

COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A ELEVADAS TEMPERATURAS DE INCÊNDIO E O POSTERIOR CHOQUE TÉRMICO POR RESFRIAMENTO BRUSCO

ADENILSON ROBERTO COELHO¹, GEÓRGIA CRISTINA ROVEDA CAMPOS² e HELENA RAVACHE SAMY PEREIRA³

¹Acadêmico de engenharia civil, Católica de Santa Catarina, Joinville-SC, adenilson_rcoelho@hotmail.com;

²Me. em Engenharia Civil, profa. Na Católica de Santa Catarina, georgia.campos@catolicasc.org.br;

³Dra. em Ciência e Engenharia de Materiais. Coordenadora de curso, helena.pereira@catolicasc.org.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
Palmas/TO – Brasil
17 a 19 de setembro de 2019

RESUMO: As estruturas de concreto necessitam de análises minuciosas pós incêndio, pois as elevadas temperaturas e o choque térmico por resfriamento podem apresentar alterações micro estruturais no concreto. Frente a isso, como metodologia de pesquisa, foram utilizados 15 corpos de prova de cada F_{ck} , mantendo-se 3 para cada F_{ck} em temperatura ambiente. Os concretos com F_{ck} de 25, e 40MPa foram expostos às temperaturas de 300, 600, 900 e 1200°C durante 90 minutos. No entanto, além de comparar os dados obtidos dos CP's de referência, correlacionaram-se aos dados do referencial teórico, a fim de verificar a perda de resistência dos concretos resfriados bruscamente. Os resultados demonstraram que as elevadas temperaturas somadas ao choque térmico por resfriamento brusco alteram a resistência característica do concreto. O processo de resfriamento interfere na macro e microestrutura do concreto, maximizando o surgimento de microfissuras e o *Explosive Spalling*.

PALAVRAS-CHAVE: Temperatura, concreto, incêndio, resfriamento, *spalling*, resistência.

BEHAVIOR OF CONCRETE STRUCTURES EXPOSED TO HIGH FIRE TEMPERATURES AND THE BACKTHERMAL SHOCK BY BRUSH COOLING

ABSTRACT: Concrete structures require detailed post fire analysis because high temperatures and thermal shock due to cooling may present micro structural changes in the concrete. Therefore, as a research methodology, 15 specimens of each F_{ck} were used, with 3 being maintained for each F_{ck} at room temperature. The F_{ck} concretes of 25 and 40MPa were exposed at temperatures of 300, 600, 900 and 1200°C for 90 minutes. However, in addition to comparing the data obtained from the reference CPs, they were correlated to the theoretical reference data, in order to verify the loss of resistance of the concretes cooled abruptly. The results demonstrated that the high temperatures added to the thermal shock by abrupt cooling alter the characteristic resistance of the concrete. The cooling process interferes with the macro and micro structure of the concrete, maximizing the appearance of micro-cracks and *Explosive Spalling*.

KEYWORDS: Temperature, concrete, fire, cooling, *spalling*, resistance.

INTRODUÇÃO

O concreto quando aquecido e resfriado bruscamente pode apresentar alterações micro estruturais. As microfissuras ocorrem devido as pressões internas e a desidratação dos Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H), contribuindo ao surgimento de *Explosive Spalling*. Agregados ricos em sílica, tais como os granitos, arenitos, gnaisses entre outros, quando superaquecidos proporcionam patologias nas estruturas de concreto em virtude de sua expansão, ocasionando o *Spalling*. O método de resfriamento brusco também altera as propriedades na pasta de cimento Portland devido a sua reidratação, formando novos componentes cristalizados que se expandem e geram microfissuras,

formando o *Spalling* na zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento. Nas temperaturas de 250 a 300°C para concretos com F_{ck} de 25 e 30MPa, a perda não ocorre. No entanto, em 1000°C, os concretos apresentam diferentes resultados. Expostos até 400°C não têm grandes perdas de resistência. A água livre contida no concreto começa a evaporar a 100°C e desidrata os C-S-H. Além disso, a desidratação, a quebra do C-S-H e a evaporação proporcionam novos poros no concreto, originando novas fissuras e a retração acentuada (COSTA, 2002; SEITO, 2008; SILVA, 2010; HAGER, 2013; SILVA, 2013; GOMES, 2014; SILVEIRA, 2015; CARDEAL, 2015; BRENTANO, 2016; KODUR, 2017; FERNANDES, 2017; GROCKOSKI, 2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram aquecidos 12 corpos de prova de concreto (CP's) para cada F_{ck} de 25 e 40MPa, considerando-se 3 CP's para as temperaturas de 300, 600, 900 e 1200°C, sendo os resultados obtidos comparados aos resultados dos referenciais teóricos e aos valores de resistência dos 3 CP's de referência para os F_{ck} 's analisados, sendo estes mantidos em temperaturas ambientes. O cimento utilizado é o CP-II-Z com pozolana, a areia média tem módulo de finura de 2,6 mm, brita 1 com dimensão característica de 25 mm. O método de dosagem utilizado é o proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland. O traço utilizado é o discriminado na Tabela 1.

Tabela 1: Traço para o concreto

Material	25MPa	40MPa
Cimento (kg)	1	1
Areia (kg)	2,276	1,503
Água (l)	0,60	0,45
Brita (kg)	3,30	2,475

Realizaram-se 30 CP's, sendo 6 CP's para os concretos de referência com F_{ck} de 25 e 40MPa mantidos em temperatura ambiente. Para os ensaios comparativos, produziram-se mais 24 CP's, sendo 3 de cada F_{ck} submetidos durante 90 minutos nas temperaturas de 300, 600, 900 e 1200°C. Após o traço definido, preparou-se os CP's, sendo 15 CP's com F_{ck} de 25MPa e 15 CP's com F_{ck} de 40MPa. Foram aquecidos 3 CP's para cada temperatura, com os F_{ck} 's de 25 e 40MPa. O forno é o industrial Jung, modelo 5753, com taxa de aquecimento de 5°C/min.

Após submetidos às temperaturas por 90 minutos, os CP's são resfriados bruscamente em tanque de concreto completo por água. Os CP's depois de aquecidos e resfriados foram rompidos na máquina EMIC, modelo PC200CS, NO 11202 conforme orientações da NBR 5739 (2007), obtendo-se a resistência aos 28 dias de cura. Os resultados foram comparados aos dos referenciais teóricos e aos valores dos CP's de referência mantidos em temperatura ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

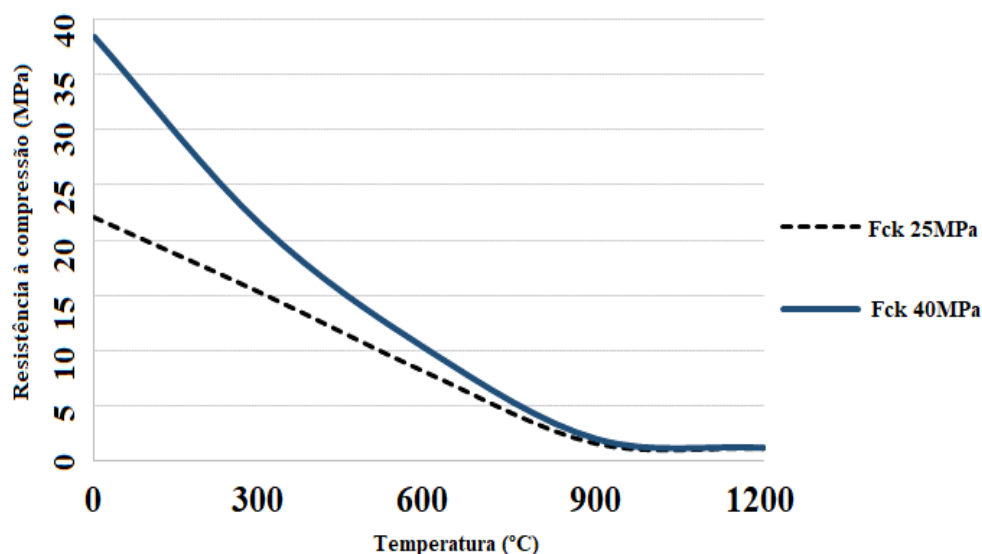
Os resultados apresentados na Tabela 2 referem-se à resistência a compressão para os F_{ck} 's de 25 e 40MPa submetido às temperaturas de 300, 600, 900 e 1200°C por 90 minutos.

Tabela 2: Resistência à compressão após aquecimento e o resfriamento brusco

T (°C)	Resistência à compressão, desvio padrão e percentuais finais de resistência					
	F_{ck} de 25MPa			F_{ck} de 40MPa		
	F_{ck}	Desvio padrão	% perda	F_{ck}	Desvio padrão	% perda
Ref.	22,02	± 0,88	00,00	38,41	± 0,84	00,00
300	15,20	± 2,39	30,97	21,33	± 0,79	44,47
600	7,94	± 0,88	63,94	10,01	± 0,50	73,94
900	1,64	± 0,24	92,55	2,03	± 0,34	94,71
1200	1,21	± 0,28	94,51	1,24	± 0,16	96,77

Os referidos dados analisados são apresentados na (Figura 1), onde é perceptível o decaimento da resistência com o aumento da temperatura e resfriamento brusco.

Figura 1. Perda de resistência versus aumento de temperatura e resfriamento brusco



Para os concretos com F_{ck} de 25 e 40MPa, percebeu-se que em 300°C o concreto apresenta uma resistência entre 30,97 a 44,47%, em 600°C a perda de resistência encontra-se no intervalo de 63,94 a 73,94% não sendo mais útil estruturalmente. Para temperaturas maiores, como 900°C o percentual de perda apresenta-se de 92,55 a 94,77%, em 1200°C a perda fica entre 94,51 e 96,77%, inviabilizando a estrutura.

Ainda em 300°C as alterações são poucas e imperceptíveis, com média de 37,72%, no entanto, com o aumento da temperatura, já em 600°C, as alterações são visíveis, e a perda de resistência é maior, chegando à 68,94% em média para os F_{ck} 's. Todos os CP's aquecidos e resfriados de maneira brusca, ocorreu a queda da resistência, sendo o decaimento médio para a temperatura de 900°C com aproximadamente 93,63%, média para os F_{ck} 's de 25 e 40MPa, já para exposição na temperatura máxima de 1200°C, a perda média é em torno de 95,64% com os mesmos F_{ck} 's, se comparando ao valor inicial de resistência à compressão aos 28 dias do concreto referência.

A Tabela 3 apresenta as médias discriminadas no quadro anterior, com os F_{ck} 's analisados de 25 e 40MPa, resfriados bruscamente após submetidos as temperaturas de 300, 600, 900 e 1200°C, sendo os dados comparados aos resultados apresentados no referencial teórico com as médias obtidas nestas faixas de F_{ck} 's e temperaturas. Estudos estes realizados por autores como Lorenzon (2014); Morales (2011) e Silva (2013).

Tabela 3. Percentual de perda após o aquecimento e resfriamento brusco

Temperatura (°C)	Referencial teórico - Média (%) (Aquecimento)	Análise realizada – Média (%) (Aquecimento + Resfriamento)
Concreto de referência	00,00	00,00
300	35,00	37,72
600	55,00	68,94
900	85,00	94,71
1200	90,00	96,77

Explosive Spalling no concreto com F_{ck} de 25 e 40MPa

A presença de *Spalling* é melhor de ser visualizada para concretos submetidos às temperaturas maiores que 600°C. Devido à essa exposição em elevadas temperaturas é evidente os efeitos do lascamento. Essa percepção é possível quando comparado aos concretos com F_{ck} de 25 e 40MPa mantidos em temperaturas ambiente. Com o aumento da temperatura os agregados tendem a expandir-se, a água no interior evapora, causando pressões internas que criam pequenos poros e fissuras. Para o concreto com F_{ck} de 25MPa, a presença de *Spalling* é perceptível facilmente quando exposto às temperaturas de 900 e 1200°C (Figura 2).

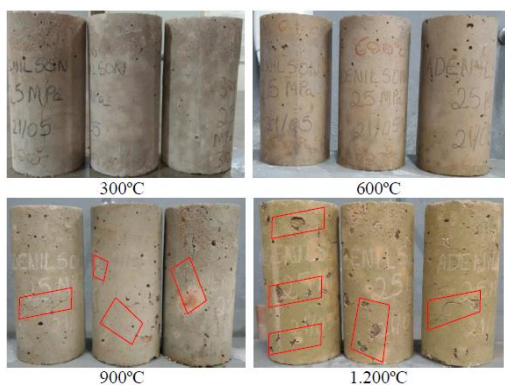


Figura 2. *Explosive Spalling* no concreto com F_{ck} de 25MPa

O *Spalling* é mais perceptível no concreto com F_{ck} de 40MPa. A presença de *pop outs* ou pequenos pipocamentos é visível com incidência no concreto com F_{ck} de 40MPa, isso é em virtude da resistência do concreto, quanto maior a resistência, mais frágil é o concreto, mais a presença de fissuras e rupturas, não suportando as pressões internas nos poros, ocasionando mais fissuras entre as fases de transições do cimento e agregado. Os deslocamentos de concreto e fissuras podem ser observados na (Figura 3).

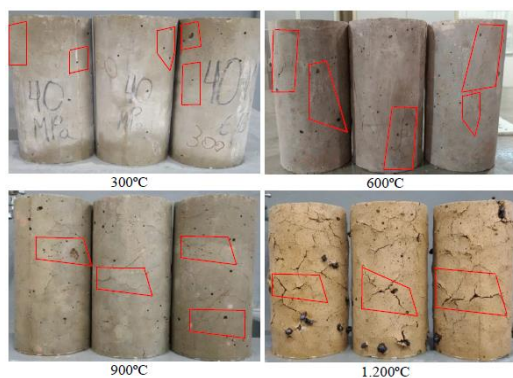


Figura 3. *Explosive Spalling* no concreto com F_{ck} de 40MPa

Observa-se que a variação de resistência dos concretos com F_{ck} de 25 e 40MPa estão diretamente relacionadas com a presença de *Spalling*. Isso explica-se devido ao fato de o fenômeno enfraquecer ainda mais as estruturas pós as alterações micro estruturais do concreto exposto as elevadas temperaturas. O enrijecimento estrutural favorece o surgimento de microfissuras e o lascamento. Sendo assim, quanto maior a resistência característica, maior será a presença de *Spalling*. Além de reduzir a resistência do concreto, outro problema consequente ao lascamento é no momento do resfriamento brusco, uma vez que, ao penetrar no concreto, a água reidrata, reestruturando as agulhas de etringitas e o C-S-H.

As alterações no concreto ocorrem já em 300°C, no entretanto, para concretos mais resistentes, como o F_{ck} de 40MPa a presença de *Spalling* é mais perceptível a partir dos 300 e 600°C. A formação de *Spalling* no concreto com F_{ck} de 40MPa proporciona maior perda de resistência quando comparado ao concreto com F_{ck} de 25MPa. A reidratação do reestruturando as agulhas de etringitas e o C-S-H, percolação da água e novas fissuras permitem o aumento do efeito, consequentemente, a diminuição da resistência.

CONCLUSÃO

Portanto, conclui-se que as características físicas na macroestrutura do concreto também foram analisadas, levando-se em consideração a presença de *Spalling* nos concretos com F_{ck} de 25 e 40MPa. Sendo assim, é possível identificar a perda de resistência devido à exposição em elevadas temperaturas de incêndio e ao resfriamento brusco da estrutura.

A baixa de resistência pode ser observada quando comparados aos dados obtidos na pesquisa com os referenciais teóricos. Os estudos avaliaram apenas a perda de resistência devido ao

aquecimento. A diferença de maior perda quando resfriado é de 2,72% para os concretos aquecidos em 300°C, 13,94% quando aquecidos em 600°C, 9,71% em 900°C e 6,77% em 1200°C. Isso confirma o fato de quando resfriado, os processos de evaporação e reidratação do C-S-H interferem na microestrutura do concreto, reduzindo a resistência.

REFERÊNCIAS

- BRENTANO, Telmo. A proteção contra incêndio no projeto de edificação. 3. Ed. Porto Alegre: Edição do autor, 2015.
- BRENTANO, Telmo. Instalações Hidráulicas de Combate a Incêndio nas Edificações. 5. Ed. Porto Alegre: Edição do autor, 2016.
- CARDEAL, Wagner Januário. Combate a incêndio estrutural: um estudo sobre o uso de câmaras de imagem térmica pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. 91 f. Monografia (Formação de Oficiais) – CBMSC, Florianópolis – SC, 2015.
- COSTA, Carla, N.; FIGUEIREDO, Antônio D. de; SILVA, Valdir P. Fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica. In: 44º Congresso Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte - MG, 2002. Anais. 2002. (A).
- FERNANDES, Ivan R. Engenharia de segurança contra incêndio e pânico. Curitiba, PR: CREA-PR, 2010.
- FERNANDES, B.; Gil, A. M.; Tutikian, B. F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: Alterações físico-químicas e técnicas de análise. Revista IBRACON de estruturas e materiais, vol.10, p.838-863, 2017.
- GOMES, TAÍS. Projeto de prevenção e combate a incêndio. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria/RS. 2014.
- GROCKOSKI, Bruno. Estudo da relação entre o fenômeno de calcinação e a redução da resistência do concreto armado em situações adversas. Revista FLAMMAE, vol. 4, nº9, p.119-142, ISSN 2359-4837, 2018.
- HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences, vol.61, p.145-154, 2013.
- KHOURY, G. A.; Effect of fire on concrete and concrete structures. Concrete construction, p.429-447, 2000.
- KODUR, V.K.R.; AGRAWAL, Ankit. Effect of temperature induced bond degradation on fire response of reinforced concrete beams. Engineering Structures, vol.142, p.98-109, 2017.
- LORENZON, Andressa. Análise da resistência do concreto após exposição a altas temperaturas. 2014. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco - PR, 2014.
- MORALES, Gilson; CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana M. P. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, V. 32, n.1, p. 47-55, jan./mar. 2011.
- RIBEIRO JR., Paulo Lucio. Estruturas de concreto: Verificação e dimensionamento em situação de incêndio. 1. Ed. São Paulo: Porto de Ideias, 2018.
- SCOTTON, Josiane A.; SILVA, Bruno do V.; BOSCO, Vitor I. D.; FILHO, Luiz C. P. da S. Análise da resistência residual de aderência aço concreto após a exposição a altas temperaturas. In: 55º Congresso Brasileiro de Concreto, Gramado - RS, 2013. Anais. ISSN 2175-8182/55CBC0098, 2013.
- SEITO, Alexandre I. et al. A Segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008.
- SILVA, Valdir P. et al. Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.
- SILVA, Janaina S. da; SÁ, Maria da V.V. Concreto de alta resistência submetidos a diferentes temperaturas. In: 55º Congresso Brasileiro de Concreto, Gramado - RS, 2013. Anais. ISSN 2175-8182/55CBC0098, 2013.
- SILVEIRA, Markus Vinicius. Segurança contra incêndio e pânico: um estudo sobre sistemas destinados ao abandono seguro de ocupantes em edificações elevadas. 58 f. Monografia (Formação de Oficiais) – CBMSC, Florianópolis – SC, 2015.