



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE PORTANTE DE PILARETES DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS AO EFEITO COMBINADO DE CORROSÃO E ALTAS TEMPERATURAS

*Evaluation of the holding capacity of reinforced concrete prisms under the
combined effect of corrosion and high temperatures*

Autor: Eng. Civil Felipe Gabbardo Gomes (fgabbardo@hotmail.com)

Orientador: Prof. PhD. Ângela Gaio Graeff (angel.graeff@gmail.com)

RESUMO

Em estruturas de concreto armado, a corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas que mais causam transtornos e prejuízos às estruturas, inclusive podendo comprometer a estabilidade delas e, conseqüentemente, a segurança dos usuários. Essas estruturas também são propensas às situações de altas temperaturas, como na ocorrência de incêndios. Nestas situações, a heterogeneidade do concreto armado é realçada, pois ocorrem dilatações térmicas diferenciais nos seus componentes, causando reduções progressivas de resistência e rigidez. Este trabalho buscou quantificar o efeito da sinergia de ambos os processos de deterioração na capacidade portante de elementos estruturais de concreto armado do tipo pilares, que foram moldados e submetidos à corrosão de suas armaduras e, posteriormente, a altas temperaturas. Após a degradação dos pilaretes, estes foram rompidos à compressão, sendo verificadas as capacidades de carga, e os resultados foram comparados entre si. Os resultados da pesquisa mostram, em suma, que os pilaretes submetidos a altas temperaturas sofreram drásticas reduções na capacidade de carga, sendo mais acentuada para aqueles que tiveram armaduras corroídas. Também foi possível verificar que, comparando os resultados de pilaretes com a mesma degradação por corrosão, sendo a exposição a altas temperaturas a variável dentre eles, a redução da capacidade de carga residual é proporcionalmente maior conforme mais armaduras foram corroídas, o que caracteriza a sinergia destes dois processos de degradação.

Palavras-chave: Incêndio. Corrosão. Altas Temperaturas. Concreto Armado.

ABSTRACT

In reinforced concrete structures, the corrosion of reinforcement is one of the pathological manifestations that cause the most disturbance and damage to the structures, including being able to compromise their stability and, consequently, the safety of users. These structures are also prone to high temperature situations, such as fires. In these situations, the heterogeneity of reinforced concrete is enhanced, as differential thermal expansion occurs in its components, causing progressive reductions in strength and stiffness. This work sought to quantify the effect of the synergy of both deterioration processes on the bearing capacity of reinforced concrete structural elements of the pillar type, which were molded and subjected to the corrosion of their reinforcement and, subsequently, to high temperatures. After the degradation of the prisms, they were broken to compression, the loading capacities were checked, and the results were compared with each other. The research results show, in a few words, that the prisms subjected to high temperatures suffered drastic reductions in load capacity, being more pronounced for those who had corroded armor. It was also possible to verify that, comparing the results of prisms with the same degradation by corrosion, the exposure to high temperatures being the variable among them, the reduction of the residual load capacity is proportionally greater as more reinforcements were corroded, which characterizes the synergy these two degradation processes.

Keywords: Fire. Corrosion. High temperatures. Reinforced Concrete.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a área da Segurança contra Incêndios tem chamado atenção da sociedade e profissionais devido à quantidade e proporção de incêndios que tem ocorrido no Brasil e no mundo. A partir do incêndio da Boate Kiss, percebe-se uma evolução nesta área no estado do Rio Grande do Sul, tanto em questão de estudos e legislação quanto da correta aplicação por parte dos usuários e profissionais. Entretanto, há muito para evoluir e muitos desafios a serem superados, como exemplo para as edificações existentes, que a cada ano sem a devida manutenção tornam-se mais suscetíveis ao mau-funcionamento de equipamentos e/ou instalações, que podem iniciar um incêndio, como as instalações elétricas, ou os que foram instalados justamente para combater o incêndio, como alarmes e hidrantes. Outro agravante é que, no Brasil, a grande maioria das edificações existentes foi construída em uma época em que eram projetadas e instaladas menos medidas de proteção contra incêndio nas edificações.

O concreto armado, técnica mais utilizada no mundo para a construção de estruturas, possui boa resistência ao fogo, porém com o decorrer do tempo pode sofrer com processos de deterioração que comprometem não só a durabilidade da estrutura, como também o desempenho estrutural dela. A deterioração do concreto armado pode ocorrer por diversas formas como pela ação de sulfatos e outras substâncias agressivas, fissuração, desgaste mecânico, reações expansivas, corrosão de armaduras e exposição a altas temperaturas. Os dois últimos mecanismos de deterioração citados tem grande relevância na redução do desempenho, mas atuam de formas diferentes e sem qualquer correlação para ocorrência de um ou de outro, podendo ocorrer de uma estrutura já degradada pela corrosão também ser submetida a um incêndio. A corrosão de armaduras reduz a seção transversal das barras de armadura, diminui a resistência à tração do aço, aumenta as tensões internas de tração, ocasionando a fissuração do concreto e possível deslocamento do concreto de cobertura, além de diminuir a aderência entre a barra de armadura e o concreto, dentre outros danos à estrutura (GRAEFF, 2007).

Enquanto a corrosão de armaduras atua de forma lenta e contínua, a exposição do concreto armado a altas temperaturas, ou incêndios, é um evento com pouca ocorrência e sem grande continuidade, mas que pode causar danos severos e de forma abrupta à estrutura. Em altas temperaturas, a capacidade resistente e módulo de elasticidade do concreto e aço é reduzida



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

em função da degradação das propriedades mecânicas dos materiais, além da redução da área resistente devido ao efeito de lascamento da superfície, ou *spalling*, ocasionando ainda a exposição do aço ao fogo (SILVA et al., 2008). O incêndio é caracterizado por uma curva de temperatura em função do tempo, e devido às particularidades de cada incêndio, adotou-se uma curva padronizada para ensaios, sendo a mais recomendada internacionalmente é dada pela ISO 834 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1999). Para a utilização desta curva, que não corresponde a um incêndio real e não possui um valor máximo de temperatura, deve-se utilizar o TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo), entendido como o tempo mínimo para que os elementos estruturais resistam a uma ação térmica padronizada de um ensaio laboratorial.

Ao longo dos anos, muitos grupos de pesquisa têm se concentrado na avaliação do comportamento de elementos estruturais expostos à corrosão e, mais recentemente, expostos ao fogo. Na área de corrosão de estruturas, pesquisas utilizaram com sucesso o ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM), como Adamatti (2016), que analisou a influência de espaçadores para entrada de íons de cloreto no concreto armado, e Torres (2006), que avaliou a sensibilidade do ensaio frente a variações do método, definindo as condições padrão mais adequadas. Ainda, o trabalho de Graeff (2007) avaliou os efeitos da propagação da corrosão em elementos de concreto armado. Na área de incêndio em estruturas, Lima (2005) analisou as alterações microestruturais e as perdas de resistência de pastas, argamassas e concretos em altas temperaturas, além da contribuição do emprego de fibras de polipropileno para minimizar o fenômeno de deslocamento explosivo. Bidinotto (2018) realizou a moldagem de pilaretes, com as mesmas dimensões desta pesquisa, de concreto armado com concretos de diferentes classes de resistência a fim de analisar a capacidade de carga residual e *spalling*. Já para os trabalhos que analisaram danos causados pela corrosão e elevadas temperaturas, pode-se citar Caetano (2008), que estudou o comportamento da aderência em elementos de concreto armados submetidos a essas situações, e Farias (2015), a qual este trabalho foi desenvolvido para dar continuidade e aprofundamento. A principal diferença deste trabalho para o de Farias (2015) é que neste foi realizado o ensaio de aceleração da corrosão em duas faces do pilarete, porém não foi realizada a reparação de armaduras após a corrosão.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Poucos trabalhos relacionaram estes dois processos de degradação, como Topçu et al. (2010), que visou quantificar as propriedades mecânicas, através de ensaios de tração, de armaduras corroídas e não corroídas em corpos de prova submetidos a altas temperaturas. Visando contribuir com a redução da lacuna de pesquisas sobre os efeitos combinados de dois processos de deterioração, este trabalho tem o objetivo de quantificar, através da redução da capacidade de carga, o efeito da sinergia de elementos estruturais de concreto armado, do tipo pilares, submetidos à corrosão de armaduras e altas temperaturas (AT).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do plano experimental foram moldados 9 pilaretes e 36 corpos de prova cilíndricos. Os pilaretes possuem seção de 20x20 cm, sendo a dimensão mínima estabelecida por norma, e altura de 60 cm, que possui limitação devido às dimensões internas do forno para o ensaio de altas temperaturas (AT), além de estar próximo do limite de altura tolerada pela prensa hidráulica, utilizada para avaliar a capacidade de carga. Os cilindros, que possuem 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, foram moldados para ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto sem degradação e do concreto exposto a altas temperaturas. O Quadro 1 apresenta um resumo dos pilaretes moldados agrupados conforme processos de degradação a que foram expostos.

Quadro 1: Pilaretes moldados e seus respectivos processos de degradação

Grupo	Pilarete	Processo de Degradação
A	P1 e P4	Nenhum (referência)
B	P2	Corrosão (1 face)
C	P5 e P8	Corrosão (2 faces)
D	P7	AT
E	P6	Corrosão (1 face) + AT
F	P3 e P9	Corrosão (2 faces) + AT

(fonte: elaborado pelo autor)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a confecção dos pilaretes, corpos de prova cilíndricos e argamassa para capeamento foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), proveniente do mesmo lote, cujas características estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2: Caracterização do CP V-ARI

Ensaio Físicos	Metodologia	Un.	Resultado	Exigências	
Área específica (Blaine)	NM 76/98	cm ² /g	4.613	≥ 3.000	
Massa específica	NM 23/01	g/cm ³	3,00	N/A	
Índice de finura - # 75 µm (n° 200)	NBR 11579/13	%	0,13	≤ 6,0	
Resíduo na peneira #325	NBR 9202/85	%	1,12	N/A	
Água de consistência normal	NM 43/03	%	29,2	N/A	
Início de pega	NM 65/03	min	151	≥ 60	
Fim de pega	NM 65/03	min	211	≤ 600	
Expansibilidade à quente	NBR 11582/12	mm	0,00	≤ 5,0	
Ensaio Químicos	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências	
Resíduo Insolúvel - RI	NM 15/12	%	0,74	≤ 1,0	
Perda ao fogo - PF	NM 18/12	%	0,74	≤ 4,5	
Óxido de Magnésio - MgO	NM 14/12	%	1,28	≤ 6,5	
Trióxido de Enxofre - SO ₃	NM 16/12	%	3,21	≤ 4,5	
Anidrido Carbônico - CO ₂	NM 20/12	%	2,87	≤ 3,0	
Ensaio Mecânicos - Resistência à Compressão	Metodologia	Un.	DP	Resultado	Exigências
1 dia	NBR 7215/96	MPa	2,24	28,5	14,0
3 dias			2,19	43,5	24,0
7 dias			2,65	48,7	34,0
28 dias			1,54	57,9	N/A

DP = desvio padrão. N/A = não aplicável. Un. = unidade.

(fonte: fabricante)

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia média proveniente do Rio Jacuí na região metropolitana de Porto Alegre, cuja granulometria está apresentada no Quadro 3.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Quadro 3: Granulometria do agregado miúdo – areia média

Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,75	0,2	0,2
2,36	3,8	4,0
1,18	10,0	14,0
0,6	29,9	43,9
0,3	45,3	89,2
0,15	0,1	89,3
Fundo	10,7	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		2,36
Módulo de finura		2,40
Massa específica (g/cm ³)		2,63

(fonte: elaborado pelo autor)

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi rocha britada de origem basáltica, cuja granulometria está apresentada no Quadro 4.

Quadro 4: Granulometria do agregado graúdo – brita

Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
12,5	0,4	0,4
9,5	10,4	10,8
6,3	38,9	49,7
4,75	19,5	69,2
2,36	19,3	88,5
1,18	5,3	93,8
0,6	2,5	96,3
0,3	2,0	98,3
0,15	1,7	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		12,50
Massa específica (g/cm ³)		2,90

(fonte: elaborado pelo autor)

3.2 Métodos

3.2.1 Montagem das armaduras

As armaduras foram executadas com barras de aço CA-50, com resistência característica de 500 MPa, e o processo de corte e dobra das barras foi realizado pelo próprio fabricante. As

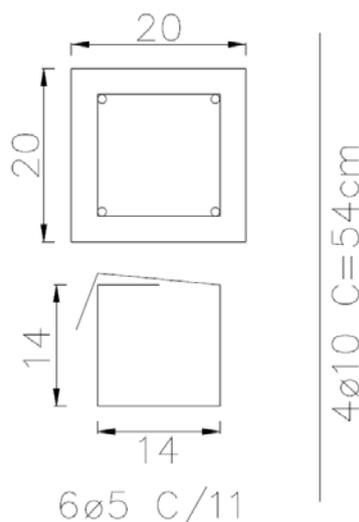


Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

quatro barras longitudinais possuem comprimento de 54 cm e 10 mm de diâmetro, sendo o diâmetro mínimo para pilares conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). A armadura transversal é formada por seis estribos de 5 mm de diâmetro, 14 cm de comprimento e espaçados a cada 11 cm. Os pilaretes possuem cobrimento de 3 cm, de acordo com a espessura recomendada para pilar em um ambiente urbano, classe de agressividade II, na NBR 6118 (ABNT, 2014). A Figura 1 apresenta o detalhamento da armadura, que corresponde a uma capacidade de carga teórica de 1359 kN, considerando pilares curtos e com compressão centrada e desconsiderando os coeficientes de minoração do concreto e do aço, assim como os efeitos de degradação da exposição a altas temperaturas e/ou corrosão das armaduras.

Figura 1: Detalhamento da armadura



(fonte: elaborado pelo autor)

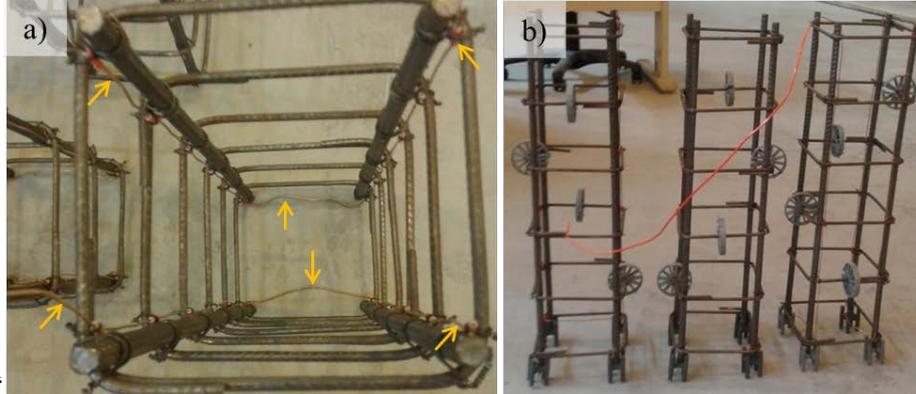
Após a montagem das armaduras, foi necessária a colocação de um fio de cobre paralelo às barras de armadura longitudinal que seriam corroídas de forma a permitir a aplicação de diferença de potencial necessária para a aceleração da corrosão das barras de acordo com o método CAIM. A montagem das armaduras e colocação do fio de cobre para ensaio de corrosão foi realizada de acordo com o trabalho de Farias (2015), sendo posicionado um fio de cobre para cada face do pilar que será submetido à corrosão (Figura 2a). Depois de finalizada a montagem, foram posicionados espaçadores de plástico tipo radial nas laterais das armaduras e tipo cadeirinha na base da armadura a fim de garantir o cobrimento (Figura 2b).



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 2: a) Vista superior da armadura com os dois fios de cobre b) Armaduras da primeira concretagem



(fonte: elaborado pelo autor)

3.2.2 Concretagem, moldagem e cura

Foram planejadas três concretagens, nas quais em cada uma foram moldados três pilaretes, assim como doze corpos de prova cilíndricos, sendo estes separados em grupos de 3. O Quadro 5 apresenta um resumo da quantidade de amostras moldadas em cada concretagem e dos respectivos processos de degradação.

Quadro 5: Quantidade de amostras submetidas a cada processo de degradação e posterior ensaio

Concretagem	Pilarete		CPs cilíndricos		
	N°	Degradação	Grupo	Degradação	Ensaio
1 ^a	P1	Nenhum (referência)	G1	Nenhum	Módulo de Elasticidade
	P2	Corrosão (1 face)	G2	Nenhum	Compressão
	P3	Corrosão (2 faces) + AT	G3	AT	Compressão
			G4	AT	Módulo de Elasticidade
2 ^a	P4	Nenhum (referência)	G5	Nenhum	Módulo de Elasticidade
	P5	Corrosão (2 faces)	G6	Nenhum	Compressão
	P6	Corrosão (1 face) + AT	G7	AT	Compressão
			G8	AT	Módulo de Elasticidade
3 ^a	P7	AT	G9	Nenhum	Módulo de Elasticidade
	P8	Corrosão (2 faces)	G10	Nenhum	Compressão
	P9	Corrosão (2 faces) + AT	G11	AT	Compressão
			G12	AT	Módulo de Elasticidade

CPs = corpos de prova. AT = altas temperaturas.

(fonte: elaborado pelo autor)

A proporção do traço de concreto utilizado foi de 1: 2,9: 3,6 (cimento:areia:brita) com relação água/cimento (a/c) igual a 0,66 e foi determinado com objetivo de atingir resistência à



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

compressão média de 25 MPa aos 28 dias, bastante utilizada nos pilares das edificações e com maior porosidade para realização do ensaio CAIM.

O processo de concretagem, moldagem nas formas e adensamento foi realizado conforme o trabalho de Farias (2015). Como a câmara úmida se encontrava em manutenção, os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a concretagem, sendo cobertos com manta geotêxtil e mantidos molhados para realizar a cura durante 21 dias.

3.2.3 Aceleração da corrosão

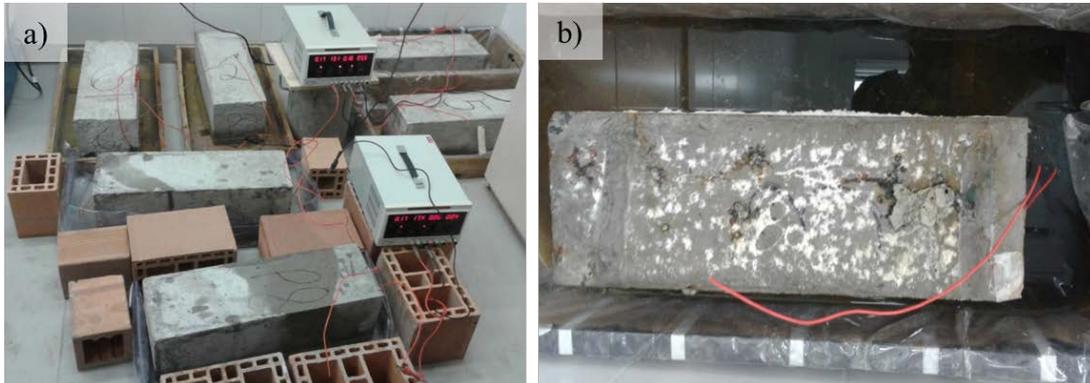
Visto que a corrosão é um processo que ocorre lentamente, podendo levar muitos anos para causar um efeito significativo na estrutura, foi utilizado o ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada), empregado pela primeira vez na UFRGS por Lima (1990) e utilizado com sucesso em diversos trabalhos posterior. Para que o experimento atingisse o grau de corrosão com maior precisão, o ensaio CAIM foi modificado para trabalhar com uma menor densidade de corrente, alterando o estímulo elétrico de tensão constante para corrente constante. O grau de corrosão, no qual se pretende a perda de massa de 10% das barras da armadura, é atingido com 30 dias de ensaio para cada uma das duas faces do pilarete (GRAEFF, 2007). A corrente imposta foi de 169,6 mA para obter uma taxa de corrosão de $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, e foram preparados recipientes com solução de cloretos de 35 g/l para imersão de uma das faces do pilaretes. O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos de Farias (2015), porém com a interligação de pares de pilaretes em série e com mais 30 dias de corrosão na outra face dos pilaretes do grupo C e F. A Figura 3 mostra os pilaretes durante o ensaio CAIM.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 3: a) Pilaretes submetidos ao ensaio CAIM b) Pilarete P3 durante corrosão na outra face



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a retirada dos pilarete da solução de ensaio, é possível visualizar os efeitos causados pela corrosão nas armaduras, conforme mostra Figura 4. Destacam-se os cloretos que emergiriam na face do pilarete ao longo do perímetro da barra da armadura, além dos produtos da corrosão espalhados pelos poros, capilares e fissuras na face do concreto.

Figura 4: Pilaretes após ensaio CAIM



(fonte: elaborado pelo autor)

3.2.4 Exposição a altas temperaturas

A exposição dos pilaretes a altas temperaturas foi realizado através de um forno elétrico com potência de 12kW/h e limite de temperatura de até 1340 °C. O forno possui controlador eletrônico instalado na lateral externa com a função de programar a taxa de aquecimento e o patamar de temperatura a ser mantido. O monitoramento da temperatura interna ao forno foi realizado através de um termopar tipo K, instalado através de um orifício com lã de rocha na



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

face superior do forno, conectado a um sistema de aquisição de dados ligado a um computador. Cada pilarete foi disposto individualmente dentro do forno sobre tijolos maciços e sob uma tela de aço visando à proteção das resistências do forno em caso de ocorrência do fenômeno de spalling do concreto, conforme Figura 5. Após os pilaretes, foi ensaiada metade dos CPs de cada vez no forno.

Figura 5: Alocação do pilarete dentro do forno



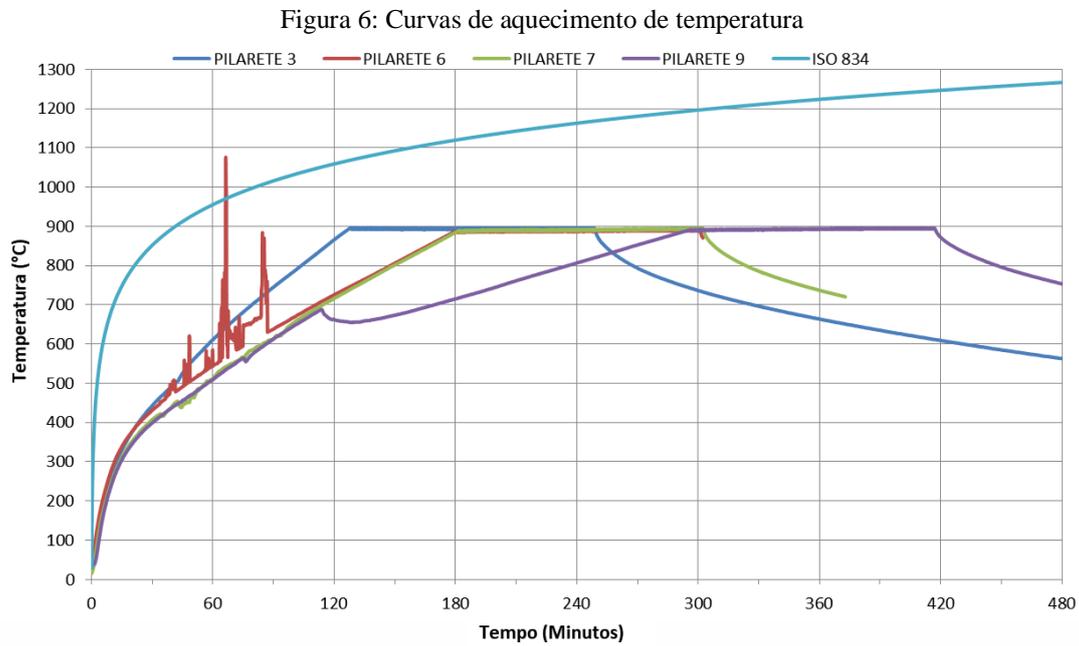
(fonte: elaborado pelo autor)

O forno foi programado para aquecer à potência máxima até atingir a temperatura de $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\%$, que representa a temperatura comumente atingida em incêndios de edificações convencionais. O processo de aquecimento até atingir o patamar de temperatura previsto demandou cerca de 130 min para o pilarete P3, 180 min para os pilaretes P6 e P7, e 300 min para o pilarete P9 e após isso, foram mantidos nesta temperatura por 2 horas. Para exemplificar, o TRRF de 120 min é exigido para a maioria das ocupações acima de 30 metros de altura, de acordo com NBR 14432 (ABNT, 2001). A Figura 6 demonstra as curvas de temperatura no forno até o início do resfriamento em cada ensaio, assim como a curva padrão de incêndio indicados tanto na ISO 834 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1999) como na NBR 5628 (ABNT, 2001). Nota-se que houve um ruído no sistema de aquisição de temperatura durante o aquecimento do pilarete P6, assim como provavelmente tenha ocorrido algum problema técnico no forno durante o aquecimento do pilarete P9.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)



(fonte: elaborado pelo autor)

As Figuras 7 a 10 apresentam o estado de degradação dos pilaretes devido à exposição a altas temperaturas. Nota-se a grande perda de material nas faces dos pilaretes, principalmente nas que tiveram as armaduras corroídas.

Figura 7: Pilarete P7 após exposição a altas temperaturas



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 8: Pilarete P6 após exposição a altas temperaturas



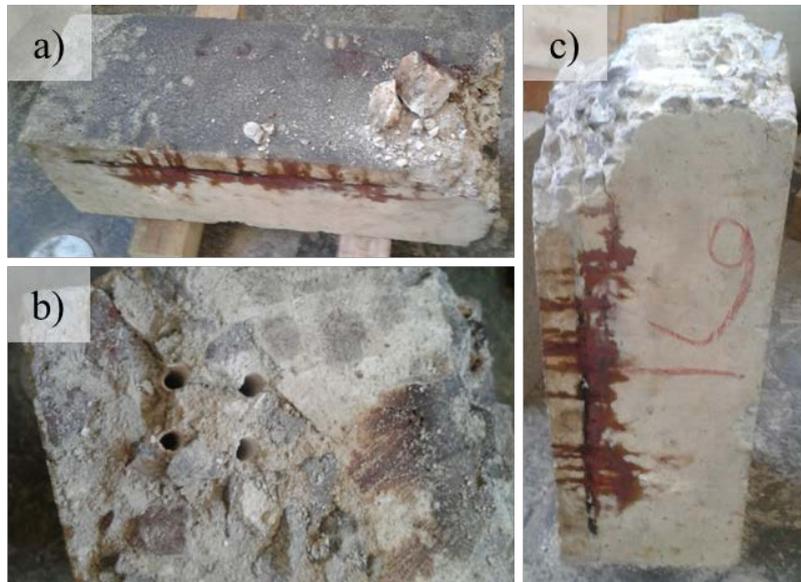
(fonte: elaborado pelo autor)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 9: a) Pilarete P9 após exposição a altas temperaturas b) Vista da seção onde havia espaçador c) Após limpeza do concreto solto



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10: a) Pilarete P3 dentro do forno após ensaio b) Pilarete P3 retirado do forno



(fonte: elaborado pelo autor)

3.2.5 Ensaio de capacidade de carga, resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os ensaios de capacidade de carga dos pilaretes foram realizados no mesmo dia, por isso as idades de ruptura variam conforme a data da concretagem. Os pilaretes da 1ª concretagem foram ensaiados aos 196 dias, enquanto que os da 2ª e 3ª foram ensaiados aos 189 e 174 dias, respectivamente. No dia seguinte, foram realizados os ensaios de resistência à compressão



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

para os CPs cilíndricos e, no próximo dia, foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade para os CPs cilíndricos. Portanto, as idades dos concretos ensaiados foram de 174 dias até 198 dias, e a esta diferença não deve influenciar nos resultados devido à utilização do CP V-ARI que atinge altas resistências em baixas idades.

A fim de obter uma distribuição uniforme das forças, foi executada planificação da superfície através de capeamento com argamassa de alta resistência para os pilaretes e também para os cilindros submetidos à AT devido à fragilidade do concreto, já para os demais cilindros foi utilizada máquina retificadora nas bases dos mesmos (Figura 11).

Figura 11: a) Pilaretes após capeamento b) CPs cilíndricos após capeamento



(fonte: elaborado pelo autor)

Para os pilaretes expostos a AT, antes do capeamento, teve que ser realizada reconstituição de seção com a mesma argamassa de alta resistência devido a grande perda de massa, conforme Figura 12.

Figura 12: a) Formas para reconstituição de seção b) Pilarete P9 após reconstituição de seção



(fonte: elaborado pelo autor)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

A prensa hidráulica para os ensaios é da fabricante SHIMADZU, com capacidade de carga de 2000 kN, e a taxa de aplicação de carga dos ensaios foi de 0,45 MPa/seg para os CPs cilíndricos e 18 kN/seg para os pilaretes. O ensaio de compressão para os corpos de prova cilíndricos foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os procedimentos de ensaio de módulo de elasticidade, assim como o cálculo, para os corpos de prova cilíndricos foram realizados conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008).

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio de resistência à compressão do concreto

Os resultados da ruptura a compressão uniaxial dos corpos de prova cilíndricos referência e dos submetidos a altas temperaturas encontram-se no Quadro 6. Devido a dois resultados com diferencial elevado, mais de 20% da média dos outros dois CP da concretagem, os resultados da ruptura do CP G3-3 e G11-3 foram desconsiderados para os cálculos de média, desvio padrão e coeficientes de variação. As idades de ruptura do concreto foram aos 197 dias (1ª concretagem), 190 dias (2ª concretagem) e 175 dias (3ª concretagem).

A média da tensão de referência foi de 35,64 MPa, resultado muito próximo do encontrado no trabalho de Bidinotto (2018) de 34,95 MPa aos 56 dias. As perdas de resistência do concreto submetido à situação de incêndio foram de aproximadamente 85%, valor ligeiramente menor aos 90% encontrados no trabalho de Bidinotto (2018) e 92% no trabalho de Farias (2015). Para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos, a NBR 15200 (ABNT, 2012) fornece a relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas com o concreto à temperatura ambiente: considerando a temperatura de 900 °C é estimado um fator de redução de 92%, enquanto que para a temperatura de 800 °C é estimado um fator de redução de 85%. Cabe ressaltar que é provável que nem todo o CP tenha atingido à temperatura do forno devido à baixa condutibilidade térmica do concreto, ou seja, as faces que estão diretamente expostas ao calor podem ter alcançado os 900 °C, mas o centro deve ter atingido uma temperatura mais baixa.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Quadro 6: Resultados da ruptura a compressão uniaxial dos CPs cilíndricos

Concretagem	Sem Altas Temperaturas			Com Altas Temperaturas			Perda
	Grupo	CP	Tensão Referência (MPa)	Grupo	CP	Tensão Residual (MPa)	
1ª	G2	G2-1	36,12	G3	G3-1	6,09	
		G2-2	36,21		G3-2	5,78	
		G2-3	34,25		G3-3	3,00*	
	Média		35,53	Média		5,94	-83,29%
	Desvio Padrão		1,11	Desvio Padrão		0,22	
Coef. Variação		0,03	Coef. Variação		0,04		
2ª	G6	G6-1	38,53	G7	G7-1	5,77	
		G6-2	37,08		G7-2	5,43	
		G6-3	38,47		G7-3	5,07	
	Média		38,03	Média		5,42	-85,74%
	Desvio Padrão		0,82	Desvio Padrão		0,35	
Coef. Variação		0,02	Coef. Variação		0,06		
3ª	G10	G10-1	35,16	G11	G11-1	3,82*	
		G10-2	33,90		G11-2	4,66	
		G10-3	31,00		G11-3	5,04	
	Média		33,35	Média		4,85	-85,46%
	Desvio Padrão		2,13	Desvio Padrão		0,27	
Coef. Variação		0,06	Coef. Variação		0,06		
Total	Média		35,64	Média		5,41	-84,83%
	Desvio Padrão		2,39	Desvio Padrão		0,51	
	Coef. Variação		0,07	Coef. Variação		0,09	

* Valor descartado para o cálculo de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 Ensaio de módulo de elasticidade do concreto

Os resultados do módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos referência e dos submetidos a altas temperaturas encontram-se no Quadro 7. De acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), a dispersão máxima entre um resultado individual e a média destes resultados não pode ser superior a 5%. Dessa forma, o resultado dos CP G4-1, G8-3 e G12-3 foram descartados, sendo calculada a média apenas com os outros dois resultados de cada concretagem. A média do módulo de elasticidade de referência encontrado foi de 35,32 GPa, sendo um valor muito próximo ao estimado por cálculo de 35,28 GPa, conforme as expressões dadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Foram constatadas perdas de aproximadamente 92% para o módulo de elasticidade do concreto submetido a altas temperaturas, obtendo reduções proporcionalmente maiores que para a resistência à compressão, da mesma forma que é encontrado na literatura (NAUS, 2005).



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Quadro 7: Resultados do módulo de elasticidade dos CPs cilíndricos

Concretagem	Sem Altas Temperaturas			Com Altas Temperaturas			Perda
	Grupo	CP	E (GPa)	Grupo	CP	E (GPa)	
1ª	G1	G1-1	36,49	G4	G4-1	2,56*	
		G1-2	36,55		G4-2	3,30	
		G1-3	35,21		G4-3	3,02	
	Média		36,08	Média		3,16	-91,24%
	Desvio Padrão		0,76	Desvio Padrão		0,20	
Coef. Variação		0,02	Coef. Variação		0,06		
2ª	G5	G5-1	35,95	G8	G8-1	2,80	
		G5-2	37,29		G8-2	2,92	
		G5-3	35,67		G8-3	3,17*	
	Média		36,30	Média		2,86	-92,12%
	Desvio Padrão		0,87	Desvio Padrão		0,08	
Coef. Variação		0,02	Coef. Variação		0,03		
3ª	G9	G9-1	33,34	G12	G12-1	2,79	
		G9-2	33,08		G12-2	2,72	
		G9-3	34,32		G12-3	1,17*	
	Média		33,58	Média		2,76	-91,80%
	Desvio Padrão		0,65	Desvio Padrão		0,05	
Coef. Variação		0,02	Coef. Variação		0,02		
Total	Média		35,32	Média		2,93	-91,72%
	Desvio Padrão		1,47	Desvio Padrão		0,21	
	Coef. Variação		0,04	Coef. Variação		0,07	

* Valor descartado para o cálculo de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

(fonte: elaborado pelo autor)

4.3 Capacidade portante dos pilaretes

O resultado do ensaio de compressão uniaxial dos pilaretes encontra-se no Quadro 8. Para o grupo C e F, foi considerada a média dos resultados.

Quadro 8: Capacidade de carga dos pilaretes

Grupo	Degradação	Pilarete	Capacidade de Carga (kN)	Grupo	Degradação	Pilarete	Capacidade de Carga (kN)
A	Nenhum (referência)	P1	1215*	D	AT	P7	349
		P4	1337				
B	Corrosão (1 face)	P2	1286	E	Corrosão (1 face) + AT	P6	301
C	Corrosão (2 faces)	P5	1279	F	Corrosão (2 faces) + AT	P3	248
		P8	1165			P9	214
		Média				1222	Média

* Valor descartado para o cálculo de média.

(fonte: elaborado pelo autor)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Observa-se que a carga de ruptura do pilarete 1 (referência) foi abaixo dos pilaretes 2 e 5, que sofreram corrosão de armadura, e cerca de 10% abaixo do pilarete 4, o outro de referência. Nos pilaretes que sofreram corrosão de armaduras há redução da seção transversal das barras de armadura e o aumento das tensões internas de tração, ocasionando a fissuração do concreto e a perda de carga de ruptura em comparação à capacidade portante dos pilares de referência. A causa para a capacidade de carga ter sido menor no pilarete P1 pode estar relacionada pelo desalinhamento da base no ensaio de compressão, deixando um dos vértices sem apoio na superfície, como pode ser visto na Figura 13. Esse fato provavelmente ocasionou uma maior concentração de tensão na região oposta a este vértice e, devido a isso, o resultado deste ensaio foi descartado.

Figura 13: Desalinhamento da base no ensaio do pilarete P1



(fonte: elaborado pelo autor)

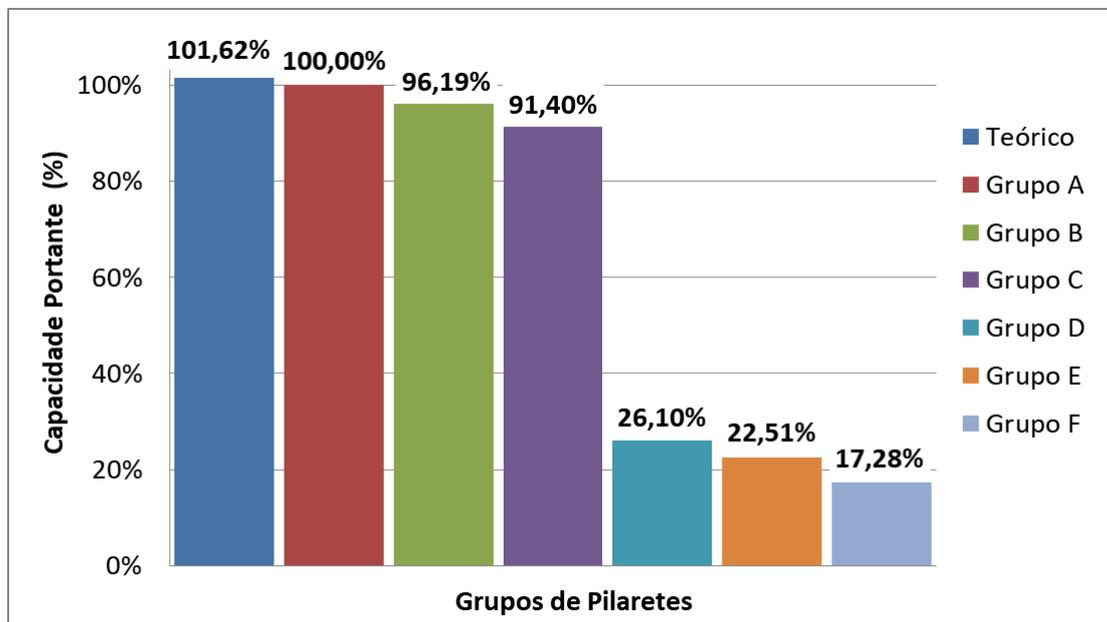
A capacidade de carga teórica é de 1359 kN, sendo assim, o pilar de referência P4 ficou apenas 1,62% abaixo do calculado, com a capacidade de carga de 1337 kN. Utilizando o resultado do P4 como referência (Grupo A), a perda de resistência devida apenas à corrosão foi de aproximadamente 4% e 9% para o Grupo B e Grupo C, respectivamente. Quanto aos pilares submetidos à simulação de incêndio, suas capacidades portantes sofreram uma grande redução: apenas o efeito das altas temperaturas, ocasionaram uma perda de cerca de 74% (Grupo D), enquanto que a corrosão mais altas temperaturas causaram uma perda de aproximadamente 77,5% e 83% para o Grupo E e Grupo F, respectivamente. Esses resultados podem ser visualizados conforme a capacidade de carga (Figura 14) com relação ao pilarete de referência P4 (Grupo A).



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 14: Capacidade portante dos grupos de pilaretes em relação ao de referência (Grupo A)



(fonte: elaborado pelo autor)

A redução de quase 74% do pilarete exposto apenas a altas temperaturas (Grupo D) é menor que o encontrado para os CPs cilíndricos, de quase 85%. Este resultado é esperado, visto que para estes pilaretes não há efeito da flexão da armadura na compressão, ocasionando em uma redução de capacidade portante exclusivamente pela degradação do concreto. Sabendo-se que o pilarete possui um volume de aproximadamente 15 vezes o do CP e que é a temperatura que determina a ruína de um elemento, e não o tempo em que essa temperatura foi atingida, pode-se supor que o núcleo do CP atingiu temperaturas superiores ao do pilarete, obtendo uma maior redução da capacidade portante.

Nota-se que a perda apenas pela corrosão (Grupo B e C) é significativamente menor que as amostras envolvidas com altas temperaturas (Grupo D, E e F), como esperado. Dentre os danos causados pela corrosão, a diminuição da área da seção transversal da armadura e a diminuição da resistência à tração do aço não são significativos em pilaretes curtos ensaiados à compressão uniaxial. Neste caso, os danos mais significativos provavelmente foram causados pelo aumento das tensões internas de tração resultando em fissuração do concreto pelo acúmulo de produtos de corrosão na superfície do aço e a consequente diminuição da aderência entre a barra da armadura. Esses produtos da corrosão circundam pelos poros do concreto e foram visíveis na superfície do pilarete, principalmente na face que ficou submersa

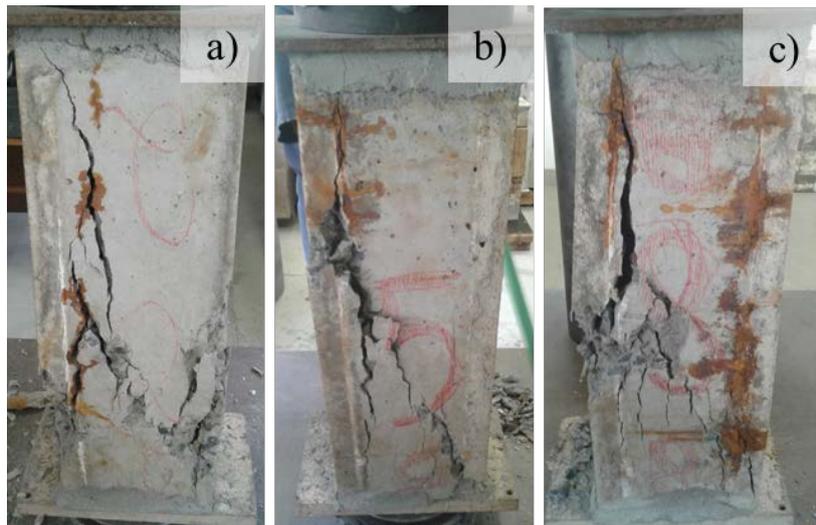


Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

na solução de cloreto. Também foi possível verificar esses produtos nas fissuras que percorrem a face contígua, próximos ao perímetro da barra da armadura, caracterizando as tensões de tração na interface da barra com o concreto. Nas proximidades desta interface ocorreu a ruptura dos pilaretes, como pode ser visto na Figura 15.

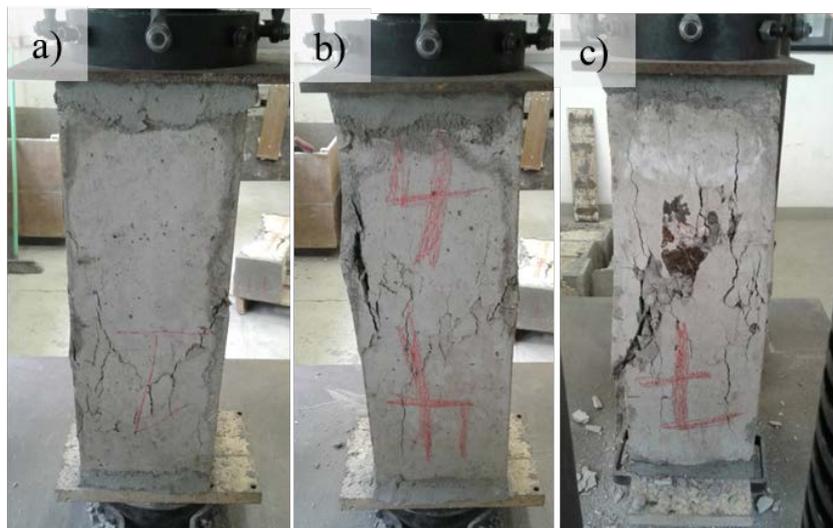
Figura 15: a) Ruptura do P2 b) Ruptura do P5 c) Ruptura do P8



(fonte: elaborado pelo autor)

Já os pilaretes que não sofreram corrosão tiveram ruptura com esmagamento do concreto próximo ao núcleo, com maior intensidade para o que foi exposto a altas temperaturas (Figura 16).

Figura 16: a) Ruptura do P1 b) Ruptura do P4 c) Ruptura do P7



(fonte: elaborado pelo autor)

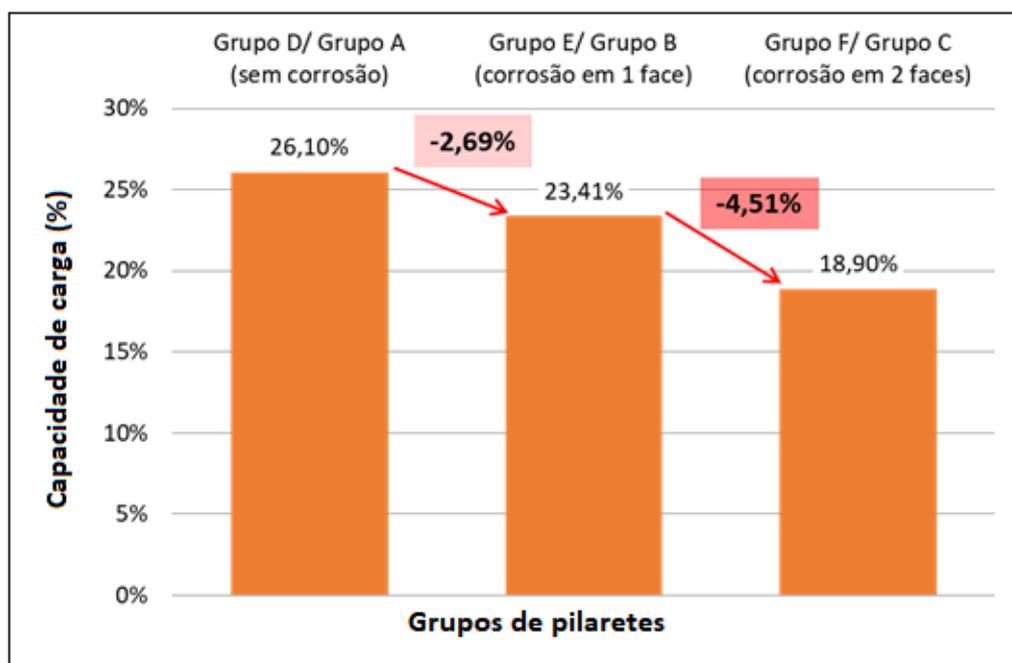


Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Para analisar a sinergia dos efeitos da corrosão e altas temperaturas, foi realizada a comparação dos resultados de pilaretes com a mesma degradação por corrosão, sendo a exposição a altas temperaturas a variável entre eles. Comparando-se pilaretes sem corrosão, Grupo D e Grupo A, o pilarete exposto a AT obteve uma capacidade portante de 26,10% em relação ao não exposto a AT. Já para os pilaretes com corrosão em 1 face, Grupo E e Grupo B, essa porcentagem diminuiu para 23,41%, enquanto que para pilaretes com corrosão em 2 faces, Grupo F e Grupo C, a capacidade portante no pilarete submetido a AT diminuiu ainda mais, sendo 18,90% em relação ao do outro pilarete. A comparação da capacidade de carga de pilaretes submetidos à corrosão e altas temperaturas em relação a pilaretes que não foram submetidos a altas temperaturas pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 17: Capacidade de carga de pilaretes submetidos a altas temperaturas em relação a pilaretes não submetidos a altas temperaturas



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a exposição a altas temperaturas, é possível verificar que a redução da capacidade de carga residual é proporcionalmente maior conforme mais armaduras foram corroídas, o que caracteriza a sinergia destes dois processos de degradação. Visualmente, já havia sido verificado o aumento do número e do tamanho das fissuras originadas na corrosão (Figura 18), além da grande perda de material, principalmente nas extremidades.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

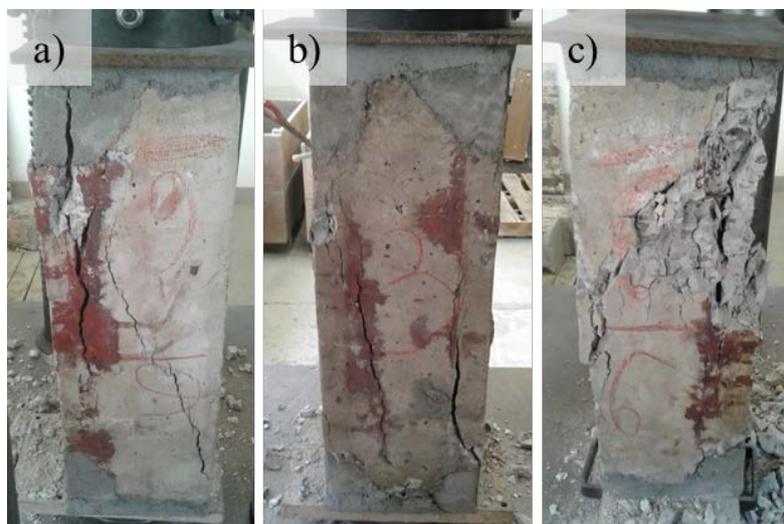
Figura 18: Fissuras em pilaretes corroídos e submetidos a altas temperaturas



(fonte: elaborado pelo autor)

Salienta-se que devido à extrema fragilidade do concreto destes pilaretes, houve grande perda de material nas seções, o que obrigou a recomposição com argamassa de alta resistência, resultando em atenuação da perda da capacidade portante. O concreto situado na face do elemento é o que atinge a maior temperatura no ensaio e, por consequência, é o que tem a maior perda de resistência. Como não é possível recompor com um concreto de mesma característica, a reconstituição da seção é realizada com argamassa de alta resistência inicial para que a ruptura não ocorra devido ao material não degradado. Além disso, as grandes fissuras que percorriam de seção a seção foram interrompidas por este material, o que minimizou os danos causados por elas. A Figura 19 mostram as rupturas dos pilaretes P6, P3 e P9, respectivamente.

Figura 19: a) Ruptura do P6 b) Ruptura do P3 c) Ruptura do P9



(fonte: elaborado pelo autor)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Primeiramente, deve-se ressaltar que estes resultados não devem ser generalizados para elementos estruturais do tipo pilares, visto que as dimensões das amostras, principalmente com relação à altura, não são as comumente utilizadas nos pilares de edificações. Além disso, o ensaio de altas temperaturas foi realizado sem carga, e com a mesma exposição de energia térmica por todas as faces do elemento. Assim, os resultados obtidos tem a finalidade de comparar a perda de capacidade portante de pilaretes ensaiados com diferentes estados de conservação e verificar a sinergia dos processos de corrosão e altas temperaturas nestas amostras de concreto armado.

A partir de uma análise qualitativa, nos pilaretes que sofreram apenas corrosão de armaduras, foi visível verificar fissuras, produtos da corrosão na superfície e uma maior fragilidade do concreto. Entretanto, devido às dimensões do pilarete, principalmente a altura, os danos causados nas barras de aço, como a diminuição da área da seção transversal e da resistência à tração do aço, não são tão significativos para o ensaio de compressão uniaxial. O pilarete submetido apenas a altas temperaturas teve uma queda de aproximadamente 74%, enquanto que os CPs cilíndricos foram de aproximadamente 85%. Essa diferença pode ser explicada pela baixa condutividade térmica do concreto e pela menor massa dos CPs, que devem ter atingido uma temperatura média maior por toda a amostra. A redução do módulo de elasticidade do concreto encontrada nos corpos de prova cilíndricos foi de aproximadamente 92%. Os pilaretes submetidos a altas temperaturas e que tiveram corrosão em uma face e duas faces tiveram redução de aproximadamente 77% e 83%, respectivamente. Comparando os resultados de pilaretes com a mesma degradação por corrosão, sendo a exposição a altas temperaturas a variável dentre eles, a redução da capacidade de carga residual é proporcionalmente maior conforme mais armaduras foram corroídas, o que caracteriza a sinergia destes dois processos de degradação. O pilarete exposto a AT obteve uma capacidade portante de 26,10% em relação ao não exposto a AT, considerando que ambos não possuem armaduras corroídas, enquanto que para os pilaretes com corrosão em 1 face, essa porcentagem diminuiu para 23,41% e para os pilaretes com corrosão em 2 faces a capacidade portante diminuiu para 18,90%.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar estudos experimentais em elementos de pilares mais esbeltos, onde a armadura tem função estrutural, ou ainda em elementos submetidos à flexão, pois nestes casos a sinergia destes processos de degradação poderá ser mais bem observada.

6 AGRADECIMENTOS

O autor agradece a ArcelorMittal, pela doação das barras de aço utilizadas nesta pesquisa, e ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por disponibilizar a infraestrutura, corpo técnico e material para execução do programa experimental.

REFERÊNCIAS

ADAMATTI, Deise Santos. **Análise da eficiência de espaçadores no concreto armado: impacto da corrosão por íons cloreto em diferentes condições de exposição.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5628:** componentes construtivos estruturais - determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:** concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1:** materiais metálicos - ensaio de tração - parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522:** concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 14432:** exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15200:** projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BIDINOTTO, Gabrielle Bacelo. **Análise experimental de capacidade de carga residual e spalling em pilaretes de concreto armado com concretos de diferentes classes de**



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

resistência em situação de incêndio. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CAETANO, Luciane Fonseca. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FARIAS, Vinicius Pereira. **Pilares de concreto armado com armaduras corroídas submetidas a altas temperaturas: capacidade portante pós deterioração.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GRAEFF, Ângela Gaio. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia na modalidade Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1:** fire-resistance tests — elements of building construction — part 1: general requirements. Geneva: ISO, 1999.

LIMA, Maryangela Geimba de. **Influência dos componentes do concreto na corrosão de armaduras.** 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

NAUS, D. J. The effect of elevated temperature on concrete materials and structures - a literature review. **Technical Report - Oak Ridge National Lab. (ORNL)**, Oak Ridge, TN, United States, November 2005.

SILVA, V. P.; PANNONI, F. D.; PINTO, E. M.; SILVA, A. **Segurança das estruturas em situação de incêndio.** In: SEITO, A. I. (coord.). A segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, p. 135-165, 2008.

TOPÇU, I. B.; BOGA, A. R.; DEMIR, A. The effect of elevated temperatures on corroded and uncorroded reinforcement embedded in mortar. **Construction and Building Materials.** Vol. 24, p. 2101-2107, 2010.

TORRES, Ariela da Silva. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.