



PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DE CONCRETO COM AGREGADO CALCÁRIO UTILIZANDO ENSAIOS DE ULTRASSOM

Palavras-Chave: CONCRETO, ALTAS TEMPERATURAS, ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

Autoras:

FERNANDA ALVES CAMPELO, UNICAMP

Prof^a. Dr^a. CINTHYA BERTOLDO, UNICAMP

Prof^a. Dr^a. GISLEIVA CRISTINA DOS SANTOS FERREIRA (orientadora), UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Dentro da engenharia civil, um dos desafios é garantir o desempenho seguro e eficiente de edificações durante e após situações de incêndio, sobretudo no que se refere ao comportamento dos materiais. As altas temperaturas afetam a integridade estrutural das edificações, variando em função do tipo de material utilizado. O concreto se destaca devido o melhor comportamento em relação às altas temperaturas, quando comparado a outros materiais como a madeira e o aço (KNYZIAK, KOWALSKI e KRENTOWSKI, 2019; CAETANO et al., 2019).

Entretanto, as estruturas em concreto podem apresentar danos importantes a depender de vários fatores, relacionados às suas características (materiais, classe de resistência) e às variáveis do incêndio (faixa de temperatura, tempo de exposição) (KHOURY, 2000). A falta de informações técnicas confiáveis sobre as propriedades mecânicas residuais dos concretos, compromete a vida útil das edificações existentes e daquelas que serão projetadas, agravando questões sociais como o déficit habitacional que persiste no cenário nacional e a integridade da vida humana (BRACKMANN et al., 2021).

Temperaturas elevadas provocam significativa degradação de suas propriedades mecânicas, como resistência a compressão e módulo de elasticidade, além do aumento da porosidade. Isso ocorre devido a degradação dos materiais que compõem o concreto (agregados e pasta cimentícia), causada pela perda da água livre e adsorvida, além de reações químicas nos minerais dos agregados (SANTOS & RODRIGUES, 2016; CAETANO et al., 2019; SOLLERO et al., 2021; MOURA et al., 2023).

Sollero et al. (2021) concluíram no estudo que realizaram sobre as alterações das propriedades residuais de concretos expostos a altas temperaturas, que o tipo do agregado graúdo influencia diretamente na resistência à compressão. Este estudo corrobora as conclusões de outros estudos, onde o agregado oriundo de calcário apresenta menor resistência residual do que outras rochas como o granito e o basalto (SANTOS & RODRIGUES, 2016). Mas o agregado de calcário pode apresentar

melhor comportamento em concretos de alta resistência, devido à maior porosidade, o que facilita a saída dos gases oriundos da evaporação da água, reduzindo a fissuração e evitando o *spalling* (CAETANO et al., 2019).

Nesse contexto, identifica-se também a dificuldade de se as propriedades mecânicas residuais do concreto (resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade) com ensaios destrutivos, devido o número de amostras necessárias, além do custo elevado. Então, o uso de ensaios não destrutivos (END) têm se mostrado interessante para estimar as propriedades residuais dos concretos. Entre esses ensaios, destaca-se o ultrassom para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (ASTM C597-16). Com a obtenção da velocidade do pulso ultrassônico (VPU), conforme estabelecido pela NBR 8802 (ABNT, 2019), também é possível identificar variações na microestrutura do concreto, permitindo a identificação de degradações e comprometimentos na integridade do elemento estrutural ou amostra. Alguns estudos já realizaram esse tipo de ensaio para avaliar o comportamento mecânico do concreto exposto a altas temperaturas, entretanto, não consideraram o tipo de agregado graúdo. Portanto, o objetivo deste trabalho foi determinar o módulo de elasticidade dinâmico residual de concretos com agregado calcário, utilizando ensaios de ultrassom.

METODOLOGIA:

Para composição dos corpos de prova, foram empregados os seguintes materiais: Areia Média Comum, Agregado Graúdo (Rocha calcária), Cimento Portland CP II-F, Superplastificante (MC-PowerFlow 4000), Sílica proveniente do bagaço de cana-de-açúcar e água (SBCA). Foram adotados dois traços experimentais de concreto, sendo um com resistência convencional (CCV) e outro de alta resistência (CAR), conforme detalhado na Tabela 1 (proporções dos materiais em volume). No traço de alta resistência, foram incorporados um aditivo redutor de água (superplastificante), na proporção de 0,4% em massa de cimento e SBCA na proporção de 10% (em função do consumo de CP em massa). A definição das dosagens seguiu diretrizes de estudos realizados pelo Grupo de Pesquisa em Materiais e Tecnologias Sustentáveis (GP-MATS), vinculado à FT e FECAFAU, UNICAMP (PRIOSTA, 2024; TREZZA, 2022; LIMA, 2023).

Identificação	Aglomerante		Agregado	Sílica	Aditivo	Relação a/c
	CP	Areia	Brita			
CCV	1	2	3	-	-	0,49
CAR	1	1,5	1,5	0,1	0,004	0,35

CCV: Concreto Convencional; CAR: Concreto de Alta resistência com aditivo de sílica e superplastificante.

Tabela 1 – Traços experimentais dos concretos utilizados (em volume).

Os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico, com 100 mm de diâmetro por 300 mm de altura, respeitando a relação de altura/diâmetro entre 3 e 4, conforme recomendado pela RILEM TC

129-MHT 5 (ano). Para cada traço de concreto (CCV e CAR) foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos, sendo 4 destinados a cada uma das três condições de temperatura: ambiente, 400 °C e 600°C.

Após o período de cura de 90 dias, os corpos de prova foram submetidos ao processo de aquecimento em forno elétrico (Modelo ML1300/60) e à caracterização das propriedades mecânicas residuais, ou seja, resistência à compressão (R_c), módulo de elasticidade (E) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d). Os ensaios seguiram uma taxa de aquecimento e resfriamento de 1°C/min, com patamar de manutenção de temperatura por 60 minutos, aos 400°C e 600°C, conforme metodologia proposta por Sollero (2019) e de acordo com as recomendações das comissões técnicas RILEM TC 200-HTC (2007) e RILEM TC 129-MHT (2004).

Os ensaios de ultrassom foram realizados com equipamento Pundit 200 (Proceq, Suíça), transdutores de onda de compressão (P) de 54 kHz e transdutores de onda de cisalhamento (S) de 40 kHz. Os ensaios no equipamento foram conduzidos conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 8802 (2019), utilizando o método de transmissão direta do pulso ultrassônico (Figura 1). Esses ensaios foram necessários para determinar a VPU e E_d . Os ensaios de compressão para obtenção do módulo de elasticidade estático foram realizados em uma prensa hidráulica Solotest com capacidade de 120 toneladas, e em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC (Modelo DL-30000), com capacidade de 30 toneladas (Figura 2).

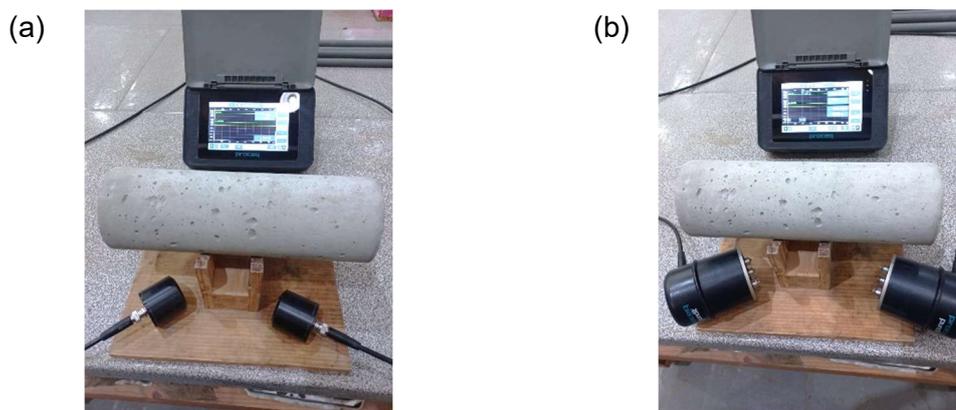


Figura 1 – (a) visão geral do esquema de medição por meio de transdutores de faces planas e (b) de faces exponenciais.

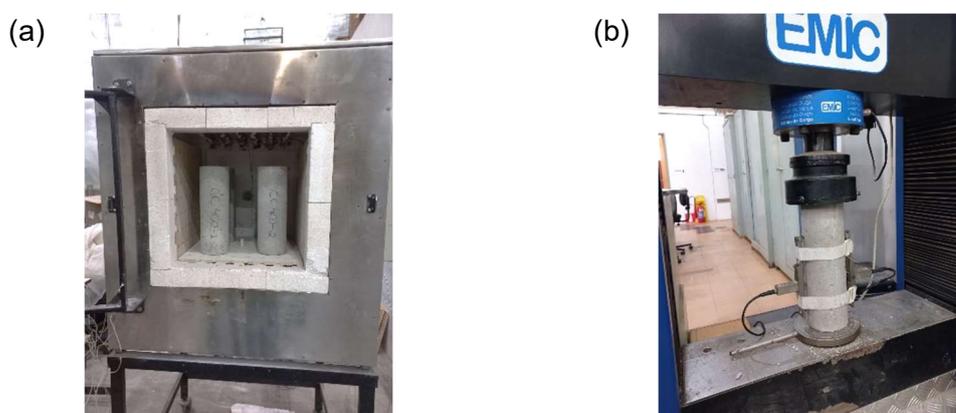


Figura 2 – (a) corpos de prova posicionados no forno mufla e (b) realização do ensaio de compressão para obtenção do módulo de elasticidade estático.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A tabela 2 apresenta os resultados de resistência à compressão (R_c), módulo de elasticidade estático (E) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d), após 90 dias de cura, conforme temperaturas pré-definidas.

<u>Traço</u>	<u>Valores Nominais</u>			<u>Valores Residuais</u>		
	<u>R_c (MPa)</u>	<u>E (GPa)</u>	<u>E_d (GPa)</u>	<u>R_c (MPa)</u>	<u>E (GPa)</u>	<u>E_d (GPa)</u>
CCV Amb.	31,74	25,89	41,86*	1,00	1,00	1,00
CCV 400 °C	32,95	14,74	15,35	1,04	0,57	0,37
CCV 600 °C	18,61	5,78	4,60	0,59	0,22	0,11
CAR Amb.	43,14	27,41	23,66	1,00	1,00	1,00
CAR 400 °C	37,20	22,32	19,43	0,86	0,81	0,82
CAR 600 °C	20,38	8,15	8,01	0,47	0,30	0,34

*Dado retirado de PRIOSTA, 2024.

Tabela 2 – Resistência à compressão (R_c) e módulos de elasticidade estático (E) e dinâmico (E_d) dos concretos estudados de acordo com o traço e temperatura, representados em valores nominiais e residuais.

Ao analisarmos os dados relacionados a R_c , E e E_d dos concretos estudados, é possível observar variações conforme o traço e temperatura submetidos. A resistência à compressão do traço CCV apresentou aumento após exposição aos 400° C com relação à condição ambiente (4%), comportamento que pode ser associado à continuidade de processos de hidratação e à redução de umidade interna, que reduz a porosidade (CAETANO et al., 2019; KODUR, 2014). Entretanto, isso não ocorreu no CAR na mesma temperatura (400°C), o que pode ser explicado pela maior fissuração devido a menor porosidade, prejudicando a saída dos gases formados pela evaporação da água livre e combinada (DIAS et al., 2020). Com relação ao módulo de elasticidade estático (E) e dinâmico (E_d), os resultados dos dois concretos apresentaram maior sensibilidade a estas propriedades, quando expostos a altas temperaturas. Ao comparar os valores, verifica-se que E e E_d apresentaram valores nominiais e residuais similares entre si, indicando relação direta para as temperaturas analisadas. Uma análise geral indica que, embora o CAR apresente melhor desempenho térmico inicial, há maior deterioração em relação ao CCV.

CONCLUSÕES:

Este estudo teve como objetivo determinar as propriedades mecânicas residuais (E_d , E e R_c) de concretos com agregado calcário submetidos a altas temperaturas utilizando ensaios de ultrassom. Os resultados mostram que tanto o CCV quanto o CAR apresentam variações significativas de suas propriedades mecânicas quando expostos a altas temperaturas, especialmente aos 600°C. Ao comparar o comportamento dos concretos, verifica-se que a classe de resistência apresentar maior influência do que o tipo de agregado. Além disso, foi possível verificar que o módulo de elasticidade, tanto estático quanto dinâmico, é mais sensível aos efeitos da elevação de temperatura do que a resistência a compressão, reforçando sua importância na avaliação e dimensionamento de estruturas em concreto armado.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova – ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C597-16**: *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete* Philadelphia, 2016.
- BRACKMANN, G. D.; ROCHA, J. S.; SCHÄFER, L. O. C.; LIMA, R. C. A. **Segurança estrutural de habitações de interesse social em situação de incêndio: análise normativa dos sistemas estruturais mais utilizados no Brasil**. In: 12º Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Congresso Virtual. 2021. p. 1-10. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352197218_Seguranca_estrutural_de_habitacoes_de_interesse_s. Acesso em 21 de julho de 2025.
- CAETANO, H.; et al. Effect of high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concrete. **Concrete and Building Materials**, v. 199, p. 717-736, 2019.
- CONCRETO SOCIETY. **Technical Report 68**. Assessment, design and repair of fire damage concrete structures. 83 p. Camberley, United Kingdom, 2008.
- DIAS, A. R.; et al. Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n.2, 2020.
- KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v.2, p. 429-447, 2000.
- KNYZIAK, P.; KOWALSKI, R.; KRENTOWSKI, J. R. Fire damage of RC slab structure of a shopping center. **Engineering Failure Analysis**, v. 97, p. 53-60, 2019.
- KODUR, V. **Properties of Concrete at Elevated Temperatures**. Isrn Civil Engineering, [S.L.], v. 2014, p. 1-15, 13 mar. 2014. Hindawi Limited.
- LIMA, W. R. Determinação da profundidade de deterioração de prismas de concreto expostos a altas temperaturas, utilizando ensaios de ultrassom. PIBIC/CNPq/UNICAMP, Set. 2023.
- PRIOSTA, Thiago Drozdowski. **Determinação do módulo de elasticidade residual de concretos submetidos a altas temperaturas utilizando ensaios de ultrassom**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UNICAMP, Campinas, 2024.
- 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.
- SANTOS, Cristina Calmeiro; RODRIGUES, João Paulo C. Calcareous and granite aggregate concretes after fire. **Journal of Building Engineering**, v. 8, p. 231-242, 2016.
- 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**, [S.L.] v. 287, jun. 2021. Elsevier BV.
- TREZZA, H. T. Determinação da profundidade de deterioração de concretos expostos à altas temperaturas em corpos de prova cúbicos. PIBIC/CNPq/UNICAMP, Ago. 2022.