



Análise de imagem em concreto desintegrado na fase de pós-aquecimento

 A. H. Akca^{1*} , N. Özyurt² 

 * Autor de Contato: aakca@yildiz.edu.tr

 DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.482>

Recepção: 26/11/2019 | Aceitação: 05/02/2020 | Publicação: 30/04/2020

RESUMO

A relação entre o crescimento de fissuras e a redução da resistência à compressão após exposição a altas temperaturas seguidas de resfriamento lento e ao ar foi investigada neste estudo. As amostras de concreto foram aquecidas a 1000 °C e, após submetidas ao resfriamento lento foram, na sequência sazoadas ao ar por 28 dias. Durante o período de resfriamento, sua superfície foi monitorada usando uma câmera reflex digital de lente única e as imagens foram analisadas usando o software de análise de imagens. Logo após o resfriamento, a redução máxima na resistência à compressão do concreto foi de 49,5% e a do concreto sazoadado ao ar, após 28 dias, foi de 66,8%. As análises de imagem mostraram altas correlações entre o crescimento da fissura e a redução da resistência à compressão. Este método não destrutivo tem o potencial de representar a extensão dos danos no concreto após a exposição a altas temperaturas.

Palavras-chave: temperatura alta; concreto reforçado com fibra; deterioração; desenvolvimento de fissuras; análise de pixel preto.

Citar como: Akcal, A. H., Özyurt, N. (2020), “Análise de imagem em concreto desintegrado na fase de pós-aquecimento”, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 219 – 229, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.482>

¹Department of Civil Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey.

²Department of Civil Engineering, Boğaziçi University, İstanbul, Turkey.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2020.

Image analysis on disintegrated concrete at the post-heating stage

ABSTRACT

The relation between crack growth and reduction in the compressive strength after high temperature exposure and after air re-curing was investigated in this study. Concrete specimens were heated to 1000 °C and they were subjected to air re-curing for 28 days. During re-curing period, their heated surfaces were monitored by using a digital single-lens reflex camera and the images were analyzed by using image analysis software. After cooling, the maximum reduction in the compressive strength of concrete was 49.5% and that of air re-cured concrete was 66.8%. Image analyses showed high correlations between crack growth and reduction in the compressive strength. This non-destructive method has the potential to represent the extent of damage in concrete after high temperature exposure.

Keywords: high temperature; fiber reinforced concrete; deterioration; crack development; black pixel analysis.

Análisis de imagen sobre hormigón desintegrado en la etapa de post-calentamiento

RESUMEN

En este estudio se investigó la relación entre el crecimiento de grietas y la reducción de la resistencia a la compresión después de la exposición a altas temperaturas y después del curado con aire. Las muestras de hormigón se calentaron a 1000 °C y se sometieron a curado por aire durante 28 días. Durante el período de curado, sus superficies calentadas fueron monitoreadas usando una cámara réflex digital de lente única y las imágenes fueron analizadas usando un software de análisis de imágenes. Después del enfriamiento, la reducción máxima en la resistencia a la compresión del concreto fue del 49.5% y la del concreto curado al aire fue del 66.8%. Los análisis de imagen mostraron altas correlaciones entre el crecimiento de grietas y la reducción de la resistencia a la compresión. Este método no destructivo tiene el potencial de representar el alcance del daño en el concreto después de la exposición a altas temperaturas.

Palabras clave: alta temperatura; hormigón reforzado con fibra; deterioro; desarrollo de grietas; Análisis de píxeles negros.

1. INTRODUÇÃO

Gradientes térmicos, evaporação da água livre e mudanças químicas no concreto são os principais motivos de deteriorações, como fissuras superficiais, delaminação da superfície, destacamentos (spalling) (Poon et al. 2001; Akca e Özyurt, 2013). Além disso, a deterioração do concreto pode continuar nos dias subsequentes ao resfriamento devido a mudanças contínuas ocorridas na microestrutura do concreto. Por exemplo, uma eventual rehidratação do CaO resulta em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com uma expansão de volume de 44% e essa reação pode causar fissuras no concreto, especialmente na superfície que sofreu mais com o aquecimento (Lin et al. 1996; Alonso e Fernandez, 2004; Mendes et al. 2011).

As alterações nas superfícies aquecidas do concreto podem ser usadas para avaliar as propriedades residuais do concreto após a exposição ao calor. Por exemplo, mudanças de cor em superfícies de concreto aquecidas ou expostas ao fogo podem fornecer informações sobre a temperatura máxima experimentada e a quantidade de deterioração do concreto (Yüzer et al. 2004; Ingham, 2009). A coloração rosa a vermelho ocorre devido à oxidação de compostos de ferro em partículas de areia e argila após 300 °C, e a superfície de concreto de cor esbranquiçada pode significar que a

temperatura do concreto excedeu 700 °C na qual ocorre a descarbonatação dos carbonatos. Assim, a redução da resistência pode ser prevista, aproximadamente, sem aplicar ensaios destrutivos no concreto em alguns casos.

Da mesma forma, fissuras nas superfícies aquecidas podem ser avaliadas para prever a resistência residual do concreto após o resfriamento. Portanto, as amostras de concreto foram submetidas a um processo de resfriamento ao ar lento, posterior ao aquecimento de até 1000 °C. Neste projeto, uma condição de aquecimento de face foi aplicada às amostras, uma vez que pode ser considerada mais realista e aplicável. Em seguida, as superfícies pré-aquecidas de corpos de prova de concreto foram monitoradas usando uma câmera DSLR, logo após o resfriamento, e as imagens foram avaliadas para entender a relação entre a abertura da fissura e a taxa de crescimento de fissuras nas superfícies pré-aquecidas e a redução da resistência à compressão após o aquecimento.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais e amostras

O cimento Portland tipo CEM I (PC) foi utilizado nos concretos e a quantidade total de cimento em 1 m³ de concreto foi de 450 kg e todos os concretos tiveram uma relação água / cimento de 0,45. A tabela 1 mostra os traços dos concretos. Foram utilizados nos concretos, aditivo incorporador de ar (AEA) à base de sal de amônia e álcool de óleo e superplastificante à base de policarboxilato modificado. A quantidade de AEA foi a mesma de 0,3 kg (0,7% do peso total de cimento) em todos os concretos. A quantidade de superplastificante foi variada para obter as consistências do concreto fresco nos limites de S4 dados na EN 206-1. As fibras de aço foram usadas como fibras de alto ponto de fusão e as fibras PP foram usadas como fibras de baixo ponto de fusão para reforçar os concretos. Nos concretos reforçados com fibra de PP foram utilizadas fibras de PP equivalentes a 0,2% do volume de concreto e nos concretos reforçados com fibra de aço foram utilizadas 0,5% de volume de concreto. Foram adicionadas fibras de PP e fibras de aço com teores de 0,1% e 0,25% por volume nos concretos reforçado com fibra híbrida, respectivamente. Areia de rio e cascalho silicoso foram utilizados em todos os grupos de concreto como agregados. Dependendo do tipo de fibra e também da presença do incorporador de ar, foram projetados 8 diferentes grupos de concreto, como pode ser visto na Tabela 1.

Foram produzidos 11 corpos de prova cúbicos com dimensões de 15x15x15 cm para cada grupo de concreto. Um dia após a produção, as amostras foram desmoldadas e colocadas em água de cura por 27 dias. Em seguida, eles foram condicionados em ambiente de laboratório por mais 2 meses antes dos ensaios (Poon et al. 2001; Chang et al. 2006). Três corpos de prova cúbicos foram utilizados para determinar as propriedades iniciais do concreto antes do aquecimento. As 8 amostras cúbicas restantes foram aquecidas a 1000 °C. Dois deles foram usados para monitorar as temperaturas em cubos de concreto durante o aquecimento, três deles foram testados para determinar propriedades logo após o resfriamento e os três corpos de prova cúbicos restantes foram submetidos a um sazonalamento ao ar por 28 dias. Portanto, nas tabelas e gráficos 0, X e Z representam ensaios antes do aquecimento, após o resfriamento e após 28 dias ao ar, respectivamente.

Tabela 1. Traços.

Séries	W/C	Cimento	Água	Agregado graúdo	Areia artificial	Areia natural	SP ^a	AEA	Fibras PP	Fibras metálicas
C00	0.45	450	202.5	968	565	225	5.7	-	-	-
C0S	0.45	450	202.5	968	565	225	6.0	-	-	5
C0P	0.45	450	202.5	968	565	225	6.3	-	2	-
C0H	0.45	450	202.5	968	565	225	6.6	-	1	2.5
CA0	0.45	450	202.5	968	565	225	5.3	0.3	-	-
CAS	0.45	450	202.5	968	565	225	5.7	0.3	-	5
CAP	0.45	450	202.5	968	565	225	6.0	0.3	2	-
CAH	0.45	450	202.5	968	565	225	6.6	0.3	1	2.5

^a SP significa superplastificante

2.2 Procedimento de aquecimento

Um forno elétrico com temperatura máxima de operação de 1250 °C foi utilizado neste estudo. Foram determinados dois estágios de aquecimento e durante o primeiro estágio as amostras foram aquecidas a 1000 °C e durante o segundo estágio as amostras foram mantidas a essa temperatura até o final do tempo total de aquecimento (200 minutos). A Fig. 1 representa o procedimento de aquecimento. O forno elétrico foi operado em potência máxima e a temperatura dentro do forno atingiu 1000 °C em aproximadamente 120 minutos. Como a capacidade de aquecimento do forno era limitada, a taxa de aquecimento era de 20 °C / min no início, mas a taxa diminuiu para 5 °C / min no final do primeiro estágio de aquecimento. Após a segunda etapa concluída, as amostras de concreto quentes não foram retiradas até que o forno esfriasse até 100 °C.

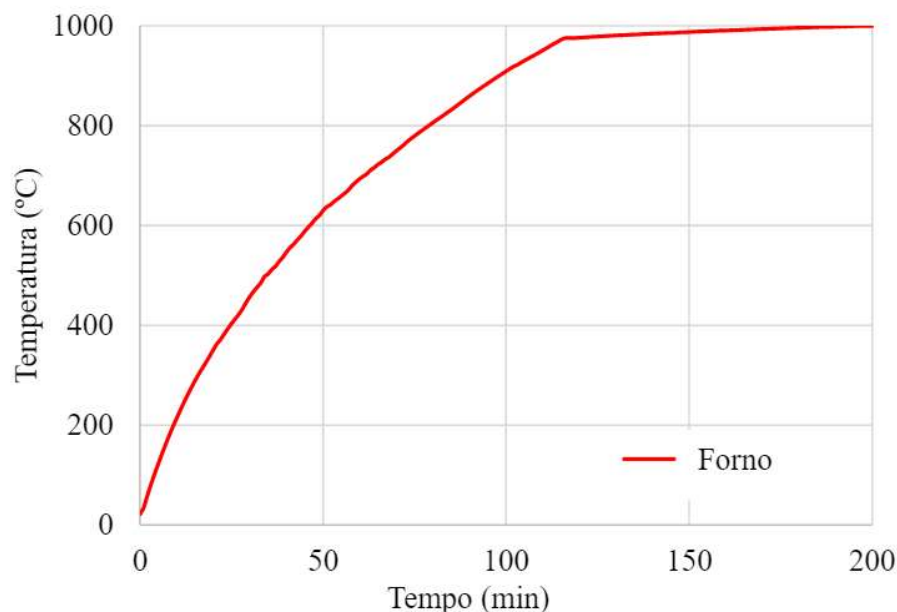


Figura 1. Procedimento de aquecimento.

Quatro corpos de prova cúbicos foram colocados juntos no forno elétrico e, a fim de simular as condições de aquecimento de uma face, foram isolados com blocos de concreto aerados, como mostra a Fig. 2. Para monitoramento da temperatura, os termopares tipo K foram colocados dentro de uma amostra de concreto durante o aquecimento.

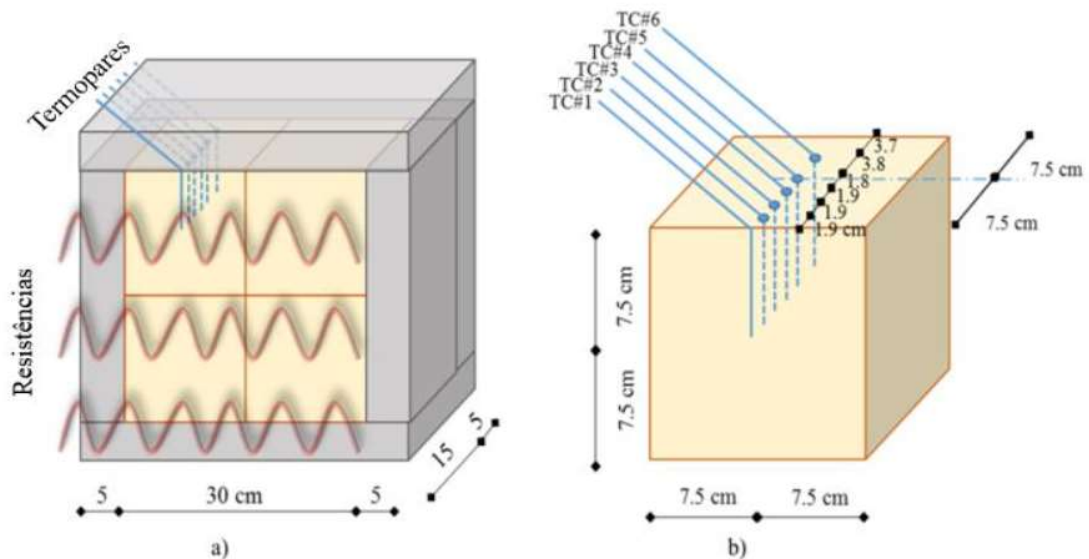


Figura 2. a) Isolamento térmico de amostras de concreto em fornos elétricos, b) posições dos termopares do tipo K usados para monitorar a mudança de temperatura.

2.3. Processo de sazonalamento ao ar por 28 dias

Após os processos de aquecimento e resfriamento, três amostras foram submetidas a um período de 28 dias ao ar. As amostras foram mantidas em ambiente de laboratório, com umidade relativa de $65 \pm 10\%$ e temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ durante esse período de sazonalamento ao ar.

2.4. Medida da abertura das fissuras

Alterações visuais no concreto aquecido ou exposto ao fogo podem fornecer informações sobre a temperatura máxima experimentada e a estimativa dos danos ao concreto (Yüzer et al. 2004; Ingham, 2009). Portanto, a fotografia da face aquecida de uma amostra sobrevivente de cada grupo de concreto foi tirada usando uma câmera DSLR. Essas imagens foram analisadas através de um software chamado Image J, como pode ser visto na Fig. 3. Durante a análise, toda a área da imagem foi dividida em 9 subáreas e as aberturas máximas de fissuras de cada subárea foram medidas e, em seguida, as aberturas médias foram obtidas.

2.5. Análise de pixel preto

O desenvolvimento de fissuras durante o sazonalamento de 28 dias ao ar foi monitorado, tirando fotos das superfícies que sofreram aquecimento a cada hora durante uma semana. Uma câmera DSLR de alta resolução e uma lente macro de 100 mm foram usadas para obter imagens detalhadas. Como pode ser visto na Fig. 4, essas imagens foram convertidas em imagens em preto e branco de 8 bits usando a Imagem J e foram realizadas análises de pixel preto (BPA).

Os pixels pretos representam fissuras, vazios de ar, delaminação da superfície e sombra (devido às posições dos refletores) nas superfícies aquecidas das amostras. As áreas totais de pixels pretos foram calculadas para todas as imagens separadamente. Em seguida, esses valores calculados foram divididos em área de pixel preto da primeira imagem para obter valores de área normalizados. Finalmente, gráficos de área normal-tempo foram desenhados para todos os grupos de concreto, exceto os grupos que sofreram destacamento (spalling) durante o aquecimento e as linhas de tendência foram ajustadas nos gráficos, como mostra a Fig. 5. Essas curvas foram usadas para monitorar a deterioração do concreto por uma semana. As inclinações das linhas de tendência ajustadas foram denominadas taxas de BPA e foram comparadas às taxas de redução da resistência à compressão de grupos de concreto curado ao ar.

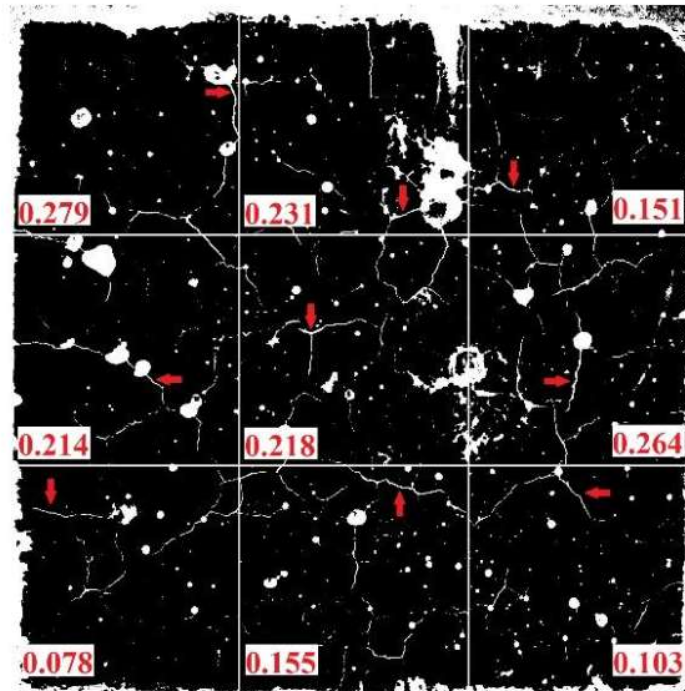


Figura 3. Medições da abertura da fissura em uma amostra C00X (superfície logo após o resfriamento).

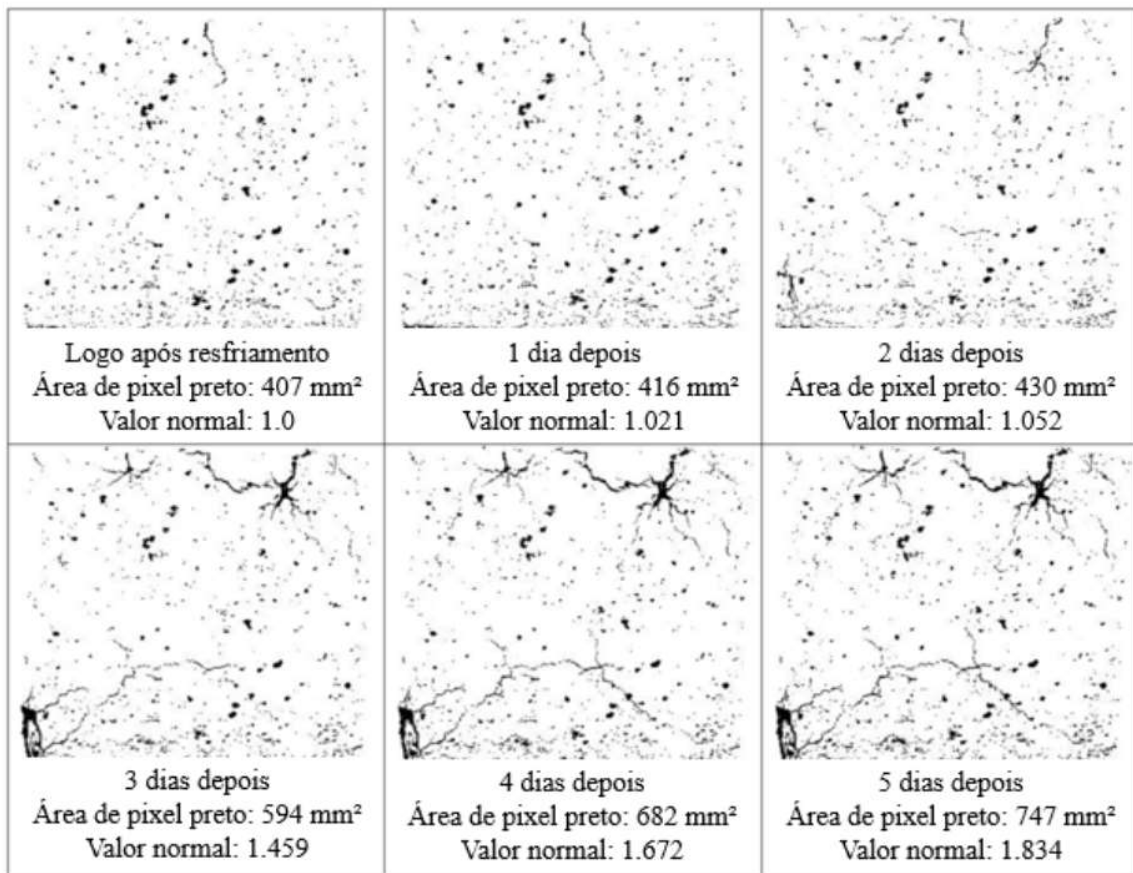


Figura 4. Monitoramento de crescimento de fissuras em imagens em preto e branco capturadas da amostra COPZ durante a cura ao ar.

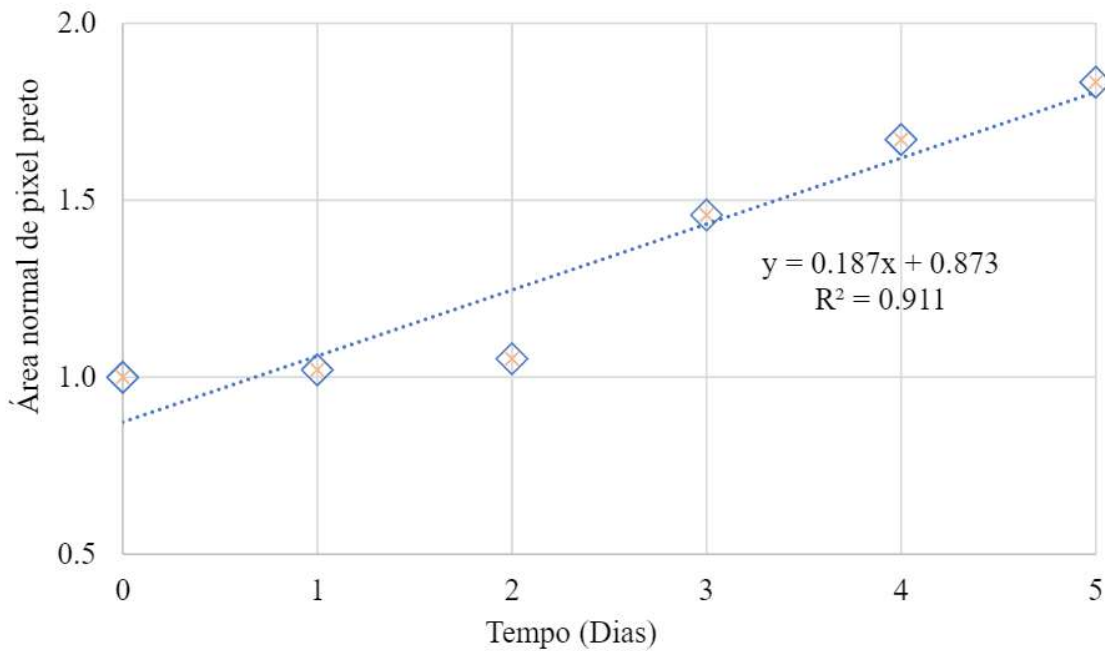


Figura 5. Valor da análise de pixel preto da amostra COPZ.

3. RESULTADOS

3.1 Monitoramento de temperatura

As temperaturas da superfície aquecida e das partes internas dos corpos de prova cúbicos de concreto foram monitoradas durante o aquecimento e a monitoração da temperatura continuou ainda mais durante o resfriamento do forno (mais 150 minutos). No período de resfriamento, embora o aquecimento do forno tenha sido interrompido, as temperaturas no concreto continuaram a aumentar. Os dados do termopar estavam muito próximos quando comparados em termos de tipos de materiais cimentícios. Portanto, todos os concretos foram reunidos em duas categorias, dependendo do uso de AEA neles. A Tabela 2 mostra as temperaturas máximas médias monitoradas nas categorias de concreto com e sem entrada de ar durante o monitoramento da temperatura total (200 + 150 minutos). Os resultados mostraram que as temperaturas experimentadas no concreto com ar incorporado eram menores do que as do concreto sem ar incorporado. Quando todo o período de aquecimento e resfriamento é considerado, pode-se observar que os concretos experimentaram pelo menos 583 °C de temperatura, o que pode resultar em severas perdas de resistência (Poon et al. 2001; Akca e Özyurt, 2013).

Tabela 2. Valores médios de temperatura máxima em profundidades predefinidas da superfície durante os processos totais de aquecimento e resfriamento (no final de 350 minutos).

Termopar No	TC#1	TC#2	TC#3	TC#4	TC#5	TC#6
Profundidade (mm)	0	19	38	57	75	113
Sem AEA ¹ (°C)	1000	805	691	657	636	608
Com AEA ² (°C)	1000	784	662	627	608	583
Diferença (°C)	0	21	29	30	28	25

Sem AEA¹ significa todos os grupos de concreto sem ar incorporado.

Com AEA², são todos os grupos de concreto com ar incorporado.

3.2. Ensaio de resistência à compressão

As amostras de concreto cúbicas foram ensaiadas antes do aquecimento, após o resfriamento e após 28 dias ao ar, e os valores de resistência à compressão dos grupos de concreto foram determinados em todas as etapas. Os valores de resistência à compressão de todos os grupos de concreto diminuíram após o aquecimento e uma redução adicional na resistência residual foi observada após o período de sazonalização de 28 dias ao ar. As razões de redução na resistência à compressão de todos os grupos de concreto após o resfriamento e após 28 dias ao ar podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3. Redução da resistência à compressão em relação à resistência antes do aquecimento.

Redução na resistência à compressão	C00	C0S	C0P	C0H	CA0	CAS	CAP	CAH
Após o resfriamento (%)	31.9	25.8	36.7	33.9	35.2	36.5	49.5	45.5
Após 28 dias ao ar (%)	64.1	44.9	66.8	49.2	56.3	49.6	58.7	56.5

3.3. Medição da abertura da fissura (após o resfriamento das amostras)

Fotografias da face aquecida de uma amostra de cada grupo de concreto foram tiradas usando uma câmera DSLR. Essas imagens foram analisadas através de um software chamado Image J, e as aberturas médias das fissuras foram obtidas. As aberturas médias de fissuras dos grupos de concreto após o resfriamento foram apresentadas na Tabela 4. De acordo com os resultados, pode-se concluir que houve fissuras nas faces aquecidas das amostras cerca de 0,20 mm após o aquecimento. Também a tendência de fissuração do concreto reforçado com fibra de PP pode ser considerada mais alta e a do concreto reforçado com fibra de aço pode ser considerada menor em relação aos grupos de concreto simples após o resfriamento. Por outro lado, fissuras maiores foram observadas nos grupos de concreto com ar incorporado do que grupos de concreto sem ar incorporado.

Tabela 4. Aberturas médias de fissuras nas faces aquecidas de grupos de concreto após o resfriamento.

Abertura da fissura	C00X	C0SX	C0PX	C0HX	CA0X	CASX	CAPX	CAH X
Média (mm)	0.188	0.175	0.196	0.181	0.195	0.182	0.206	0.204
Desvio padrão (mm)	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04

As aberturas médias calculadas da fissura foram comparadas com a redução na resistência à compressão das amostras após o resfriamento, como pode ser visto na Fig. 6. Os resultados mostraram que o aumento na abertura média da fissura das amostras causou aumento na redução da resistência à compressão. Essa relação pode ser usada para prever a extensão da deterioração nas propriedades mecânicas residuais dos elementos de concreto sem aplicar ensaios destrutivos sobre eles após um evento de incêndio.

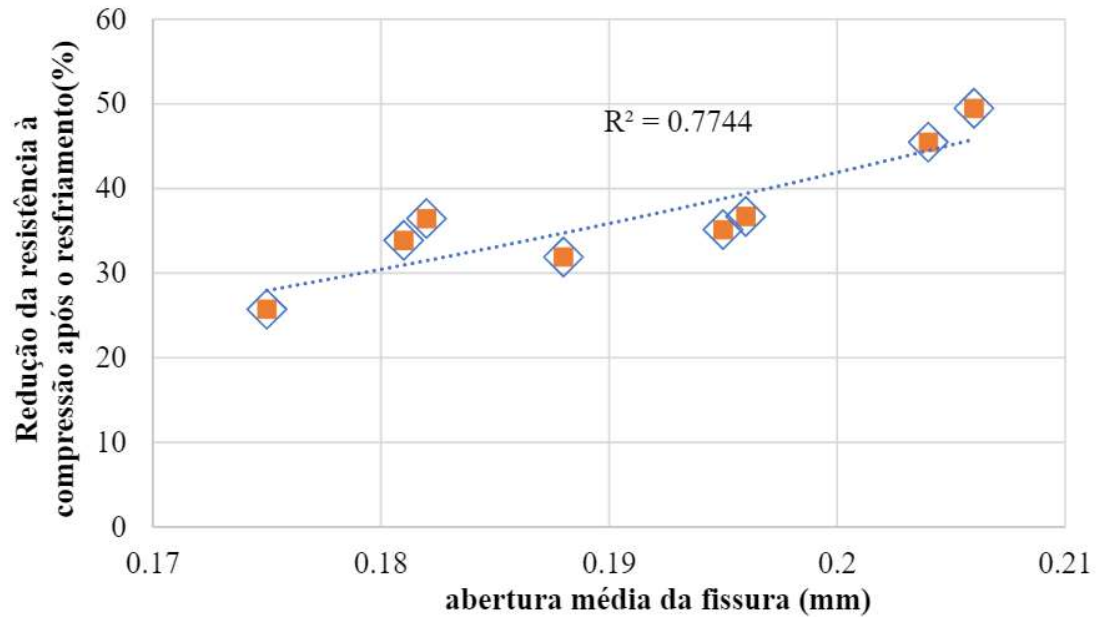


Figura 6. Relação entre redução na resistência à compressão e abertura média da fissura após o resfriamento.

3.4. Análise de pixel preto (BPA) (para o período de re-cura ao ar)

Após o resfriamento, o tamanho e o número de fissuras aumentaram nas superfícies aquecidas das amostras de concreto, provavelmente devido à reidratação expansiva de CaO. Portanto, imagens de superfície das amostras foram capturadas durante a primeira semana de exposição ao ar e essas imagens foram avaliadas no software de análise de imagem, a fim de avaliar a relação entre a taxa de desenvolvimento de fissuras e a redução da resistência à compressão durante esse período. Consequentemente, as taxas de BPA de amostras de concreto ao ar foram calculadas (como explicado na Seção 2.5) para monitorar o desenvolvimento de danos e esses valores foram comparados com as diferenças nos valores de resistência à compressão após o período de exposição ao ar, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Resistência à compressão residual e valores de BPA.

Grupo	X-Grupo ¹ (MPa)	Z-Individual ² (MPa)	(Z-X)/X (%)	Taxa BPA (Day ⁻¹)
C00	Destacamento (Spalling) ocorreu. O BPA não ocorreu.			
C0S	Destacamento (Spalling) ocorreu. O BPA não ocorreu.			
C0P	36.9	20.1	- 45.5	0.187
C0H	36.7	24.6	- 32.8	0.056
CA0	35.5	22.2	- 37.5	0.087
CAS	34.9	25.6	- 26.9	0.087
CAP	25.3	21.2	- 16.1	0.007
CAH	27.2	24.3	- 10.5	0.019

Grupo X¹ Representa o valor médio da resistência residual de 3 amostras após o resfriamento

Z-Individual² Representa o valor da resistência residual individual da amostra monitorada após 28 dias ao ar

Valor da resistência à compressão individual da amostra monitorada (ao ar por 28 dias após o período de resfriamento e ensaiado no final deste período de 28 dias) e valor médio da resistência à compressão de 3 amostras ensaiadas após o resfriamento (como um valor inicial da resistência antes do período de 28 dias ao ar) foram utilizados para calcular a mudança na resistência à compressão durante o período de exposição ao ar.

Após a comparação, uma dispersão foi observada como mostrado na Fig. 7 e mostrou que havia uma relação logarítmica entre as alterações na resistência à compressão e as taxas de BPA. O valor calculado de R^2 para todo o conjunto de dados foi de 0,77. Essa taxa pode ser aumentada usando técnicas avançadas de fotografia, analisando em software específico, aumentando o tamanho da amostra etc. Por exemplo, os vazios de ar na superfície das amostras influenciam a quantidade total de pixels pretos. Se, de alguma forma, o efeito dos vazios for eliminado, taxas mais precisas de BPA poderão ser obtidas.

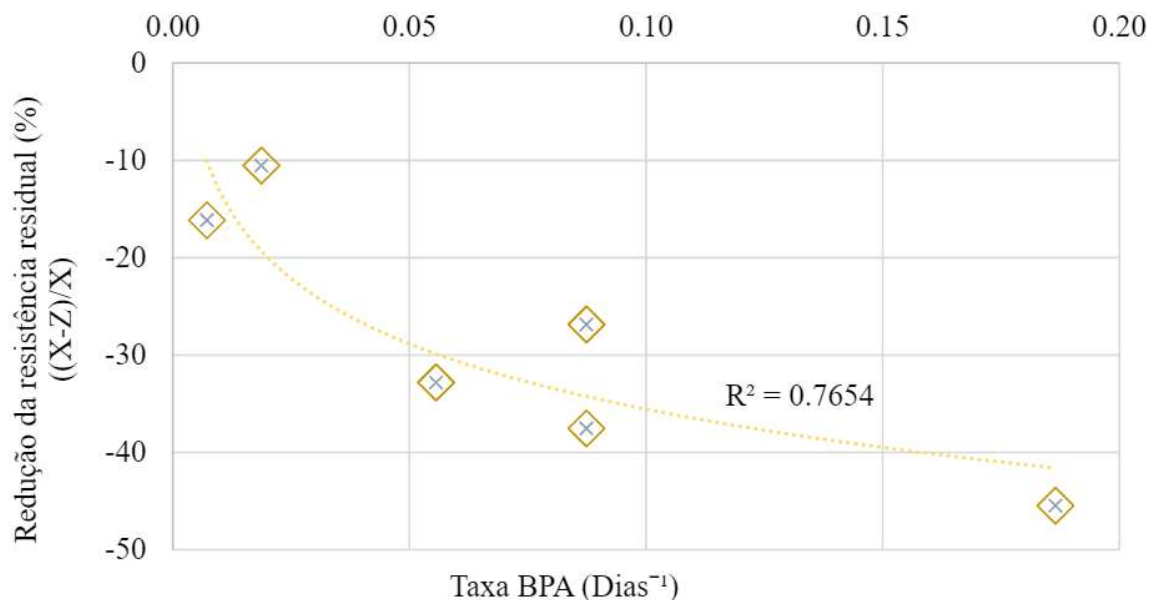


Figura 7. Resultados da análise de pixel preto

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, investigou-se a deterioração progressiva de vários tipos de concreto pre-aquecidos e 1000° C, resfriados e posteriormente mantidos ao ar por 28 dias. Os BPAs foram conduzidos em amostras sazoadas ao ar e a relação entre o desenvolvimento da fissura e a redução da resistência à compressão foi avaliada.

As conclusões abaixo podem ser tiradas em relação aos resultados obtidos limitados à geometria da amostra (forma cúbica 15 por 15 por 15 cm):

1. Devido à temperatura elevada de 1000° C, a resistência à compressão dos grupos de concreto diminuiu aproximadamente 35%. Além disso, a fissuração contínua do concreto após o resfriamento causou uma redução adicional na resistência à compressão.
2. A relação entre fissuras nas superfícies aquecidas e a redução na resistência à compressão foram avaliadas após o resfriamento. Os resultados mostraram que a abertura média da fissura na superfície aquecida do concreto pode fornecer informações sobre a diminuição da resistência à compressão do concreto.

3. Uma técnica de análise de imagem foi desenvolvida durante este estudo, chamada de análise de pixel preto (BPA), a fim de entender a relação entre o crescimento da fissura durante o sazonalamento ao ar e a redução da resistência à compressão após 28 dias. Este método deu bons resultados e pode ser aprimorado para representar melhor a extensão dos danos no concreto após exposição a altas temperaturas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Fundo de Pesquisa da Universidade Boğaziçi [Código do Projeto 14A04D2]. Também é reconhecido o apoio da AKÇANSA Cement e da BASF-YKS Construction Chemicals. Os autores também gostariam de agradecer a Ümit Melep, Bilge Uluocak e Melike Babucci pelo apoio durante as medições experimentais. O primeiro autor agradece o apoio financeiro do Conselho de Pesquisa Científica e Técnica da Turquia (TÜBİTAK).

6. REFERÊNCIAS

- Akca, A. H., Özyurt, N. (2013). *High performance concrete under elevated temperatures*. Construction and Building Materials. 44:317-328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.005>
- Alonso, C., Fernandez, L. (2004). *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*. Journal of Materials Science. 39:3015-3024.
- Chang, Y. F. Chen, Y. H., Sheu, M. S., Yao, G. C. (2006). *Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures*. Cement and Concrete Research. 36 (10):1999-2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.029>
- Ingham, J. P. (2009). *Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures*. Materials Characterization. 60 (7):700-709. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.11.003>
- Lin, W. M., Lin, T. D., Powers-Couche, L. J. (1996). *Microstructures of Fire-Damaged Concrete*. ACI Materials Journal. 93 (3):199-205.
- Mendes, A., Sanjayan, J. G., Collins, F. (2011). *Effects of slag and cooling method on the progressive deterioration of concrete after exposure to elevated temperatures as in a fire event*. Materials and Structures. 44:709-718. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9660-2>
- Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y. L. (2001). *Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures*. Cement and Concrete Research. 31 (9):1291-1300. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00580-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00580-4)
- Yüzer, N., Aköz, F., Dokuzer Öztürk, L. (2004). *Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature*. Cement and Concrete Research. 34 (10):1803-1807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.015>