



PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DO CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Palavras-Chave: [concreto], [incêndio], [resistência mecânica],

Autores(as):

Maria Fernanda Cândido (aluna do ensino médio – bolsista PIBIC-EM)

Matheus Davóli Martinelli (aluno do ensino médio – bolsista PIBIC-EM)

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

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

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho apresenta os resultados de estágio em pesquisa de alunos do ensino médio no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da FECFAU-UNICAMP.

O tema original de interesse foi a “Avaliação do Comportamento do Concreto sob Temperaturas Elevadas”. Entretanto, de forma a apresentar conceitos e familiarizar os alunos com o ambiente de pesquisa e assuntos correlatos em desenvolvimento, nos primeiros meses de estágio foram ministradas palestras e alguns equipamentos do laboratório foram apresentados (Figuras 1 a 4), com seu funcionamento demonstrado. A seguir, os alunos do ensino médio puderam prosseguir com atividades correlatas ao tema de interesse desta pesquisa.

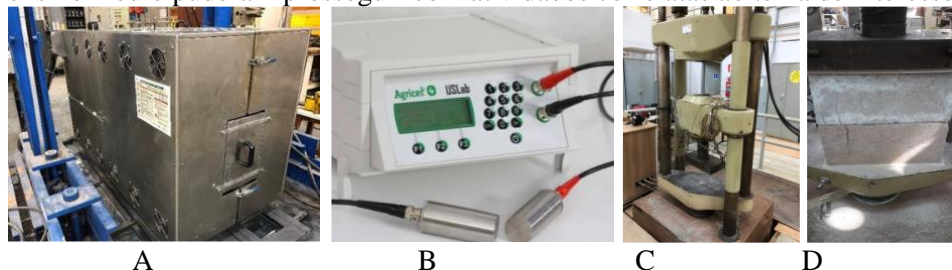


Figura 1 – Equipamentos de Laboratório. A: Forno elétrico para avaliação de elementos estruturais sob elevadas temperaturas, B: Equipamento de ensaio de ultrassom, C: Máquina universal de ensaios, D: Ensaio de bloco de concreto à compressão axial na máquina universal de ensaios.

Uma série de palestras foram ministradas nas primeiras 8 semanas do estágio. Inicialmente, as palestras tiveram um conteúdo geral, relacionadas ao universo da Engenharia Civil, às estruturas e aos materiais de construção. Nestas palestras foram apresentados conceitos necessários ao melhor acompanhamento das pesquisas em desenvolvimento pelo Grupo. Logo a seguir, palestras mais específicas, com conteúdo relacionado diretamente às pesquisas em andamento pelo grupo de pesquisadores foram apresentadas. Conceitos mais específicos sobre cada pesquisa em andamento foram apresentados. A aluna de doutorado Marcela Barros apresentou palestra sobre “Concreto”, os alunos de doutorado Everton de Freitas e Tainá Frazão apresentaram palestra sobre “Argamassas”, o aluno de mestrado Thiago Priosta falou sobre “Concreto em Situação de Incêndio”, a aluna de doutorado Rafaela Amaral apresentou o tema “Alvenaria Estrutural em Situação de Incêndio” e a aluna de doutorado Marinara Moura apresentou a palestra “O ensaio de Ultrassom no Concreto”.

Após esta introdução de conceitos necessários ao bom andamento do estágio, iniciou-se as atividades de acompanhamento e apoio aos ensaios de laboratório em andamento pelo grupo de alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado do grupo. Ensaios de caracterização de argamassas e misturas de concreto foram acompanhados. Ensaios mais específicos de aquecimento de amostras de concreto, argamassa e blocos de concreto em fornos para avaliação do comportamento resistente em situação de incêndio foram acompanhados.

Bibliografia inicial sobre os temas específicos do estágio foram discutidas: “ O Incêndio”, “Resistência ao Fogo do Concreto” e “Resistência ao Fogo da Alvenaria Estrutural”

PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DO CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

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 balizar o limite em que os materiais estão capacitados para resistir a altas temperaturas por um intervalo de tempo suficiente para garantir a segurança dos usuários da edificação.

Entretanto, 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 *explosive spalling*, ou “lascamento explosivo” (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 térmicas 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

A norma brasileira ABNT NBR 15200:2012 (ABNT, 2012) apresenta curvas de redução das propriedades mecânicas de concretos silicosos e remete à norma europeia EN 1992-1-2 (CEN, 2004) para concretos calcários. Nota-se, contudo, que tais curvas podem se apresentar contra a segurança quando utilizados em análises *pós-incêndio*, que diferem das que avaliam o comportamento das estruturas *durante* o incêndio, e derivam de ensaios realizados em programas europeus, cujos agregados silicosos de uso comum – como o sílex – possuem comportamento marcadamente diferente do que os utilizados no Brasil – como o granito e o basalto (RAZAFINJATO, 2016; SOLLERO, 2019).

Desta maneira, neste estágio, os alunos do ensino médio tiveram contato, e participaram ativamente, de pesquisa em andamento na FECFAU-UNICAMP dedicada à obtenção de curvas de decréscimo da resistência mecânica residual de amostras de concreto, executadas com agregados de uso comum em nosso país, expostas a temperaturas compreendidas entre 200 °C e 800 °C, e de resistência à compressão usual, alta e ultra alta. No período do estágio, foram acompanhados de perto os resultados de avaliação de misturas de concretos basáltico de alta resistência sob elevadas temperaturas.

METODOLOGIA:

Foram utilizados dois traços de concreto de alta resistência (f_{ck} 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. A caracterização em relação às propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados nos concretos é apresentada nas tabelas 1, 2, 3 e 4 e nas figuras 2 e 3.

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.

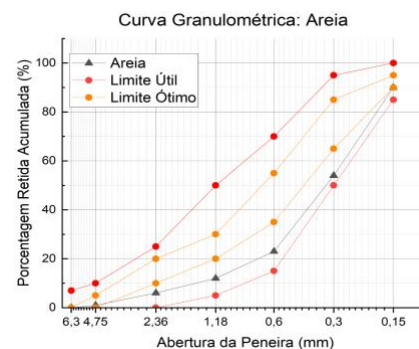
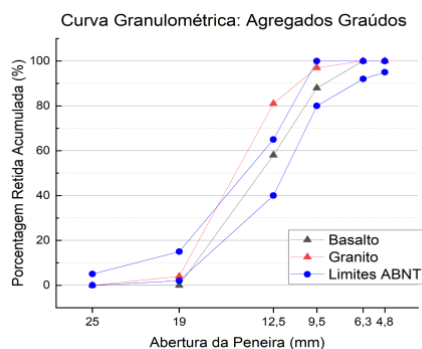


Figura 2 – Curva granulométrica dos agregados graúdos

Figura 3 - Curva granulométrica da areia média

Tabela 3 - Propriedades do Cimento CP II E 32

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
24,9	6,21	2,39	52,2	2,41	1,86	0,17	0,77	0,30	0,13	0,32	0,25	7,35

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

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.

As propriedades iniciais dos concretos, após 90 dias da moldagem, são apresentadas 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/m ³)	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.

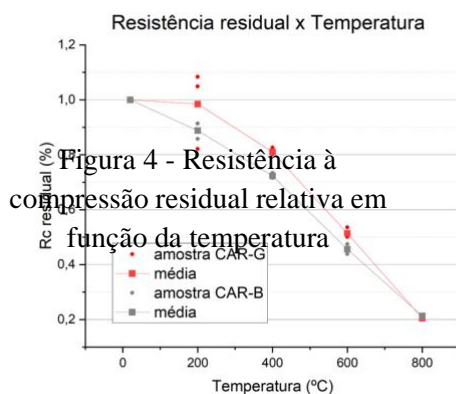
	d (Kg/m ³)	Rc (MPa)	E (GPa)
	2330	59,8	-
	2337	49,6	20,5
	2337	68,3	20,5
	2324	71,7	21,0
$\bar{x} \pm \sigma$	2332 ± 6	62,3 ± 9,9	20,7 ± 0,3

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

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Em posse dos resultados das propriedades mecânicas iniciais dos concretos e dos resultados dos ensaios pós-aquecimento, 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 4).



Avaliando as resistências à compressão residual da Figura 4, nota-se que houve um ganho de resistência para alguns concretos quando submetidos à temperatura de 200°C, seguido de uma perda expressiva, resultado 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.

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 apresentado nas Figura 4.

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.

Pode-se concluir que o objetivo do estágio foi alcançado, com a participação ativa dos alunos do ensino médio nas pesquisas em andamento no Laboratório de Estruturas e Materiais da FECFAU e a sua consequente introdução ao universo da pesquisa científica.

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 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.
- 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.
- KHOORY, A. G. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, [s.l.], v.2, p.429-447, 2000.
- KIRCHHOF, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- HAGER, I.; TRACZ, T.; ŚLIWIŃSKI, J.; KRZEMIEŃ, 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.