XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Avaliação e correlação de propriedades, medidas por meio de técnicas não destrutivas, em concretos estruturais

Evaluation and correlation of properties obtained through non-destructive techniques in structural concretes

Antônio Carlos Assis Leonel
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | antonioleonel@ufg.br
Bruna Ferreira de Almeida
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | ferreiraalmeida@discente.ufg.br
Andrielli Morais de Oliveira
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | andriellimorais@ufg.br
Oswaldo Cascudo
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | ocascudo@ufg.br

Resumo

O uso de técnicas não destrutivas para complementar diagnósticos de estruturas de concreto tem se tornado cada vez mais interessante, pois possuem custo acessível e fornecem resultados rápidos. Dessa forma, é objetivo do artigo analisar a correlação entre os parâmetros obtidos de esclerometria e ultrassom com os resultados de módulo de elasticidade estático e resistência à compressão axial, durante as primeiras idades (1 a 14 dias) de concretos, moldados em laboratório com classe de resistência de C45 MPa e C25 MPa, sob condições de cura úmida. Observou-se boas correlações entre os ensaios com coeficientes de correlação (R^2) entre 0,87 e 1,00, tanto para esclerometria, quanto para ultrassom.

Palavras-chave: Concreto. Ensaios não destrutivos. Esclerometria. Ultrassom.

Abstract

The use of non-destructive techniques to complement the diagnosis of concrete structures has become increasingly interesting, as they are affordable and provide fast results. In this way, the aim of this paper is to analyze the correlation between the parameters obtained by ultrasound and rebound hammer tests with the results of static modulus of elasticity and axial compressive strength, during the first ages (1 to 14 days) of concrete, molded in the laboratory with strength class of C45 and C25 MPa, under wet curing conditions. As a result of, good correlations were observed between the tests with correlation coefficients (R^2) between 0.87 and 1.00, both for Rebound Hammer test and for ultrasound.

Keywords: Concrete. Non-destructive testing. Rebound hammer Test. Ultrasound.

LEONEL, A. C. A.; ALMEIDA, B. F.; OLIVEIRA, A.M.; CASCUDO, O. Avaliação e correlação de propriedades, medidas por meio de técnicas não destrutivas, em concretos estruturais. ENTAC2022. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-13.

INTRODUÇÃO

Estruturas em concreto armado devem atender a requisitos de resistência mecânica, desempenho e durabilidade [1]. Nesse sentido, a composição de concretos duráveis à luz de "Indicadores de *Durabilidade*" e o uso de técnicas não destrutivas (TND) para comprovação de parâmetros estabelecidos em projeto, ganham real importância em um contexto civil de execução e de pós-obras [2].

A análise de propriedades de concretos, como resistência à compressão e módulo de elasticidade estático já vem sendo realizada em obras e construções em geral. Contudo, outros indicadores da qualidade do concreto, como por exemplo, a velocidade de propagação de onda ultrassônica e o índice esclerométrico também podem ser utilizados como dados de entrada para otimização da composição de concretos, redução de períodos de cura e de tempo para retirada de formas. Essas análises podem ser realizadas por meio de técnicas e métodos destrutivos e não destrutivos [3].

Neste sentido, as técnicas não destrutivas (ND) são utilizadas para investigação e monitoramento de propriedades do concreto sem causar danos à estrutura. Além disso, possuem custo acessível, resultados rápidos e permitem avaliação *in situ* dessas estruturas [4]. Dentre as técnicas ND, o ensaio de índice esclerométrico (IE) e o ultrassom são comumente utilizados para análises *in situ* [4-6].

Por meio do ensaio de IE, é possível obter-se o valor aproximado da resistência à compressão superficial de um elemento estrutural [7] e, do ensaio de ultrassom, é possível avaliar a qualidade da estrutura no que diz respeito à sua homogeneidade, existência de falhas internas, profundidade de fissuras, diferenças de características entre camadas [8-10], além de se estimar o módulo de elasticidade dinâmico, a partir de correlações com a velocidade de propagação da onda [11].

Alguns estudos têm se dedicado a combinações de técnicas não destrutivas para um diagnóstico assertivo da condição de estruturas de concreto, na confiabilidade das correlações (estimar um parâmetro a partir dos valores obtidos de outro) e dos resultados obtidos. No entanto, uma das principais dificuldades no uso de técnicas ND reside no fato de que parâmetros físicos a serem obtidos dependem de vários parâmetros do material e das condições ambientais, cujos efeitos são difíceis de desacoplar [12-14].

Este trabalho tem como objetivo analisar a correlação entre os parâmetros obtidos, por meio das técnicas de ultrassom e esclerometria, com os resultados de módulo de elasticidade estático e resistência à compressão axial, durante as primeiras idades (1 a 14 dias) de concretos, moldados em laboratório com classe de resistência de C45 MPa e C25 MPa, sob condições de cura úmida.

METODOLOGIA

A dosagens dos concretos (Tabela 1) escolhidos tiveram classe de resistência à compressão de 25 MPa e 45 MPa aos 28 dias de idade e abatimento classe S-160 (concreto bombeável) [15-16]. Não foram utilizadas adições minerais.

Tabela 1: Proporcionamento dos materiais constituintes dos concretos classe C45 MPa e C25 MPa estudados.

Concreto C45		
Descrição	Traço unitário (Kg)	Consumo (Kg/m^3)
Cimento Portland CP II-F 40	1,00	350
Areia média natural	2,04	714
Brita 1 de origem granítica	3,09	1082
Aditivo superplastificante	0,0015	0,525
Relação água/cimento (a/c)	0,50	175
Concreto C25		
Descrição	Traço unitário (Kg)	Consumo (Kg/m^3)
Cimento Portland CP II-F 40	1,00	310
Areia média natural	2,30	714
Brita 1 de origem granítica	3,49	1082
Aditivo superplastificante	0,0010	0,310
Relação água/cimento (a/c)	0,60	186

Fonte: os autores.

Foram moldados de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm e 15x30 cm, além de 2 prismas com dimensões de 20x30x55 cm. A moldagem foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 5738 [17].

Ademais, o procedimento de cura adotado foi cura úmida em ambiente climatizado com temperatura controlada de $23 \pm 2°C$ e umidade relativa do ar acima de 95% [15].

Os concretos foram caracterizados quanto a resistência à compressão e módulo de elasticidade. Contudo, antes de cada idade, realizou-se a retífica de topo e base dos corpos de prova cilíndricos e, durante o ensaio, foram utilizados discos de neoprene (confinados em pratos metálicos para uma distribuição uniforme das tensões). Os ensaios foram realizados em prensa hidráulica classe I com capacidade máxima de 2000 kN, sob uma velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s.

A Tabela 2 resume as idades de ensaio, dimensões e quantidade de corpos de prova utilizados no estudo.

Tabela 2: Detalhamento do programa experimental: técnicas, idades de ensaio, dimensões e quantidade de corpos de prova utilizados.

Ensaio	Idades de ensaio	Corpos de prova (CP)
Resistência à compressão axial [16]	1, 3, 7 e 14 dias	Média de resultados de 3 CP's 10x20 cm cilíndricos por idade
Módulo de elasticidade [17]	1, 3, 7 e 14 dias	Média de resultados de 3 CP's 15x30 cm cilíndricos por idade
Velocidade de Onda Ultrassônica [8]	1 a 14 dias	Média de 3 leituras no CP prismático
Índice Esclerométrico (IE) [7]	3, 7 e 14 dias	Média de 16 leituras no CP prismático

Fonte: os autores.

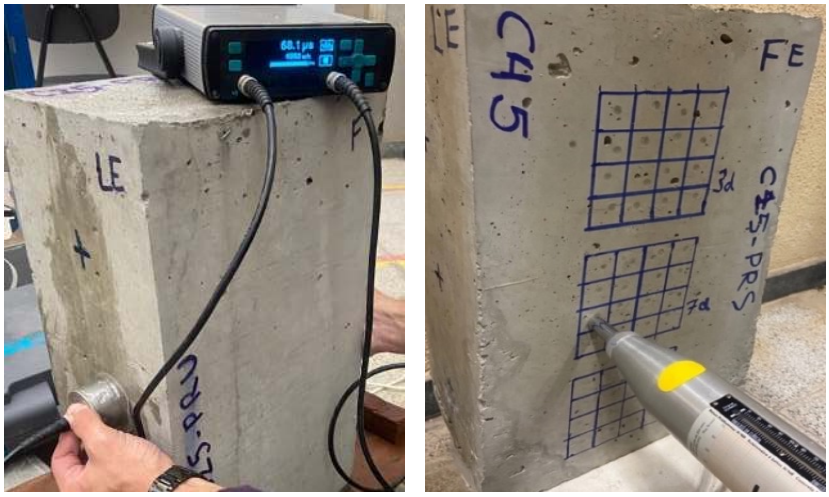
O ensaio de propagação da onda ultrassônica foi realizado de acordo com a NBR 8802 [8], por meio do equipamento PROCEQ Pundit Lab +, com o uso de transdutores com frequência de 54 kHz (Figura 1). Foi utilizada a metodologia direta, nas laterais (30 cm de espessura) do corpo de prova prismático, sendo realizadas três leituras em cada ponto de medição e em três pontos de alturas diferentes, distantes entre si

aproximadamente 15 cm. A opção pela realização de alturas de medição de onda ultrassônica deu-se, principalmente, para atenuar possível efeito de adensamento do concreto nos valores de velocidade de onda obtidos.

Também foi realizado o ensaio de dureza superficial dos concretos, por meio do IE em prismas (Figura 1). O ensaio foi realizado de acordo com as orientações da NBR 7584 [7] e com o uso do esclerômetro de reflexão Schmidt, fabricante PROCEQ modelo N-34.

Optou-se pela não realização do ensaio de IE no 1º dia de idade, pois em idades muito precoces, o ensaio pode causar micro fissuração e danos indesejados próximos à superfície do concreto. Em cada uma das idades de realização do ensaio foram efetuados 16 impactos sobre a superfície do prisma, na direção horizontal. Os resultados obtidos foram registrados e aqueles que diferiram mais que 10% da média aritmética foram desconsiderados e uma nova média aritmética foi calculada [7].

Figura 1: Ensaios não destrutivos realizados em prisma de concretos C45 e C25 MPa: propagação de ondas ultrassônicas (à esquerda) e ensaio de dureza superficial - esclerometria (à direita).



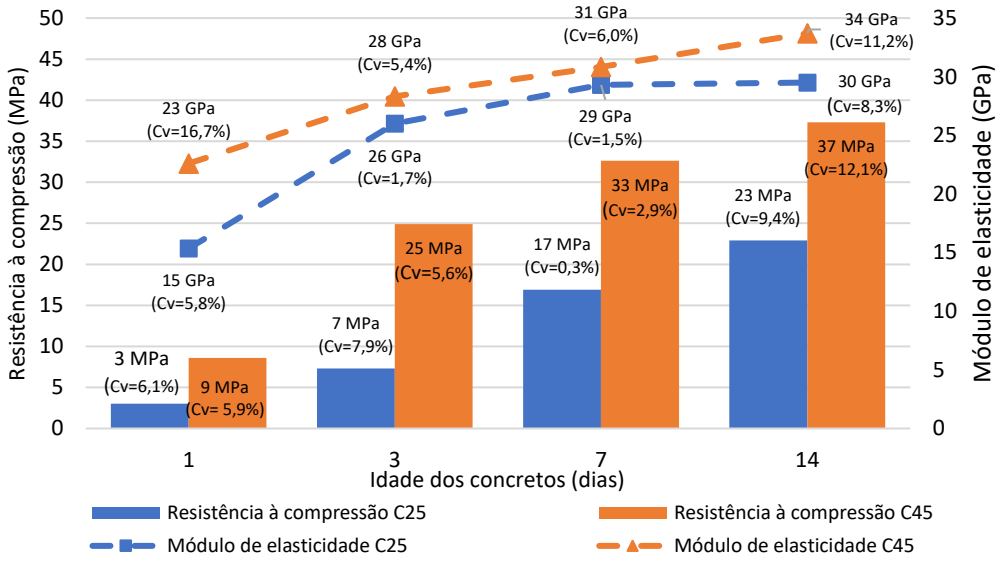
Fonte: os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CARACTERIZAÇÃO POR MEIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados médios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos nas idades de 1, 3 ,7 e 14 dias estão apresentados na Figura 2.

Figura 2: Resultados médios e coeficientes de variação (Cv), obtidos de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos nas idades de 1 ,3, 7 e 14 dias.



Fonte: os autores.

Como esperado, houve acréscimo da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com o avanço da idade nos dois concretos [19-20]. Para o concreto C45 verificou-se que que aos 3 dias obteve-se 55% da resistência à compressão esperada para 28 dias (45 MPa), 73% aos 7 dias e 82% aos 14 dias. Já no concreto C25, observou-se um percentual de 28% da resistência à compressão aos 3 dias, 68% aos 7 dias e 92% aos 14 dias. O consumo de cimento por metro cúbico do concreto C45 é maior que o C25 e isso pode explicar o maior acréscimo de resistência nos três primeiros dias.

Outra observação são que os valores de módulo de elasticidade elevados ainda em idades precoces nos dois concretos. A explicação para esse fenômeno pode ser atribuída à tipologia (granítica) e quantidade de agregados graúdos presentes na mistura [20-23]. O ganho progressivo do valor de módulo ao decorrer das idades dá-se devido ao ganho de resistência da pasta de cimento hidratada [22, 23].

Do ponto de vista de *performance*, o concreto C25 apresenta um ganho de resistência aos 14 dias próximo da resistência esperada para os 28 dias, porém seu valor de módulo de elasticidade não demonstrou um ganho significativo entre o 7° e o 14° dia. Já o concreto C45 demonstra um crescimento de resistência acelerado aos 3 dias (55%), mas que cresce com uma intensidade menor entre o 7° e o 14° dia, com ganho absoluto de apenas 9%. Outro detalhe são os coeficientes de variação (Cv) da resistência à compressão e do módulo e elasticidade, em geral, abaixo de 13% para todas as idades.

ESCLEROMETRIA

Os resultados de IE - das idades de 3, 7 e 14 dias, bem como seus respectivos coeficientes de variação, estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de IE e respectivos coeficientes de variação (Cv).

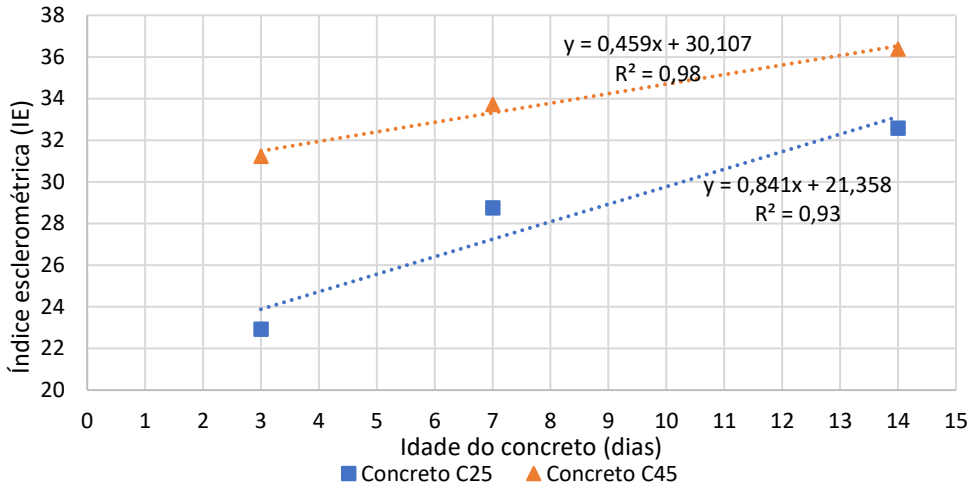
Idade	Concreto C25		Concreto C45	
	Índice esclerométrico (IE)	Coeficiente de variação (Cv)	Índice esclerométrico (IE)	Coeficiente de variação (Cv)
3 dias	23	4,2%	31	5,1%
7 dias	29	5,0%	34	4,9%
14 dias	33	4,6%	36	5,6%

Fonte: os autores.

Como esperado, nota-se uma tendência de crescimento nos IE com o acréscimo da idade, sendo de aproximadamente 16% entre 3 e 14 dias no concreto C45 e 43% no concreto C25. Nota-se baixos valores de variação nos ensaios, sendo os maiores valores da ordem de 5,0% para C25 e 5,6% para C45. Estes valores de coeficiente de variação apresentam baixa dispersão nos resultados [7, 21, 22].

Em comparação ao concreto C45, nota-se que o concreto C25 apresenta um maior ganho percentual de dureza superficial. Tal fato fica evidente quando se analisa as curvas de crescimento dos dois concretos (Figura 3), em que o coeficiente angular da reta do concreto C25 (0,84) mostra-se com valor cerca de 1,8 vezes superior ao coeficiente angular da reta do concreto C45 (0,46).

Figura 3: Correlação da evolução dos resultados de IE dos concretos.



Fonte: os autores.

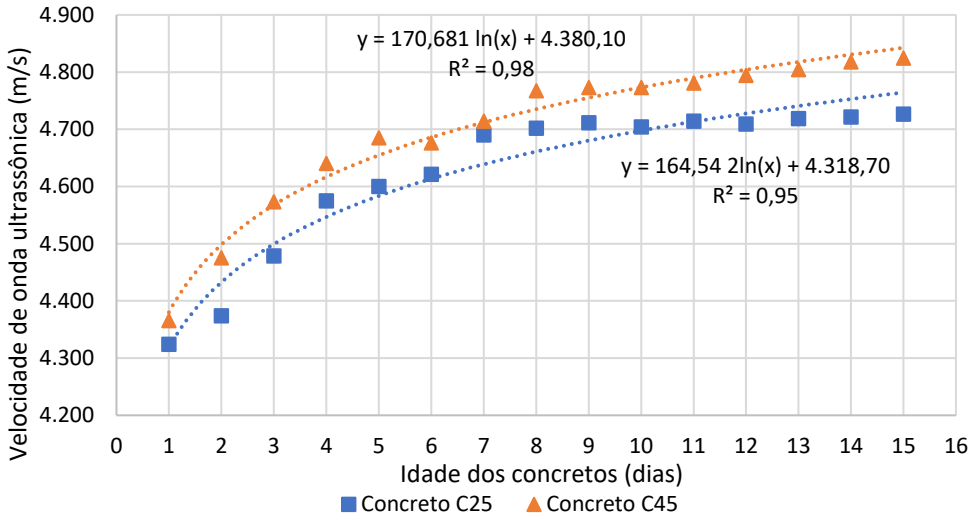
Os coeficientes de correlação R^2 obtidos da Figura 3 de IE *versus* idade dos concretos foram de 0,93 para o C25 e 0,98 para o C45. Espera-se que a dureza superficial do concreto aumente ao longo do tempo, não só pelo ganho de resistência em função de sua hidratação, mas também por ação de carbonatação no concreto.

A literatura [21-23] apresenta que a carbonatação é um dos fatores que pode influenciar o valor de IE, uma vez que os elementos constituintes da matriz hidratada vão sendo substituídos por carbonatos e outros produtos. Isso altera propriedades na superfície do concreto como alcalinidade, permeabilidade, porosidade, resistência mecânica e dureza superficial.

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

A Figura 4 apresenta os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos estudados *versus* idade (1 a 14 dias).

Figura 4: Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos estudados.



Fonte: os autores.

Como esperado, as velocidades de propagação de onda ultrassônica no concreto com maior resistência à compressão apresentam valores mais elevados. É perceptível uma pequena diferença, em média de 2,0%, após o primeiro dia, no valor da velocidade de propagação da onda ultrassônica entre o concreto C25 e C45. Apesar de pequena, nota-se que essa diferença se mantém aproximadamente constante nas idades até o 15° dia. Este efeito também foi observado pela literatura [20]. Fatores como menor consumo de cimento e maior relação a/c no concreto C25 em relação ao C45, sugerem que ele possua uma maior porosidade e menor densidade. Assim, além de menor resistência característica, o concreto C25 tende a apresentar um maior tempo de propagação e, portanto, menor velocidade de onda.

Observou-se baixos coeficientes de variação nas medidas realizadas, sendo em média de 1,2% para o concreto C25 e 0,7% para o C45. Os maiores valores de coeficiente de variação obtidos foram de 1,6% para o concreto C25 e 0,9% para o C45.

Cabe ressaltar, ainda, que do ponto de vista da durabilidade e de acordo com a classificação da qualidade do concreto, os dois concretos em análise podem ser classificados como de excelente qualidade, pois após 3 dias de cura já apresentavam valores acima de 4.500 m/s de velocidade de propagação de onda [28].

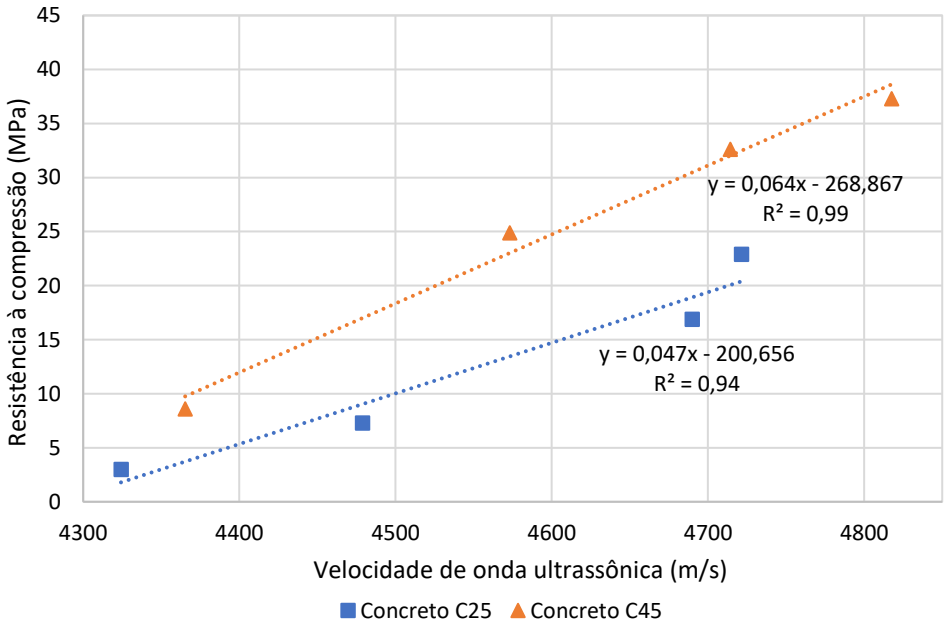
Além disso, a partir das curvas, pode-se extrair as equações logarítmicas que regem o crescimento da velocidade de onda ultrassônica nos dois concretos. Obteve-se R^2 igual a 0,95 e 0,98 para as curvas de evolução dos concretos C25 e C45, respectivamente. A partir dessas curvas, observa-se uma tendência após os 14 dias, de estabilização na velocidade de propagação de onda ultrassônica nos dois concretos estudados [20][24].

DISCUSSÃO GERAL E CORRELAÇÕES ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E DESTRUTIVOS

Destaca-se que os dados apresentados foram obtidos para apenas 2 tipos de concretos e sem adições minerais. Ensaios adicionais com outros tipos de concreto, com adições minerais, com porosidades diferentes e em idades mais avançadas são necessários para uma maior amostragem, representatividade dos ensaios, extrapolação e validação das correlações obtidas.

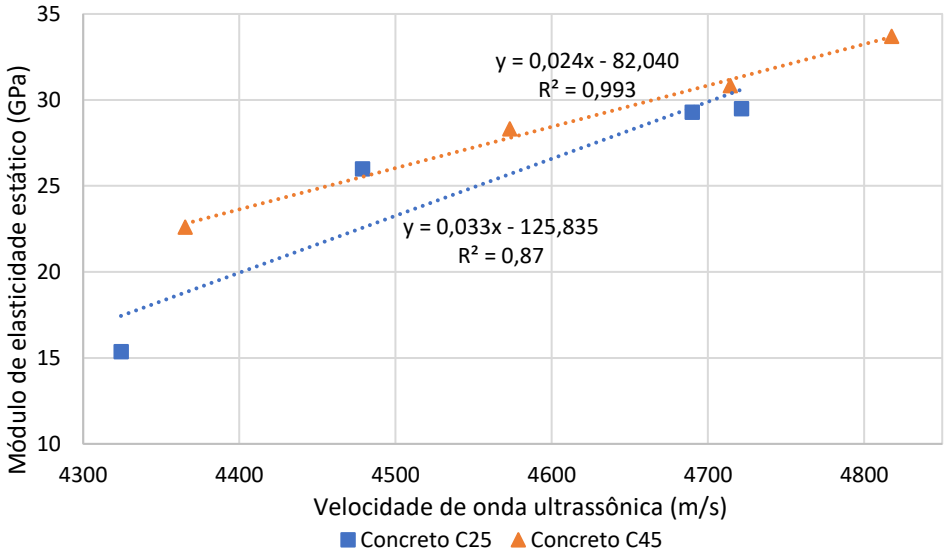
Assim, a partir dos resultados apresentados nos itens anteriores, realizou-se correlações dos dados de IE e velocidade de onda ultrassônica com os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com a finalidade de se prever, a partir de ensaios não destrutivos, os principais parâmetros de resistência do concreto em poucas idades. As curvas obtidas são apresentadas nas Figuras 5 a 8.

Figura 5: Curvas de correlação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica e resistência à compressão dos concretos estudados nas idades de 1 a 14 dias.



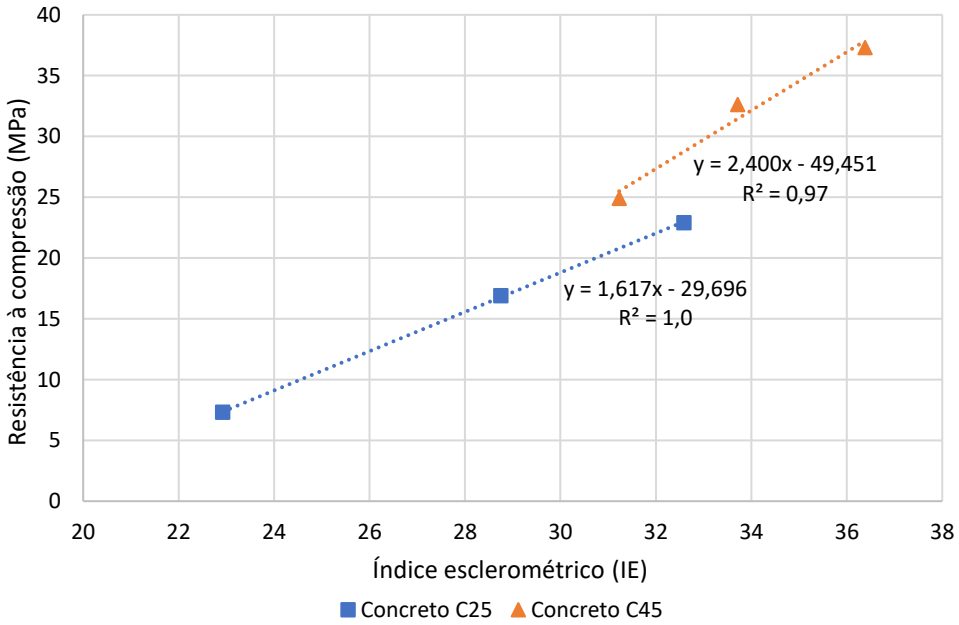
Fonte: os autores.

Figura 6: Curvas de correlação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica e o módulo de elasticidade dos concretos estudados nas idades de 1 a 14 dias.



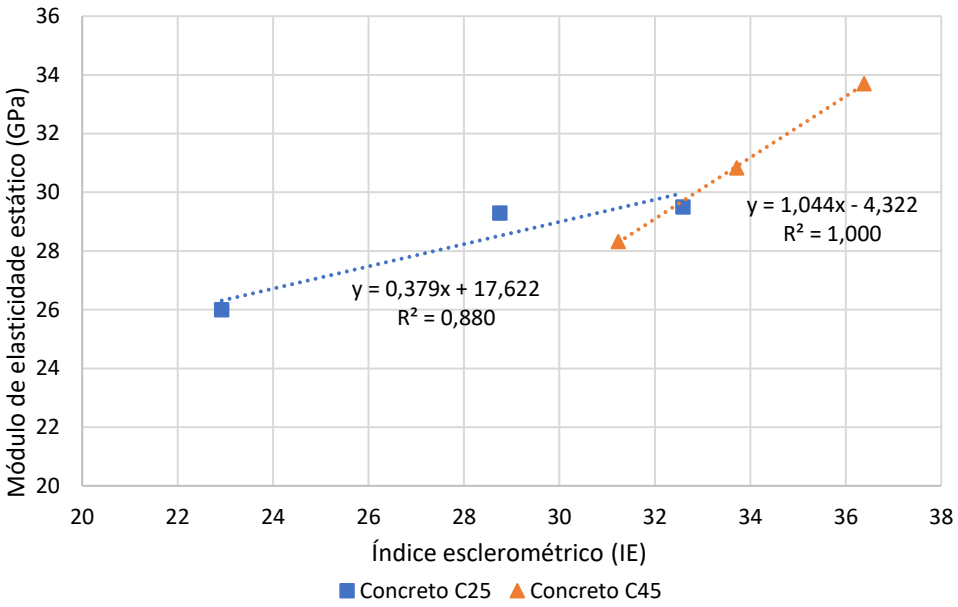
Fonte: os autores.

Figura 7: Curvas de correlação entre o IE e a resistência à compressão dos concretos estudados nas idades de 1 a 14 dias.



Fonte: os autores.

Figura 8: Curvas de correlação entre o IE e módulo de elasticidade dos concretos estudados nas idades de 1 a 14 dias.



Fonte: os autores.

Para o concreto C25, nota-se que as curvas que apresentam maior coeficiente de correlação com a resistência à compressão e módulo de elasticidade é a do IE, com R^2 igual a 1,0 e 0,88, respectivamente. Para o concreto C45, os valores de coeficiente de correlação R^2 foram 0,97 para a correlação entre IE e resistência à compressão e correlação entre IE e 1,0 para módulo de elasticidade.

Com relação ao ensaio de propagação de onda ultrassônica, também foram obtidas curvas com coeficiente de correlação adequadas à sua utilização. Para o concreto C25 foi obtido R^2 igual a 0,94 e 0,87 para resistência à compressão e módulo de elasticidade. Para o concreto C45, esses valores foram de 0,99 e 0,99, respectivamente.

A partir dos resultados apresentados dos concretos em análise, pode-se aferir que os ensaios não destrutivos de IE e velocidade de propagação de onda ultrassônica, apresentaram boas correlações com resistência à compressão e módulo de elasticidade nos dois concretos avaliados.

Em geral, na literatura [20, 24, 29] os coeficientes de correlação obtidos com ensaios não destrutivos para concretos sem adições e nas primeiras idades é da ordem de 0,80 a 1,0. Entretanto, é necessário observar que, na realidade, o concreto não é um material isotrópico. Logo, as curvas de correlação apresentadas devem ser usadas apenas para capturar uma tendência e não para se fazer o cálculo exato.

Ademais, é muito pertinente que seja realizada essa mesma análise de correlação em idades de hidratação mais avançadas com a finalidade de identificar quais as idades críticas em que fenômenos como carbonatação, por exemplo, possam alterar as condições superficiais de realização dos ensaios nos concretos em estudo [20, 22, 24-27].

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e amostragem testada, foi possível concluir que:

- obteve-se uma boa correlação entre os resultados nas primeiras idades (1 a 14 dias) para os ensaios de resistência à compressão ou módulo de elasticidade *versus* ensaios ND, com valores de R^2 acima de 0,8. Entretanto, cabe ressaltar que a utilização das técnicas não destrutivas deve ser feita com cautela e visando identificar, principalmente, uma tendência de comportamento. Assim, o uso das curvas de correlação é possível e viável desde que observadas algumas condições básicas para realização de cada método de ensaio, como idade, umidade, cura e integridade da superfície do concreto a ser analisado.
- para o concreto C25, obteve-se coeficientes de correlação R^2 entre IE e resistência à compressão da ordem de 1,00 e de 0,88 para IE e módulo de elasticidade. Quando analisada a correlação da velocidade de onda ultrassônica com os parâmetros de resistência, obteve-se R^2 de 0,94 e 0,87, respectivamente, para resistência à compressão e módulo de elasticidade.
- para o concreto C45, obteve-se coeficientes de correlação R^2 entre IE e resistência à compressão da ordem de 0,97, e 1,00 para IE e módulo de elasticidade. Quando analisada a correlação da velocidade de onda ultrassônica com os parâmetros de resistência, obteve-se R^2 de 0,99 e 0,993, respectivamente, para resistência à compressão e módulo de elasticidade.
- por fim, os resultados apresentados revelam que é possível e viável a realização da correlação entre os ensaios destrutivos e não destrutivos apresentados, embora terem sido obtidos para apenas 2 tipos de concretos sem adições minerais. Como proposta de pesquisas futuras têm-se a realização de ensaios adicionais e com outros tipos de concreto e em idades mais avançadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto de P&D - PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás FURNAS e FUNAPE/UFG/EECA/LABITECC.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

[2] BAROGUEL-BOUNY, V.; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. **Durabilidade dos concretos a partir da abordagem do desempenho.** In: Durabilidade do concreto - Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Editores da tradução: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. Cap. 8. Tradução: Pedro Kopschitz Xavier Bastos.

[3] LEHNER, P.; HRABOVÁ, K. Relationship of Time-Dependent Parameters from Destructive and Non-Destructive Tests of Structural Concrete. **Mathematics**, 10, 460. 2022.

[4] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.1R**: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength. Detroit, 2013.

[5] BREYSSE. D. Non-destructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. **Construction and Building Materials,** v. 33, pp. 139-163, 2012.

[6] TSIOULOU, O., LAMPROPOLULOS, A., PASCHALIS, S. Combined Non-Destructive testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**, 131, pp. 66-77, 2017.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584:** Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802:** Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

[9] GRACE, E. O.; JOHN, A. Recent advances in non- destructive testing of concretes and structures: An outlook. **Journal of Civil Engineering and Construction Technology**. Vol. 10 (3), pp. 20-31. 2019

[10] SILVA, M.T.A.; ROCHA, J.H.A.; MONTEIRO, E.C.B.; PÓVOAS, Y.V.; RABBANI, E.R.K. (2019). Avaliação do ensaio de ultrassom para a estimação da profundidade de fissuras em concreto. **Revista ALCONPAT**, 9 (1), pp. 79 – 92.

[11] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881:** Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, England: BSI, 1986.

[12] LIM, M.K., CAO, H. Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 1310-1315, 2013.

[13] BREYSSE, D.; KLYSZ, G. B.; DÉROBERT, C. X.; SIRIEIX, A. C.; LATASTE, A. J. F. How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures. **Cement and Concrete Research**, 2008.

[14] CAMARGO, M. V., FERRARI, V. J. Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END). **Matéria** (Rio de Janeiro), 26(03), 2021.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaios de compressão de corpos de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

[19] VIEIRA, A. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; CORDEIRO, G. C. Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 236, p. 117553, mar. 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117553.

[20] VELAY-LIZANCOS, M.; MARTINEZ-LAGE, I.; AZENHA, M.; GRANJA, J.; VAZQUEZ-BURGO, P. Concrete with fine and coarse recycled aggregates: e-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 193, p. 323-331, dez. 2018. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.209.

[21] GÓRA, J.; PIASTA, W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 13, dez. 2020.

[22] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. IBRACON, 2014.

[23] NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do concreto.** PORTO ALEGRE: Bookman, 2013. 448 p.

[24] MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Nondestructive testing of concrete**. 2.ed. Florida – EUA: crcp, 2004. 310p.

[25] MERAH, A.; KROBBA, B. Effect of the carbonatation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 148, p. 874-886, set. 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.098.

[26] CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 849-887, 2011.

[27] CASCUDO. O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1 ed. São Paulo: PINI; Goiânia: Editora UFG, 1997.

[28] CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.

[29] TRIPATHI, Deep; KUMAR, Rakesh; MEHTA, P.K.; SINGH, Amrendra. Evaluation of a sustainable self-compacting concrete using destructive and non-destructive testing. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 58, p. 830-835, 2022.http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.389.