



RESISTÊNCIA MECÂNICA RESIDUAL DO CONCRETO DE RESISTÊNCIA USUAL, PÓS AQUECIMENTO COM VARIAÇÃO DO TIPO DE AGREGADO

Palavras-Chave: [concreto], [incêndio], [resistência à compressão],

Autores(as):

Henrique Tobace Trezza, FECFAU

Prof.^a Dr.^a Armando Lopes Moreno Júnior (orientador), FECFAU

Prof.^a Dr.^a Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira (co-orientadora), FECFAU/FT

Eng. Thiago Drozdowski Priosta (co-orientador), FECFAU

Eng. MsC. Marcela Barros Souza Sollero (co-orientadora), FECFAU

INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais conhecidos no mundo e amplamente empregado, devido às suas propriedades mecânicas, principalmente a resistência à compressão, de seu desempenho estrutural, sendo capaz de suportar elevadas cargas e fornecer segurança e conforto aos usuários com custo baixo. Ademais, o concreto apresenta a capacidade de suportar temperaturas tão elevadas quanto as de um incêndio (Khoury, 2000) e normas são elaboradas com a finalidade de delimitar o limite em que os materiais estejam capacitados para resistir a altas temperaturas por um intervalo de tempo suficiente para garantir a segurança dos usuários da edificação.

No entanto, quando o concreto é submetido a elevadas temperaturas durante um longo período, ocorrem alterações físico-químicas no material. As transformações na pasta cimentícia e nos agregados, assim como a incompatibilidade entre a pasta e o agregado promovem a fissuração do concreto, resultando em eventual decréscimo de resistência mecânica (KHOURY, 2000; ALMEIDA, 2017; FERNANDES, 2017; SOLLERO, 2019; ARAÚJO, 2020). Outro processo de deterioração usualmente observado em concretos quando são aquecidos é o “spalling” explosivo, ou “lascamento” (SOLLERO, 2019; KIRCHHOF, 2010; AMRAN et. al., 2022); fenômeno que pode ocorrer, principalmente, em concretos de alta resistência, visto que sua maior densidade e menor porosidade e permeabilidade contribuem para pressões de vapor mais acentuadas no seu interior, provocando rompimento agressivo e lascamento das camadas mais superficiais.

O comportamento do concreto durante e após sua exposição à elevadas temperaturas sofre influência de parâmetros como adições na pasta de cimento, umidade das amostras, o tipo de agregado utilizado na confecção do concreto, relação água/cimento da mistura e sua classe de resistência; além da maneira na qual o ensaio das amostras foi conduzido. A condução do ensaio, envolve parâmetros como taxa de aquecimento, tempo de aquecimento, taxa de resfriamento, modo de resfriamento, nível de carga compressiva durante o aquecimento e a temperatura máxima atingida pela amostra. (SOLLERO, 2019; KHOURY, 2000; SHAHRAKI et. al., 2023).

No entanto, Khoury (2000) identifica que o principal parâmetro a ser considerado para a avaliação do comportamento do concreto exposto ao incêndio é o tipo de agregado graúdo empregado, que constitui até 80% do concreto e determina quase integralmente as propriedades do material. Nesse sentido, Razafinjato (2016) propõe a necessidade da caracterização, sob elevadas temperaturas, de concretos confeccionados com distintos agregados, devido às diferenças decorrentes de aspectos como o tipo e a fração de sílica que podem ser encontradas em uma mesma classe de rocha. Outro parâmetro de interesse é a classe de resistência do concreto, com resultados de comportamento, sob elevadas temperaturas, diferentes para concretos com resistência usual e de alta resistência.

Dessa forma, esse trabalho avaliou a resistência mecânica residual de concretos granítico e basáltico de alta resistência sob elevadas temperaturas. Ao final, estes resultados foram comparados com resultados obtidos por pesquisadores nacionais e internacionais e aqueles prescritos por códigos normativos da área.

METODOLOGIA:

Para este projeto, foram utilizados dois traços de concreto de alta resistência (Fck de cerca de 70 MPa), variando-se o tipo de agregado graúdo utilizado: basalto (CAR-B) e granito (CAR-G). A proporção adotada foi 1:1,5:1,5 (cimento: areia natural média: agregado graúdo) em peso e a relação água/cimento de 0,35, com adição de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento e aditivo superplastificante. Destaca-se que esse traço foi definido em função de outros trabalhos associados ao Grupo de Pesquisa MATS (Materiais e Tecnologias Sustentáveis), vinculados ao presente estudo. A caracterização em relação às propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados nos concretos é apresentada nas tabelas 1, 2 e 3 e figuras 1 e 2.

Tabela 1 - Propriedades do Agregado Graúdo

Agregado	DMC	MF	ρ	ρ_s	d	h
Basalto	19 mm	3,82	2,53 g/cm ³	2,54 g/cm ³	2,56 g/cm ³	0,40%
Granito	19 mm	3,45	2,91 g/cm ³	2,95 g/cm ³	3,01 g/cm ³	1,09%

DMC: dimensão máxima característica; MF: módulo de finura; ρ : massa específica; ρ_s : massa específica do agregado na condição saturado superfície seca; d: massa unitária; h: absorção de água.

Tabela 2 - Propriedades do Agregado Miúdo (Areia Média)

DMC	MF	ds	dc	m	ρ_a	ρ_s	ρ	H	A
4,75 mm	1,86	1,57 g/cm ³	1,72 g/cm ³	0,85%	2,58 g/cm ³	2,59 g/cm ³	2,62 g/cm ³	0,10%	0,58%

DMC: dimensão máxima característica; MF: módulo de finura; ds: massa unitária do agregado no estado solto; dc: massa unitária do agregado no estado compactado; m: teor de material fino; ρ_a : massa específica aparente do agregado seco; ρ_s : massa específica do agregado saturado de superfície seca; ρ : massa específica; H: teor de umidade; A: absorção de água.

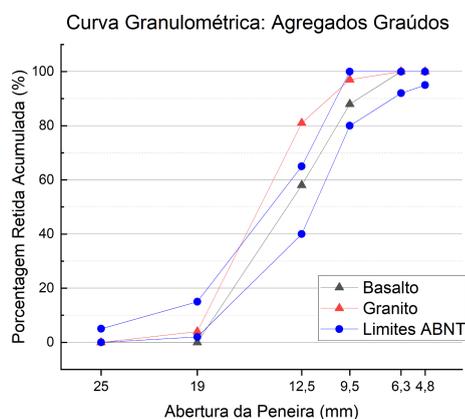


Figura 1 - Granulometria dos agregados graúdos.

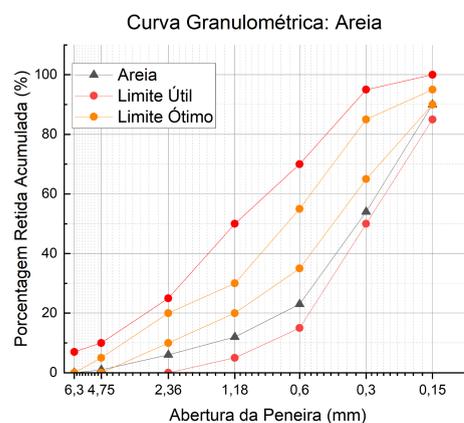


Figura 2 - Curva granulométrica da areia média.

Tabela 3 - Propriedades do Cimento CP II E

ρ	A	Ti	Tf	S	F
3,012 g/cm ³	34,40%	2h 39min	4h 51min	461,775 m ² /Kg	0,84%

ρ : massa específica; A: porcentagem de água necessária para a consistência normal; Ti: tempo de início de pega; Tf: tempo de fim de pega; S: superfície específica; F: índice de finura.

Tabela 4 - Composição Química (%) do Cimento a partir de análise FRX e PF (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SrO	PF
------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----	-----	-----------------	-------------------	------------------	------------------	-------------------------------	-----	-----	----

PF: perda ao fogo, realizada a 1.020°C por 2h.

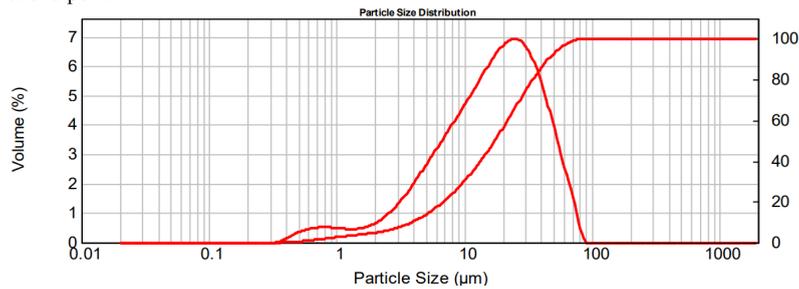


Figura 3 - Curva granulométrica do cimento, feito a laser



Figura 4 - Forno Mufla (à esquerda) e a disposição dos CP's dentro do forno (à direita)

Conforme as recomendações RILEM TC 200-HTC e RILEM TC 129-MHT, corpos de prova cilíndricos (10 cm x 30 cm) foram moldados e foram armazenados por no mínimo 90 dias. Totalizando 40 corpos de prova, as amostras foram separadas em 5 grupos com 4 corpos de prova cada por tipo de agregado graúdo, sendo um grupo de controle e 4 para exposição às temperaturas de 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C, em forno elétrico técnico tipo mufla localizado no Laboratório de Estruturas da FECFAU/Unicamp, admitindo-se taxa de aquecimento e resfriamento de 1 °C/min, com patamar de 60 min, conforme descrita na Tabela 1 da norma RILEM 129 MHT pt.3, adotado no estudo de Sollero (2019). Após a exposição das amostras, a resistência à compressão axial dos corpos de prova foi determinada conforme a recomendação RILEM TC 129 MHT e os resultados foram avaliados por meio de software estatístico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

As propriedades mecânicas após 90 dias dos concretos de alta resistência do grupo de controle são mostradas nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Valores da densidade e propriedades mecânicas do concreto com agregado graúdo de basalto (CAR-B), em temperatura ambiente.

d (Kg/m³)	Rc (MPa)	E (GPa)
2410	75,0	-
2395	64,4	20,8
2408	74,1	22,0
2417	68,7	21,4
$\bar{x} \pm \sigma$	2408 ± 9	70,6 ± 5,0
		21,4 ± 0,6

Tabela 6 – Valores da densidade e propriedades mecânicas do concreto com agregado graúdo de basalto (CAR-G), em temperatura ambiente.

d (Kg/m³)	Rc (MPa)	E (GPa)
2330	59,8	-
2337	49,6	20,5
2337	68,3	20,5
2324	71,7	21,0
$\bar{x} \pm \sigma$	2332 ± 6	62,3 ± 9,9
		20,7 ± 0,3

d: densidade aparente; Rc: resistência à compressão axial; E: módulo de elasticidade.

* $\bar{x} \pm \sigma$: média ± desvio padrão

Em seguida, foram calculados para cada grupo de exposição as resistências residuais à compressão relativa, por meio da razão entre a Rc residual pós-queima e a Rc média do grupo de referência (Figura 5), e as densidades residuais relativas, por meio da razão entre a densidade aparente do corpo de prova antes e após serem expostos a altas temperaturas (Figura 6).

A análise do gráfico da figura 5 permite observar que houve uma diminuição ligeira das densidades dos concretos após serem submetidos a elevadas temperaturas, principalmente em decorrência da perda de massa de água, verificado também por outros autores (MALIK et al., 2021; KHOURY, 2000).

Avaliando as resistências à compressão residual da figura 5, nota-se que houve um ganho de resistência para alguns concretos quando submetidos à temperatura de 200°C, seguido de uma perda expressiva, resultado

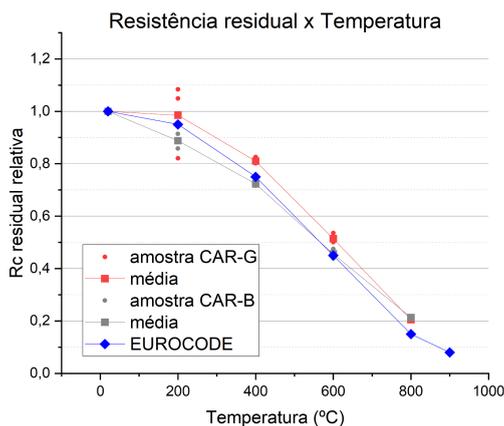


Figura 5 - Resistência à compressão residual relativa em função da temperatura

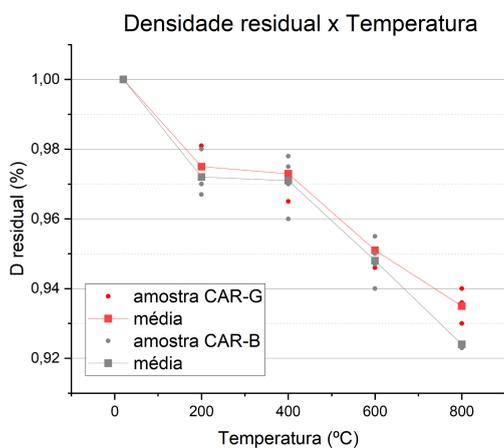


Figura 6 - Densidade residual relativa em função da temperatura

frequentemente encontrado na literatura (HAGER, 2015; SOLLERO, 2021). Para o concreto de basalto, por sua vez, apenas verificou-se queda na resistência mecânica residual. Ademais, o gráfico mostra que houve uma diminuição relativa maior da resistência dos concretos moldados com basalto em relação ao granito pronunciada nas temperaturas iniciais (200°C a 400°C). A diferença máxima obtida entre os concretos foi de cerca de 10%, diferença que reduziu até 800°C, quando as resistências residuais relativas de ambos os tipos de concreto atingiram valores similares.

A curva da EUROCODE (EUROCODE EN 1992-1-2, 3004), apresentada na figura 5, representa a curva normatizada da perda de resistência à compressão relativa em função do aumento de temperatura dos concretos com agregados silicosos, adotada pela norma nacional e os resultados obtidos experimentalmente convergem com os valores indicados pela norma. Contudo, é importante reforçar que a curva da EUROCODE trata-se de concretos de classe de resistência convencional, que possuem comportamentos distintos aos de classe de resistência alta. Mesmo assim, visto que parâmetros para concretos de alta resistência ainda não foram prescritos em norma nacional ou internacional, a comparação realizada pode ser tomada de maneira satisfatória com as ressalvas mencionadas.

No estudo de concretos de alta resistência, Hager et al. (2015) concluíram que concretos confeccionados distintos agregados, incluindo o granito e o basalto, manifestaram diferenças nas propriedades mecânicas residuais, principalmente no que se refere à resistência à compressão e ao módulo de Young, apesar de sofrerem alterações químicas semelhantes à medida que são expostos a temperaturas mais elevadas, corroborando o que foi concluído nos resultados apresentados nas figuras 5 e 6.

CONCLUSÕES

A partir do projeto de pesquisa elaborado, é possível concluir que, de modo geral, houve redução significativa de resistência mecânica residual dos concretos conforme o incremento da temperatura de exposição, ocorrendo de maneira distinta para cada tipo de concreto. Os comportamentos observados neste trabalho também acompanham de maneira similar os resultados encontrados por outros autores. Por fim, estudos futuros acerca das propriedades mecânicas residuais de concreto de diferentes classes de resistência e de distintos tipos de agregados graúdos devem ser desenvolvidos, buscando melhor compreensão da influência desses parâmetros para o comportamento do concreto exposto a elevadas temperaturas.

BIBLIOGRAFIA

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2022.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 43**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 65**: Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ALMEIDA, J. M. A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação do concreto convencional e não convencional com cinza de casca de arroz**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

ARAÚJO, R. C. A. **Concreto de alta resistência à base de escória álcali-ativada em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Cadastro Nacional de Produtores de Brita**. Coord. Geral Wagner Fernandes Pinheiro [et al]; Equipe Técnica por Júlio Recuero [et. al]. 82 p. Brasília: DNPM, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2**. Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design. CEN, Bruxelas, 2004.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETÓN. **CEB-FIP Bulletin 38**. Fire Design of Concrete Structures – Material, Structures and Modeling. 106 p. Lausanne, Switzerland, 2007.

KHOURY, A. G. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, [s.l.], v.2, p.429-447, 2000.

KIRCHHOFF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RAZAFINJATO, R. N. et al. High temperature behavior of a wide petrographic range of siliceous and calcareous aggregates for concretes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], V. 123, p. 261–273, 2016.

RILEM TC 129-MHT. **Recommendation of RILEM TC 129-MHT**: Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures – Compressive strength for service and accident conditions. 1995.

RILEM TC 200-HTC. **Recommendation of RILEM TC 200-HTC**: Mechanical concrete properties at high temperature - Modelling and applications. 2007.

SCHNEIDER, U. Concrete at High Temperatures – A General Review. **Fire Safety Journal** [s.l.], v. 13, p. 55-68, 1988.

SILVA, D. S. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SOLLERO, M. B. S. **Propriedades Mecânicas Residuais do Concreto em Situação de Incêndio**. 2019. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2019.

SOUZA, L. D. P.; AZERÊDO, G. A. de; SILVA, F. de A. **Comportamento do concreto sob altas temperaturas via planejamento experimental fatorial com configuração estrela**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 327/344, jan./mar. 2018.

WENDT, S.C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SHAHRAKI, M.; HUA, N.; KHORASANI, N. E.; TESSARI, A.; GARLOCK, M. Residual compressive strength of concrete after exposure to high temperatures: A review and probabilistic models. **Fire Safety Journal**. v. 135, p. 1-14, 2023.

ZHANG, D.; DASARIB, A.; TAN, K. H. On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers. **Cement and Concrete Research**. v. 113, p. 169-177, 2018.

AHSAN, M. H.; SIDDIQUE, M. S.; FAROOQ, S. H.; USMAN, M.; ALEEM, M. A. U.; HUSSAIN, M.; HANIF, A. Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures. **Journal of Building Engineering**. v. 50, p. 1-15, 2022.

ZHU, Y.; HUSSEIN, H.; KUMAR, A.; CHEN, G. A review: Material and structural properties of UHPC at elevated temperatures or fire conditions. **Cement and Concrete Composites**. v. 123, p. 1-20, 2021.

AMRAN, M.; HUANG, S. S.; ONAIZI, A. M.; MURALI, A.; ABDELGADER, H. S. Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review. **Construction and Building Materials**. v. 341, p. 1-32, 2022.

BABALOLA, O. E.; AWOYERA, P. O.; LE, D. H.; ROMERO, L. M. B. A review of residual strength properties of normal and high strength concrete exposed to elevated temperatures: Impact of materials modification on behavior of concrete composite. **Construction and Building Materials**. v. 296, p. 1-20, 2021.

SOLLERO, M. B. S.; MORENO JUNIOR, A. L.; COSTA, C. N. Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures – international standardization and influence of coarse aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 287, p. 1-14, 2021.

MALIK, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. **Construction and Building Materials**. v. 270, p. 1-19, 2021.

FERNANDES, B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. v. 10, n. 4, p. 838-863, 2017.

FLETCHER, I. A.; WELCH, S.; TORERO, J. L.; CARVEL, R. O.; USMANI, A. The behavior of concrete structures in fire. **Thermal Science**. p. 1-15, 2007.

HAGER, I.; TRACZ, T.; ŚLIWIŃSKI, J.; KRZEMIENI, K. The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature. **Fire and Materials**. v. 40, p. 668-682, 2015.