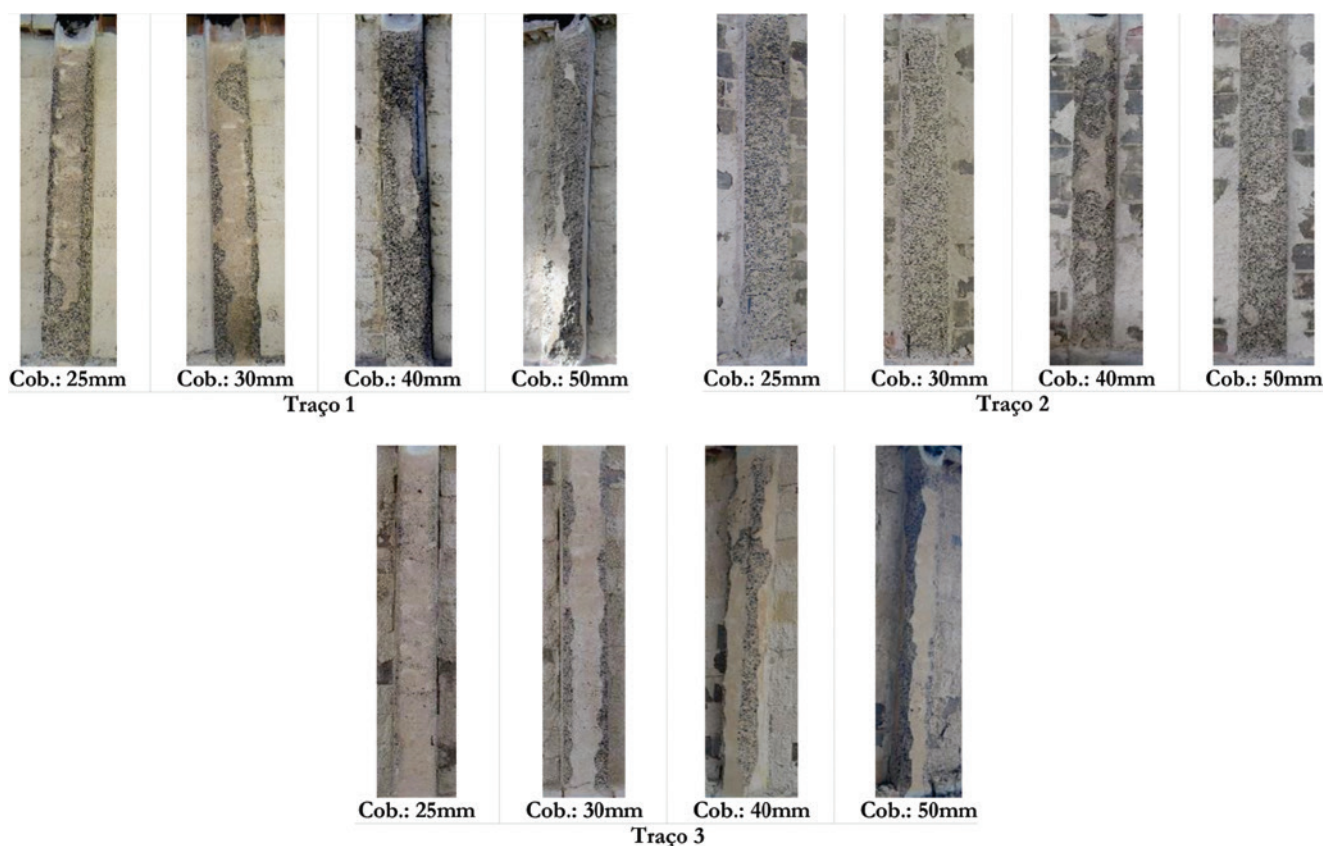


Figura 6
Aspecto dos pilares após os ensaios de resistência ao fogo

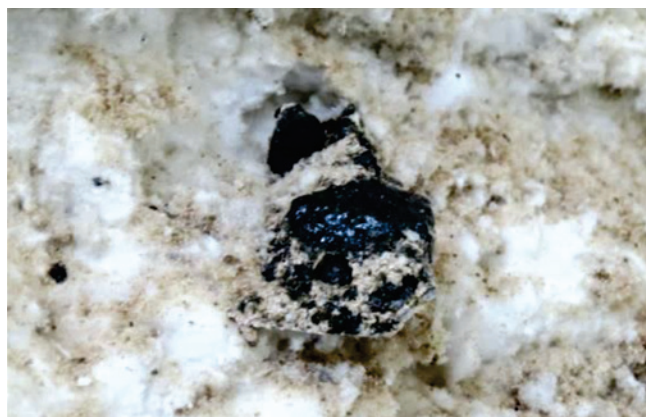


Figura 7
Aspecto final de um pedaço de concreto preso no revestimento interno do forno

pontos alcançou toda a seção transversal exposta ou a exposição da armadura. Este tipo de deslocamento é classificado pela FIB [10] como “deslocamento de aresta” e decorre de tensões térmicas no elemento [5].

Observou-se que a coloração e o aspecto visual na superfície do concreto foram similares em todos os pilares, com o surgimento de pequenos pontos escuros distribuídos aleatoriamente na superfície, decorrência da areia industrial utilizada. Os agregados de origem basáltica apresentaram, em sua magnitude, aspecto vítreo com aparência superficial mais lisa e escura (Figura 7).

Ressalta-se que, apesar de a interface do agregado com a pasta de cimento ser considerada a fase mais frágil do concreto em diversas situações, inclusive no seu comportamento em elevadas temperaturas, verificou-se que o deslocamento ocorreu no interior dos agregados. O comportamento registrado é similar ao apresentado por Hager [25], onde o desenvolvimento de tensões térmicas pela expansão dos agregados e a retração da pasta de

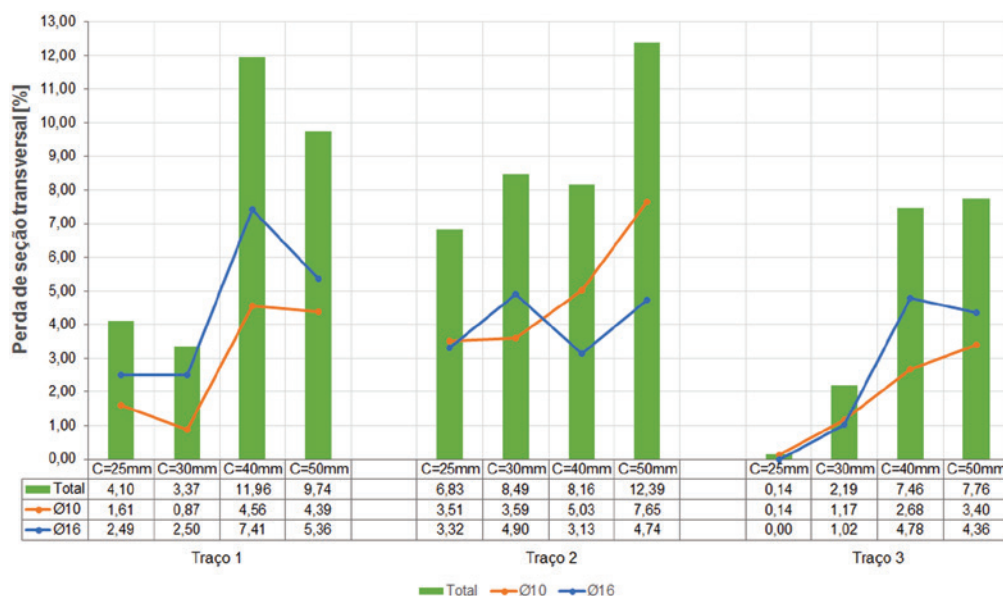


Figura 8
Perda de seção transversal média

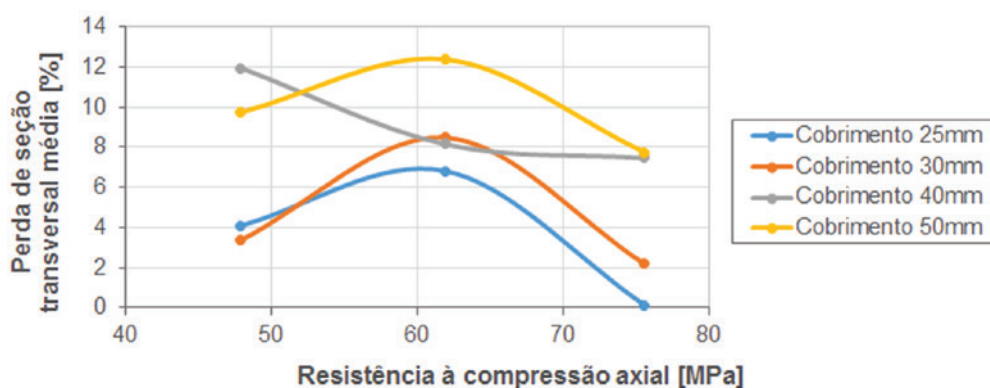
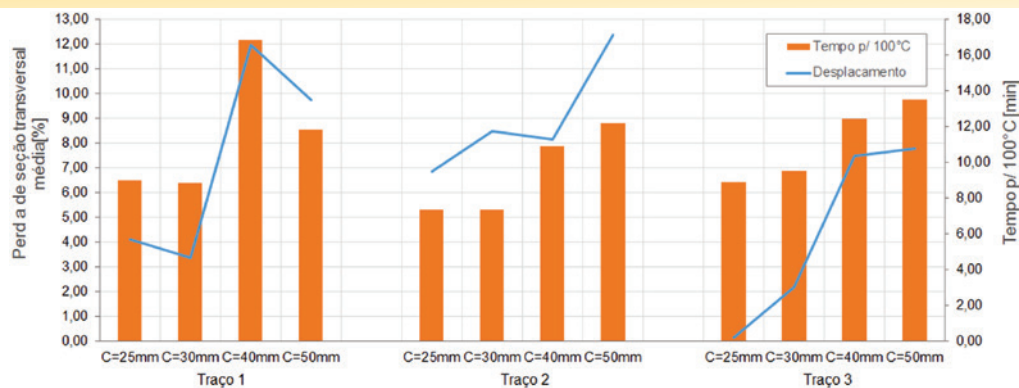


Figura 9
Influência da resistência à compressão no deslocamento

**Figura 10**

Relação entre o deslocamento e o tempo necessário para alcançar a temperatura de 100°C

cimento que o envolve provoca o surgimento de fissuras, que podem ocasionar o fenômeno de deslocamento.

Após os ensaios foi realizada uma inspeção na parte interna do forno, onde foi possível verificar a existência de pedaços de concreto presos no revestimento interno do mesmo (Figura 7). Tal registro, aliado aos de ruídos durante os ensaios, podem ser utilizados para caracterizar a ocorrência do fenômeno de deslocamento do tipo explosivo.

A Figura 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos na determinação da perda de seção transversal média por deslocamento nos pilares.

Observa-se que há uma relação direta da evolução da perda de seção transversal média com o aumento da espessura de cobrimento. Estes resultados vão ao encontro daqueles apresentados por Morita et al. [17], que relatam que o aumento da espessura de cobrimento implica no aumento do deslocamento do concreto.

Na Figura 9 apresenta-se a relação entre os valores de resistência à compressão axial e a perda de seção transversal média.

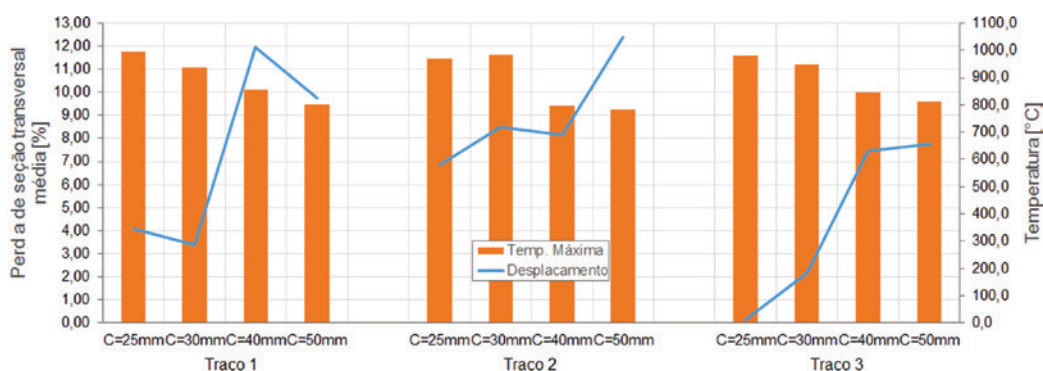
Verifica-se que o pilar do traço 1, com cobrimento de 40 mm, destoou dos pilares de outros traços e que, no geral, o grau de ocorrência do fenômeno de deslocamento pode ser previsto por uma curva onde existem valores críticos de resistência à compressão, de acordo com a espessura de cobrimento utilizada. Observa-se que existe uma tendência ao aumento do deslocamento com o aumento da resistência à compressão axial do concreto até valores da ordem de 60,0 MPa, quando a tendência se inverte e o grau de deslocamento começa a diminuir.

O menor grau de deslocamento em concretos com valores de resistência inferiores a 60,0 MPa pode ser explicado pelo fato de estes concretos serem mais permeáveis e terem uma menor resis-

tência à tração, diminuindo as poropressões e sendo mais frágeis. Por outro lado, o menor grau de deslocamento para valores de resistência superiores a 60,0 MPa pela maior resistência à tração destes e, portanto, podem ser capazes de absorver as tensões que provocam o deslocamento do concreto, constatado também por Ali [26]. Sendo assim, pode-se afirmar que, para as condições estudadas, há um ponto máximo para a ocorrência do fenômeno de deslocamento, neste caso nos pilares de concreto com resistência na ordem de 60,0 MPa, e antes e após o fenômeno é suavizado.

Observou-se que os deslocamentos se deram, em sua maioria, entre os primeiros 5 e 20 minutos de ensaio, assim como o início da liberação de água pela face externa dos pilares, evidenciando-nos a preponderância da poropressão. Em geral, neste período, a temperatura no interior do forno encontra-se entre 500°C e 750°C e a temperatura medida nos termopares localizados na região de cobrimento encontra-se em patamares de 100°C, ou seja, durante o processo de evaporação da água presente no interior do concreto. Assim, é possível que a ocorrência dos deslocamentos registrados tenha ocorrido pelo desenvolvimento do mecanismo termo-hidráulico. A Figura 9 apresenta a relação entre a perda de seção transversal média e o tempo médio de permanência na temperatura de 100°C em cada pilar.

Verifica-se que existe uma relação entre a perda de seção transversal média e o tempo de permanência na temperatura de 100°C com o aumento da espessura de cobrimento para cada traço, apesar de esta não ser linear. Não foi possível identificar tal relação entre os traços analisados, sendo que os pilares do traço 3 apresentaram os maiores valores de tempo de permanência na temperatura de 100°C e, ao mesmo tempo, os menores valores de perda de seção transversal média. Ainda, a ocorrência do deslocamento pode

**Figura 11**

Relação entre o deslocamento e a temperatura máxima

acarretar na redução do tempo de evaporação da água, pois permite a sua migração para o meio externo de forma mais rápida. Sendo assim, é possível que, para os casos onde houve maior deslocamento do que o tempo de permanência na temperatura de 100°C, o deslocamento tenha ocorrido por predominância do mecanismo termo-hidráulico.

Phan et al. [2] dispõem que a temperatura do concreto na profundidade onde há a ocorrência do deslocamento é de 220°C a 280°C, geralmente na região de cobrimento da armadura. Como na maior parte dos casos deste artigo o deslocamento não atingiu a armadura, que se encontrava na temperatura de 100°C no momento em que os ruídos foram registrados, é provável que a temperatura próxima à superfície dos elementos possuísse valores mais elevados, ou ainda, próximos à temperatura de ocorrência do deslocamento supracitada, de acordo com Phan et al. [2]. A Figura 10 apresenta a relação entre a perda de seção transversal média e temperatura máxima média.

Observa-se ainda que, mesmo na ocorrência de maior deslocamento para os pilares de um mesmo traço com maior espessura de cobrimento, houve a redução nos valores de temperatura máxima atingida nas armaduras. Sendo assim, é possível que apesar dos deslocamentos ocasionarem a redução da espessura de cobrimento durante a exposição, tal fenômeno não interfira, de modo significativo, nos valores de temperatura máxima registradas na armadura longitudinal.

4. Conclusão

Com relação aos registros de temperatura nas armaduras longitudinais, foi possível observar uma preponderância da influência da espessura de cobrimento nestas leituras, assim como para a análise dos valores médios máximos de temperatura registrados nas barras, onde o traço e o diâmetro da barra não apresentaram influência nas condições analisadas. Verificou-se ainda que a espessura de cobrimento é a principal variável que influencia no tempo necessário para alcançar a temperatura de 100°C, enquanto que a variável relação a/c é a única que influencia no tempo de permanência na temperatura de 100°C.

O registro de ruídos, por ser qualitativo, não permitiu identificar relação com as variáveis de estudo. Entretanto, verificou-se que, em sua maioria, estes ocorreram entre 5 min e 20 min após o início da exposição, quando a temperatura no interior do forno encontrava-se entre 500°C e 750°C e a temperatura nos pilares era de 100°C, ou seja, durante o processo de evaporação da água presente no interior do concreto.

Após os ensaios de resistência ao fogo, verificou-se que a ocorrência de deslocamento se deu predominantemente nas arestas dos pilares e, em alguns casos, chegou a alcançar toda a seção transversal exposta. Foi verificada ainda a ocorrência de outros tipos de deslocamentos, como de agregado e pós-resfriamento, de acordo com a classificação apresentada pela literatura. A inspeção do forno após o ensaio revelou pedaços de concreto presos no revestimento interno do mesmo, o que caracteriza sua ocorrência de modo explosivo.

Constatou-se que tanto o traço de concreto como a espessura de cobrimento exercem influência na ocorrência do fenômeno de deslocamento, com preponderância do primeiro. Por meio da ve-

rificação da influência das propriedades do concreto observou-se a tendência ao aumento da perda de seção transversal média com o aumento da resistência à compressão do concreto até aproximadamente 60,0 MPa, quando esta tendência se inverte. O menor grau de deslocamento em pilares com resistência menor do que 60,0 MPa pode ser explicada pela maior porosidade e permeabilidade destes concretos que permitem o alívio das pressões causadas pela vaporização da água, enquanto pilares com resistência maior do que 60,0 MPa apresentam maior resistência à tração, capazes de absorver as tensões provocadas.

De forma geral, é possível concluir que a ocorrência do fenômeno de deslocamento não esteja ligado somente às propriedades intrínsecas do concreto, sendo que a espessura de cobrimento apresenta influência em tal fenômeno. Mediante as análises realizadas nos pilares durante e após os ensaios de resistência ao fogo, pode-se afirmar que mesmo na ocorrência do deslocamento em nenhum caso foi verificada a possibilidade de colapso do elemento estrutural. A exposição direta das armaduras às elevadas temperaturas, por sua vez, poderia ter ocasionado danos relacionados com a perda de resistência mecânica destas, que seria melhor evidenciada pela presença de carregamento, variável não abordada neste estudo.

Apesar de este estudo contribuir para a compreensão da ocorrência do fenômeno de deslocamento, outras variáveis podem influenciar em sua ocorrência, como pode ser constatado na bibliografia. Sendo assim, sugerem-se trabalhos futuros que avaliem a influência do tipo de agregado empregado na composição do concreto e a imposição de carregamento nas amostras durante os ensaios para permitir a determinação da sua resistência ao fogo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da empresa Molder Estruturas pela fabricação e doação dos pilares de concreto armado utilizados neste estudo e ao Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt Performance e a Unisinos pelo apoio na realização dos ensaios.

6. Referências bibliográficas

- [1] KIRCHHOF, L. D. Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas. 2010. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.
- [2] PHAN, L. T.; MCALLISTER, T. P.; GROSS, J. L.; HURLEY, M. J. NIST Technical Note 1681: best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings. USA: Nat. Inst. Stand. Technol., 2010.
- [3] KHOURY, G. A. Passive fire protection of concrete structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures & Buildings, London, v. 161, n. 3, p. 135-145, 2008.
- [4] KODUR, V. K. R.; DWAIKAT, M. Fire-induced spalling in reinforced concrete beams. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures & Buildings, London, v. 165, n. 7, p. 347-359, 2012.

- [5] ANDERBERG, Y. Spalling phenomena of HPC and OC. In: *Proceeding of the International Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete*, 1., 1997, Gaithersburg. Anais eletrônicos... Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1997. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/PDF/b97074.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2015.
- [6] KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in structural engineering and materials*, New York, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.
- [7] KLINGSCH, E. W. H. Explosive spalling of concrete in fire. 2014. 252 f. Dissertation (Doctor of Sciences) -- Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Zürich, 2014.
- [8] MINDEGUIA, J. C.; CARRÉ, H.; PIMIENTA, P.; BORDERIE, C. L. Experimental discussion on the mechanisms behind the fire spalling of concrete. *Fire and materials*, UK, v. 39, n. 7, p. 619-635, 2014.
- [9] KLEIN JÚNIOR, O. Pilares de concreto armado em situação de incêndio submetidos à flexão normal composta. 2011. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011.
- [10] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling – state-of-art report. Lausanne: fib, 2007. 97 f. (Bulletin d'information, 38).
- [11] HEDAYATI, M.; SOFI, M.; MENDIS, P. A.; NGO, T. A Comprehensive Review of Spalling and Fire Performance of Concrete Members. *Electronic Journal of Structural Engineering*, v. 15, p. 8-34, 2015.
- [12] MD JIHAD MIAH, FRANCESCO LO MONTE, PIERRE PIMIENTA and ROBERTO FELICETTI. Effect of Biaxial Mechanical Loading and Cement Type on the Fire Spalling Behaviour of Concrete. 9th Structures in Fire Conference. Princeton, 2016.
- [13] M. Guerrieri and S. Fragomeni, "An experimental investigation into the influence of specimen size, in-situ pore pressures and temperatures on the spalling of difference size concrete panels when exposed to a hydrocarbon fire," vol. 01002, 2013.
- [14] ALI, F. Is high strength concrete more susceptible to explosive spalling than normal strength concrete in fire? *Fire and Materials*, UK, v. 26, p. 127-130, 2002.
- [15] SANJAYAN, J. G. Fire resistance of HSC. *Fire Resistance of High Strength Concrete*, p. 123– 128, 1994.
- [16] KODUR, V. K. R. Fire performance of high-strength concrete structural members. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Construction Technology Update No. 31, 1999.
- [17] MORITA, T.; NISHIDA, A.; YAMAZAKI, N.; SCHNEIDER, U.; DIEDERICH, U. An experimental study on spalling of high strength concrete elements under fire attack. In: *Fire Safety Science - Proceedings of the International Symposium*, 6., 2001, Marne-La-Vallée. Anais eletrônicos... Marne-La-Vallée: International Association for Fire Safety Science. Disponível em: <<http://www.iafss.org/publications/fss/6/855/view>>. Acesso em: 23 ago. 2015. p. 855-866.
- [18] KODUR, V. K. R.; RAUT, N. K. Fire resistance of reinforced concrete columns – state-of-the-art and research needs. *ACI Special Publication*, v. 255, p. 97-124, 2008.
- [19] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 834: fire resistance tests – Elements of building construction. Geneva, 2014.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12655: concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 2015b.
- [22] TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed. São Paulo; IBRACON, 2011. 2v. cap. 12, p. 415-451.
- [23] WALD, F.; SILVA, L. S.; MOORE, D. B.; LENNON, T.; CHLADNÁ, M.; SANTIAGO, A. Experimental behavior of a steel structure under natural fire. *Fire Safety Journal*, v. 41, p. 509–522, 2006.
- [24] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [25] HAGER, I. Behavior of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Poland, v. 61, n. 1, p. 145-154, 2013.
- [26] ALI, F.; O'CONNOR, D.; ABU-TAIR, A. Explosive spalling of high-strength concrete columns in fire. *Magazine of Concrete Research*, UK, v. 53, n. 3, p. 197-204, 2001.
- [27] JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (JIS). JIS A 1304: method of fire resistance test for structural parts of building. Japan, 1994.