

Avaliação das propriedades mecânicas do concreto através da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Evaluation of mechanical properties of concrete by ultrasonic wave propagation velocity

RESUMO

Atualmente, técnicas não destrutivas vêm ganhando notoriedade pois possibilitam avaliar as condições do concreto de forma ágil, confiável e sem causar danos ao elemento analisado. Dentre elas, destaca-se a ultrassonografia, que baseada na velocidade de pulso da onda ultrassônica permite realizar um controle de qualidade, detectar defeitos e avaliar as propriedades mecânicas de um concreto. Este trabalho teve como objetivo estabelecer correlações entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade do concreto com a velocidade de pulso ultrassônico. Utilizando um concreto dosado, visando resistência à compressão, aos 28 dias de idade, próxima a 40 MPa, foram moldados corpos de prova cilíndricos, e submetidos aos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade, e cúbicos, submetidos aos ensaios de ultrassom, nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Os resultados obtidos permitiram atestar a homogeneidade do concreto e estabelecer equações matemáticas para estimativa da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em função da velocidade de pulso da onda ultrassônica.

PALAVRAS-CHAVE: Velocidade de pulso ultrassônico. Resistência à compressão. Módulo de elasticidade.

ABSTRACT

Nowadays, non-destructive techniques have been gaining notoriety because of the possibility to evaluate the concrete conditions quickly, reliably and without causing damage to the analyzed element. The ultrasound method gets highlighted, because its based on the ultrasonic wave pulse speed that allows to perform a quality control, detect defects and evaluate the mechanical properties of a concrete. This work aimed to establish correlations between the axial compressive strength and the modulus of elasticity of the concrete with the ultrasonic pulse velocity. Using a dosed concrete aiming 40 MPa of compressive strength at 28 days of age, cylindrical specimens were cast and submitted to axial compression and elastic modulus tests, and cubic specimens, submitted to ultrasound tests, in the ages 1, 3, 7, 14 and 28 days. The results allowed to attest the concrete homogeneity and to establish mathematical equations to estimate the compressive strength and elastic modulus as a function of the ultrasonic wave pulse velocity.

KEYWORDS: Ultrasonic pulse velocity. Compressive strength. Modulus of elasticity.

Kevin Augusto Cupehinski
kevincupehinski@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, Paraná, Brasil.

Gustavo Savaris
gsavaris@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, Paraná, Brasil.

César Augusto Hoffmann
cesar.hoffmann@prof.unipar.br
Universidade Paranaense. Umuarama, Paraná, Brasil.

Everlei Câmara
everlei@prof.unipar.br
Universidade Paranaense. Umuarama, Paraná, Brasil.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O concreto, por ser o material construtivo mais utilizado no mundo, e também elemento fundamental dos mais variados projetos de engenharia, necessita de ferramentas de avaliação e controle de qualidade, de modo a garantir a segurança das estruturas (LORENZI, *et. al.*, 2009).

Nesse sentido, métodos não destrutivos tornam-se atraentes, principalmente, porque possibilitam avaliar estruturas de concreto de forma rápida e eficiente sem deterioração da peça, como ocorre em análises químicas, físicas e mecânicas (CARELLI, *et. al.*, 2014). Dentre as técnicas não destrutivas, destaca-se a ultrassonografia que pode ser considerada como uma das mais promissoras para a avaliação de estruturas de concreto, pois possibilita realizar uma avaliação da homogeneidade do material, facilitando o diagnóstico de defeitos e o controle das condições mecânicas do concreto estrutural ao longo de sua vida útil (LORENZI, *et. al.*, 2009).

O método consiste na medição da velocidade de pulso ultrassônico da onda propagada por um elemento de concreto. A velocidade é influenciada pela natureza do material, pela sua porosidade e pela presença de vazios ou de água no sistema de poros, entre outros fatores (DA SILVA FILHO, *et. al.*, 2011). A presença de vazios no concreto causa o retardo das ondas, em função da baixa velocidade do som no ar, a interpretação dos resultados, portanto, baseia-se no fato de que a velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos depende da densidade e das propriedades elásticas do material (NAIK, MALHOTRA E POPOVICS, 2004).

Este trabalho busca estabelecer correlações entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade com a velocidade de propagação da onda ultrassônica medida em um traço de concreto, considerando as direções de aplicação da onda ultrassônica em relação ao lançamento do concreto, visando verificar a homogeneidade e qualidade do elemento.

MATERIAL E MÉTODOS

Em uma betoneira com eixo inclinado foram produzidos 75 litros de concreto seguindo o traço 1:2,13:2,68 (cimento:areia:brita), com relação água cimento (a/c) igual a 0,52. Como aglomerante foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), como agregado graúdo rocha britada de origem basáltica com dimensão máxima característica de 19mm e, massa específica de 3006 kg/m³, e como agregado miúdo foi utilizada areia quartzosa proveniente do rio Paraná, com massa específica de 2645,50 kg/m³ e módulo de finura igual a 2,81.

Após a produção do concreto, a consistência foi medida por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (slump-test), resultando em um valor igual a 70 mm. Em seguida foram moldados 30 corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para realização dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade, e 3 corpos de prova cúbicos, com 20 cm de aresta, para realização dos ensaios de ultrassom. Todos os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a concretagem e curados submersos em água a temperatura de (21 ± 2)°C.

Nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias, seis corpos de prova cilíndricos foram retificados e ensaiados no laboratório de materiais da UTFPR – Campus Toledo, utilizando uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 2000 kN para determinação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático, de acordo com as normas NBR 5729 (ABNT, 2018) e NBR 8522 (ABNT, 2017), respectivamente.

Os ensaios de ultrassom foram realizados no laboratório de Estruturas da UNIPAR - Campus Umuarama, utilizando um equipamento da marca Pundit Lab – PROCEQ com transdutores de 54 kHz, conforme recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2013). A transmissão da onda ultrassônica foi feita de forma direta, ou seja, com os transdutores posicionados em faces opostas do corpo de prova, como mostra a Figura 1. Além disso, foi utilizado vaselina como acoplante entre os transdutores e a superfície do corpo de prova. Foram realizadas 10 leituras em cada uma das três faces opostas, resultando em 30 leituras de ultrassom por corpo de prova e 90 leituras por idade.

Figura 1 - Ensaio de ultrassom: transmissão direta da onda



Fonte: Autoria própria (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para os ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

Ensaio	Corpo de prova	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Resistência à compressão (MPa)	CP1	9,49	25,74	35,32	40,69	46,20
	CP2	11,10	24,12	30,84	41,14	48,87
	CP3	9,88	24,76	31,82	43,78	49,02
	CP4	11,30	25,30	35,40	43,50	48,42
	CP5	11,20	27,90	34,80	40,10	47,10
	CP6	11,00	27,90	34,40	45,90	46,49
	Resist. Média (MPa)	10,66	25,95	33,76	42,52	47,68
	Desv. Padrão (MPa)	0,71	1,46	1,78	2,04	1,13
Módulo de elasticidade (GPa)	CP7	20,60	30,10	27,50	37,40	39,35
	CP8	21,70	30,10	31,20	34,00	35,38
	CP9	22,00	33,80	31,70	40,40	36,27
	Módulo médio (GPa)	21,43	31,33	30,13	37,27	37,00
	Desv. Padrão (GPa)	0,60	1,74	1,87	2,61	1,70

Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se o aumento da resistência à compressão média ao longo do tempo, sendo que aos 7 dias o concreto já havia atingido aproximadamente 70% da resistência medida aos 28 dias. Para o módulo de elasticidade verifica-se um crescimento acentuado até os 3 dias de idade e a partir disso uma variação pequena. Dos 14 aos 28 dias observa-se uma estabilização, onde os valores tendem a se aproximar assintoticamente a um valor limite.

As médias das leituras de velocidade de pulso ultrassônico de cada face dos corpos de prova, para cada idade analisada, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de ultrassom (m/s)

CP1	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Face A-C	3.917,50	4.123,10	4.215,60	4.289,40	4.397,70
Face B-D	3.828,00	4.027,80	4.203,80	4.206,10	4.332,30
Face E-F	3.830,00	4.096,70	4.209,10	4.249,30	4.351,00
CP2	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Face A-C	3.864,00	4.083,40	4.206,40	4.280,10	4.399,80
Face B-D	3.875,60	4.181,00	4.116,10	4.208,30	4.298,60
Face E-F	3.859,10	4.144,90	4.240,70	4.236,40	4.340,90
CP3	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Face A-C	3.807,20	4.095,80	4.211,70	4.301,60	4.347,20
Face B-D	3.923,40	4.091,10	4.232,90	4.304,20	4.337,67
Face E-F	3.914,40	4.071,20	4.163,50	4.245,30	4.335,00
Média (m/s)	3.868,80	4.101,67	4.199,98	4.257,86	4.348,91
Desv. Pad. (m/s)	40,22	41,51	35,95	35,55	30,13
Resumo do ensaio - Velocidade média por face					
Face	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
A-C	3.862,90	4.100,77	4.211,23	4.290,37	4.381,57
B-D	3.875,67	4.099,97	4.184,27	4.239,53	4.322,86
E-F	3.867,83	4.104,27	4.204,43	4.243,67	4.342,30
Média (m/s)	3.868,80	4.101,67	4.199,98	4.257,86	4.348,91
Desv. Pad. (m/s)	5,26	1,87	11,45	23,05	24,42

Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se a que as velocidades de propagação são semelhantes e nenhuma das 3 faces apresentam uma regularidade de maior ou menor velocidade em relação as outras. Segundo Rodrigues (2003) quando se ensaia determinada peça na direção em que a mesma foi concretada (neste caso, face E-F), estas apresentam, em média, velocidades inferiores aos ensaios realizados na direção transversal à concretagem pelo fato de que as camadas mais superficiais do concreto possuem qualidade inferior devido aos fenômenos de segregação, efeito parede e exsudação, e assim, apresentam maior porosidade e consequentemente menor resistência e menor velocidade de propagação. Contudo, este comportamento não ficou evidenciado neste estudo, possivelmente graças ao adequado adensamento e processo de cura ao qual o elemento foi submetido.

Observa-se que os maiores valores de desvio padrão ocorreram aos 14 e aos 28 dias, no entanto, estes representam apenas 0,5% da velocidade média de propagação correspondente, sendo esta uma variação normal e irrelevante dentro das limitações do ensaio. Com isso pode-se afirmar que o concreto utilizado se manteve inalterável pela homogeneidade constatada pelo ultrassom, e, portanto, conclui-se neste estudo que as propriedades mecânicas do concreto independem da direção solicitada.

Além disso, utilizando os resultados obtidos em ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e ultrassom foram construídas curvas de correlação entre $f_c \times v_p$ e $E_c \times v_p$, a partir do método estatístico da regressão simples, que possibilitou a modelagem de diferentes equações para estimativa da resistência à compressão e módulo de elasticidade a partir da velocidade de propagação da onda pelo concreto, como mostra as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Modelos e equações matemáticas para estimativa da resistência à compressão

Modelo	Equação	Coef. de determinação (r^2)
Logarítmico	$f_c = 325,96 \ln(v_p) - 2684,20$	0,9697
Linear	$f_c = 0,0797 v_p - 299,83$	0,9736
Exponencial	$f_c = 0,00003 \cdot e^{0,0033 v_p}$	0,9791
Potencial	$f_c = 1 \times 10^{-48} \cdot v_p^{13,62}$	0,9831
Polinomial de grau 2	$f_c = 0,00005 v_p^2 - 0,349 v_p + 577,79$	0,9833

Fonte: Autoria própria (2019).

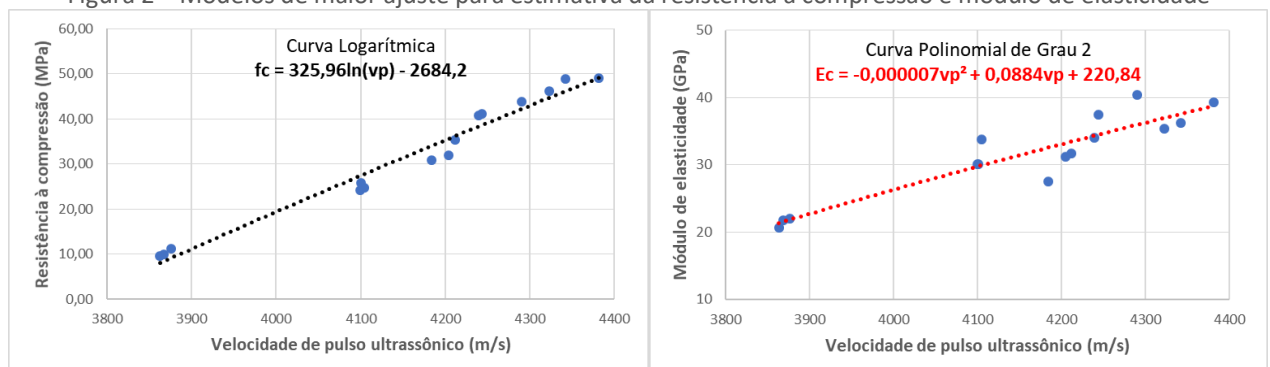
Tabela 4 - Modelos e equações matemáticas para estimativa do módulo de elasticidade

Modelo	Equação	Coef. de determinação (r^2)
Linear	$E_c = 0,0338 v_p - 109,14$	0,8506
Logarítmico	$E_c = 138,63 \ln(v_p) - 1123,50$	0,8513
Polinomial de grau 2	$E_c = -0,000007 v_p^2 + 0,0884 v_p + 220,84$	0,8514
Exponencial	$E_c = 0,233 e^{0,0012 \cdot v_p}$	0,8712
Potencial	$E_c = 1 \times 10^{-16} \cdot v_p^{4,8234}$	0,8745

Fonte: Autoria própria (2019).

Um dos critérios adotados na escolha do melhor tipo de curva é o de comparação dos coeficientes de determinação (r^2). A curva que apresentar o maior valor de r^2 é a que mais se ajusta aos valores observados, entretanto este não é o único critério a ser levado em consideração. Embora a função polinomial de grau 2 tenha apresentado o maior valor de r^2 na estimativa da resistência à compressão, esta não é a que oferece melhor representatividade do comportamento do concreto, visto que a curva possui formato parabólico com seus valores de resistência tendendo ao infinito com o aumento da velocidade de pulso ultrassônico, enquanto na realidade o concreto tende a estabilizar sua resistência após os 28 dias. Tendo isso em vista, a curva que mais se adequa ao comportamento real do concreto, para estimativa de f_c , é o modelo logarítmico. Seguindo este mesmo princípio de estabilização das propriedades após os 28 dias, o módulo de elasticidade foi melhor representado pela curva polinomial de 2º grau. Ambas as curvas estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Modelos de maior ajuste para estimativa da resistência à compressão e módulo de elasticidade



Fonte: Autoria própria (2019).

CONCLUSÃO

Para os propósitos deste estudo, a ultrassonografia mostrou ser uma forma bastante ágil e eficiente para avaliação de concretos. O método permitiu verificar a homogeneidade do elemento, que foi constatada através da uniformidade das medidas de velocidade de propagação do pulso ultrassônico pelas 3 faces do corpo de prova, conferindo assim, um concreto homogêneo e de boa qualidade, devido a capacidade de manter seu comportamento estável em todas as direções solicitadas.

Ademais, foram estabelecidas equações, correlacionadas à velocidade de pulso ultrassônico obtida nos ensaios de ultrassom, que foram capazes de estimar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade com um grau de precisão no ajuste entre os valores observados e as curvas construídas de 96,97% para estimativa de f_c e 85,14% para estimativa de E_c .

Dessa forma, o ultrassom mostra-se como uma alternativa que apresenta largas possibilidades de aplicação no estudo da patologia do concreto e no controle contínuo de sua qualidade. Por outro lado, a correlação da velocidade de pulso ultrassônico com a resistência à compressão e com o módulo de elasticidade requer cuidados de validação pela quantidade de variáveis que podem afetar os resultados, como por exemplo, a idade do concreto, as condições de cura, umidade e superfície do elemento, a proporção da mistura, o tipo de agregado, entre outros fatores. Sendo assim, o ensaio exige capacitação de quem o executa, de forma a evitar resultados equivocados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2013.
- CARELLI, J.M., et al. **Avaliação de concretos autoadensáveis através da análise do comportamento de ondas ultrassônicas**. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Natal (Brasil). Anais, 2014. v. 1. p. 1-9.
- DA SILVA FILHO, L.C.P., et al. **Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos**. Revista ALCONPAT, Mérida - México, v. 1, n. 3, p.196-213, set. 2011.
- LORENZI, A., et al. **Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico**. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Curitiba (Brasil), 2009. 13p.
- NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S., **The Ultrasonic Pulse Velocity Method**, CRC handbook on nondestructive testing of concrete, Tarun R. Naik and V M Malhotra eds, CRC Press, p. 169-189, 2004.
- RODRIGUES, G. S.S. **Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultrassônico: Estudo da correlação e fatores influentes**. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.