



DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE DETERIORAÇÃO DE CONCRETO EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS, UTILIZANDO ENSAIOS DE ULTRASSOM

Palavras-Chave: ensaios não destrutivos, incêndio, desempenho.

Autores:

Wesley Rodrigues Lima - FECFAU/UNICAMP

Profa. Dra. Gisleiva Cristina S. Ferreira (orientadora) - FECFAU/UNICAMP

Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Júnior - FECFAU/UNICAMP

Doutoranda Marinara Andrade N. Moura (coorientadora) - FECFAU/UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O estudo das propriedades mecânicas residuais de concretos após exposição a altas temperaturas é de extrema importância para a segurança e durabilidade de estruturas em ambientes sujeitos a incêndios ou altas temperaturas. A avaliação precisa e confiável do grau de degradação do material nessas condições é essencial para garantir a integridade estrutural e a eficácia das medidas de reabilitação e reforço. Nesse contexto, os ensaios não destrutivos têm se mostrado fundamentais para a caracterização do concreto nestas condições, pois permitem a avaliação das propriedades internas do material sem a necessidade de danificar a estrutura. Entre os ensaios não destrutivos, destaca-se o ensaio de ultrassom, que se baseia na medição da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) para caracterização mecânica e identificar alterações na homogeneidade do concreto (MOURA et al., 2023). Conforme estabelecido pela norma NBR 8802 (ABNT, 2019), a VPU é uma medida sensível às alterações macro e microestrutura do concreto. Entretanto, ao direcionar os estudos para inspeções de elementos estruturais expostos a altas temperaturas, verifica-se a necessidade de obter informações sobre a profundidade de degradação, considerando o cobrimento da armadura, parte mais sensível do concreto armado a estas condições de agressividade.

Silva et al. (2019), realizaram uma pesquisa com objetivo de estimar a profundidade de fissuras em concreto, utilizando ensaios de ultrassom. Os autores exploram a relação entre a VPU e a extensão das fissuras, onde desenvolveram uma metodologia de ensaio promissora....

Daungwilailuk et al. (2017) também utilizaram o ensaio de ultrassom para investigar os danos causados em concreto após a exposição ao fogo. Os resultados indicaram que o uso desta técnica não destrutiva foi eficiente, permitindo identificar áreas críticas e orientar decisões de reparo e reabilitação.

Assim, esse trabalho tem como objetivo obter a profundidade de deterioração de concretos expostos a altas temperaturas, utilizando ensaios de ultrassom. Nesta etapa preliminar, o foco principal

foi definir a metodologia de ensaio, tanto a parte de aquecimento como a obtenção dos valores de tempo de transmissão do pulso ultrassônico (transmissão direta e indireta). Além disso, identificar uma metodologia de cálculo para analisar os dados e estimar a profundidade de degradação do concreto.

METODOLOGIA:

Esse trabalho faz parte de um projeto de Pesquisa vinculado ao grupo de pesquisa MATS - Materiais e Tecnologias Sustentáveis, instalado nas Faculdades de Tecnologia e Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP. O traço de concreto utilizado no trabalho foi definido em conjunto com o grupo de pesquisa MATS, com a proporção de 1:2:3 (cimento: areia natural média: agregado graúdo) e uma relação água/cimento de 0,49 (classe de resistência de 30 MPa). Para a caracterização mecânica desse concreto, moldou-se 6 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 300 mm), seguindo as recomendações RILEM TC 200-HTC e RILEM TC 129-MHT. A etapa de estimativa de profundidade de degradação exigiu a moldagem de 3 prismas (150 mm x 150 mm x 500 mm). Esses corpos de prova foram mantidos nos moldes por 7 dias e, em seguida, armazenados em laboratório por um período mínimo de 90 dias, antes de iniciar os ensaios de aquecimento. Os corpos de prova prismáticos foram fatiados em duas partes com dimensões de 15x15x35cm e 15x15x15 cm, conforme ilustrado na Figura 1, o que foi necessário devido às dimensões do forno mufla utilizado na etapa de aquecimento, localizado no Laboratório de Estruturas da FECFAU/Unicamp.

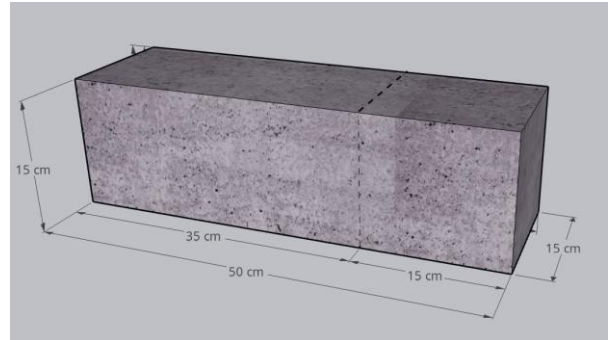


Figura 1 - Dimensões do corte



Figura 3 – Posicionamento dos termopares tipo K

Com auxílio de uma estrutura metálica, um bloco de concreto de sacrifício e lã de vidro, foi possível posicionar o prisma na porta do forno, garantindo a vedação necessária para que o calor interno do forno estivesse em contato com toda a face voltada para o interior do forno (150 mm x 350 mm), conforme figura 2. Para monitorar a

temperatura, utilizou-se 6 termopares do tipo K, considerando 2 para cada profundidade de monitoramento (25 mm; 50 mm; 75 mm), equidistantes a partir do eixo vertical (figura 3). Para fixação dos termopares foi utilizado uma argamassa refratária e solidificada com fonte de calor. (Figura 4).

O aquecimento seguiu a curva ISO 834 e foi monitorado com 1 termopar de referência posicionado no interior do forno, a 15 cm da face



Figura 2 – Adaptação com uma face exposta no forno Mufla



Figura 4 – fonte de calor para solidificação da massa refratária

aquecida do prisma. O critério de parada do aquecimento foi quando os termopares posicionados no interior dos prismas atingiram a temperatura de 300°C, conforme recomendado pelo relatório FIB 46 (FIB, 2008), considerando as 3 profundidades de monitoramento definidas para esse trabalho. E etapa de resfriamento do prisma ocorreu com a porta do forno entreaberta, simulando um resfriamento natural, quanto também ocorreu o monitoramento através dos 6 termopares.



Figura 6 – Malha para medição Indireta do tempo do pulso ultrassônico

Os ensaios de ultrassom foram conduzidos utilizando o equipamento USLab (Agricef, Brasil), com transdutores exponenciais e 45 kHz de frequência. O tempo do pulso ultrassônico foi obtido por transmissão direta e indireta, de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019) (figura 5). Esses ensaios foram realizados antes do aquecimento (temperatura ambiente) e após 24 h do aquecimento dos prismas. O método de transmissão indireto utilizado neste trabalho é uma adaptação daquele proposto por Naik, Malhotra e Popovich (2004), onde 3 linhas de medição foram consideradas nas faces de maior dimensão (150 mm x 350 mm), onde os transdutores foram posicionados a cada 5 cm de distância, formando uma malha conforme ilustrado na figura 6

Deve-se salientar que metade dos corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de ultrassom, na mesma idade de cura dos prismáticos. Posteriormente, determinou-se a resistência à compressão com obtenção da deformação específica, para cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e módulo de elasticidade (E). A outra metade foi utilizada para se obter as mesmas propriedades, mas após o aquecimento, além da VPU residual.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados obtidos a partir das medições do tempo de transmissão do pulso ultrassônico, transmissão indireta, na face do prisma que ficou exposta à temperatura até atingir 300 C estão demonstrados nas figuras 7, 8 e tabela 1, considerando as 3 profundidades (25 mm; 50 mm; 75 mm). Nesta tabela, destacam-se os valores dos coeficientes "V1" e "V2", os quais foram determinados por meio dos ajustes lineares 1 e 2, respectivamente. A distância em que as retas de ajuste se interceptam é representada por "X". A partir desses dados, foi possível calcular a espessura de concreto deteriorada, conforme a seguinte



Figura 5 – Aparelho USLab Agricef e Transdutores exponencial 45 KHz

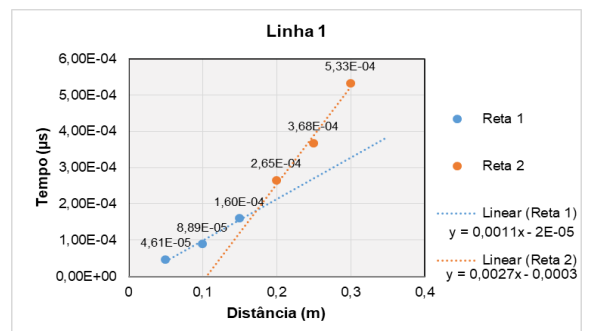


Figura 7 - Gráfico com retas e ajustes lineares da linha 1

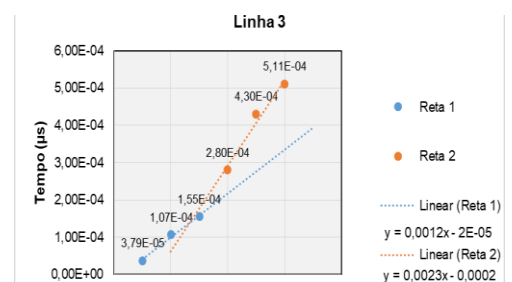


Figura 8 - Gráfico com retas e ajustes lineares da linha 3

Equação, $(e = \frac{X}{2} * \sqrt{\frac{V2-V1}{V2+V1}})$. Todos os cálculos e ajustes lineares foram realizados utilizando o software Excel.

	V1	V2	X (m)	e (m)
Linha 1	0,0011	0,0027	0,175	0,05677
Linha 2	0,002	0,0023	0,4333	0,05723
Linha 3	0,0012	0,0023	0,1636	0,04586
Média				53,3 mm

Tabela 1 – Dados obtido dos Gráficos

Ao analisar a Tabela 1, podemos afirmar que o modelo matemático proposto por Naik et al. (2004) se mostrou bastante eficaz na determinação da espessura deteriorada. Notavelmente, em todas as medições realizadas, os valores de "V2" foram maiores que os de "V1", foi obtida uma média de 53,3 mm, evidenciando a capacidade do método em identificar camadas de diferentes qualidades de concreto.

concreto.

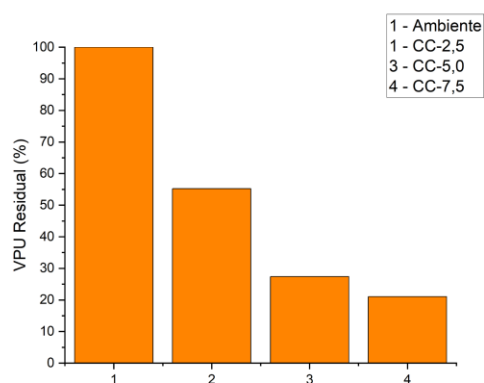


Figura 9 – Gráfico da VPU residual

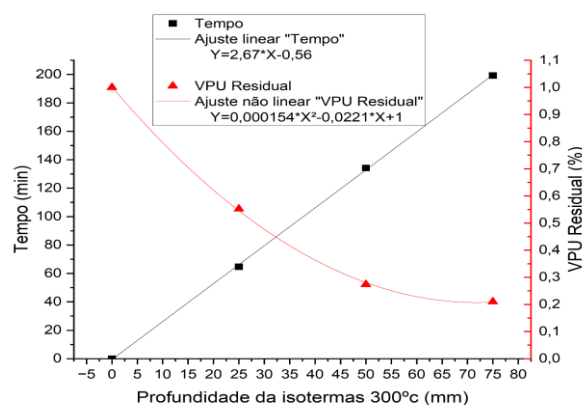


Figura 10 – Gráfico comparando VPU residual, tempo e Profundidade de monitoramento a 300°C

Conforme figura 9, podemos observar a VPU residual durante a transmissão do pulso ultrassônico com método direto (transversal), fornecendo informações mais precisas. Segundo Yang et al. (2009), essa tendência de redução da VPU após exposição a altas temperaturas era esperada, já que a VPU é afetada pelas alterações na microestrutura do concreto (fissuras e alterações químicas).

Com base nisso, foi elaborado um gráfico (Figura 10) que relaciona a progressão da isoterma de 300°C com o tempo total de exposição e a VPU residual, obtida por transmissão direta (direção transversal). Assim, foi possível visualizar a evolução da temperatura até atingir 300°C, e a sua influência na VPU residual.

Considerando a premissa de que o concreto pode sofrer enfraquecimento quando exposto a temperaturas superiores a 300°C, tornando-se estruturalmente instável e representando riscos para os usuários caso nenhuma ação adequada seja tomada (TASK GROUP, 2008), esta pesquisa constatou reduções de aproximadamente 46% na VPU. Essa redução corresponde ao comprometimento da camada mais superficial em torno de 25 mm de profundidade.

Além disso, foram verificados valores residuais de VPU de cerca de 27% para deteriorações com 50 mm de profundidade e de 21% para 75 mm de profundidade.

Comparando os resultados com o estudo de Trezza et al. (2022), encontramos diferenças nos valores de espessura danificada. Isso pode ser explicado pelas maiores dimensões dos corpos de prova usados na presente pesquisa, levando a uma exposição mais longa ao fogo. Além disso, o uso de calcário como agregado, que sofre carbonatação em altas temperaturas, pode ter contribuído para a maior deterioração interna observada. As diferenças nas dimensões e tipos de agregados utilizados nos corpos de prova são essenciais para compreender as implicações práticas desses resultados.

CONCLUSÕES:

Com base nos objetivos propostos e nas etapas experimentais realizadas neste estudo, podemos concluir que o modelo matemático proposto por NAIK, et al, 2004, mostrou-se altamente eficaz na análise da profundidade deteriorada com a técnica não destrutiva VPU de forma indireta. Além disso, observou-se que a redução da VPU em relação à profundidade de monitoramento não apresenta um comportamento linear.

BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2016 **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova** – ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: **Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.
- DAUNGWILAILUK, T. et al. **Evaluating damaged concrete depth in reinforced concrete structures under different fire exposure times by means of NDT and DT techniques**. Engineering Journal, v. 21, 2017.
- FELICETTI, R. **Assessment methods of fire damages in concrete tunnel linings**. Fire Technology, v. 49, p. 509-529, 2013.
- FIB, F.I.D.B. Bulletin 46 - Fire design of concrete structures - **structural behaviour and assessment**. Lausanne, Suíça: EPFL, 2008.
- NAIK, T.R.; MALHOTRA, V.M.; POPOVICS, J.S. The ultrasonic pulse velocity method. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- 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.
- SILVA, M. T. A.; ROCHA, J. H. A.; MONTEIRO, E. C. B. **Estimativa da profundidade de fissuras em concreto através da velocidade de ondas ultrassônicas**. Revista Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, n. 4, 2019.
- TATARINOV, Alexey; RUMJANCEVS, Aleksandrs; MIRONOV, Viktors. **Assessment of cracks in pre-stressed concrete railway sleepers by ultrasonic testing**. Procedia Computer Science, v. 149, p. 324-330, 2019.
- TREZZA, Henrique Tobace; FERREIRA, Gisleiva Cristina Santos. **Determinação da Profundidade de Deterioração de Concretos Expostos à Altas Temperaturas em Corpos de Prova Cúbicos**. Iniciação Científica. Universidade Estadual de Campinas, 2022.
- YANG, Hsuanchih; LIN, Yiching; HSIAO, Chiamen; LIU, Jian-You. **Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity**. Fire Safety Journal, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 121-130, jan. 2009.