

II SPEC

Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Civil
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
Março, 2024

Uso de ensaios não destrutivos (ENDs) como ferramenta de controle na produção de elementos de concreto protendido

Use of non-destructive testing (NDT) as a control tool in the production of prestressed concrete elements

Laisy Meurer Perin^{*a}, Maria Eduarda Guedes Coutinho^b, Igor Vargas de Oliveira^c, Antonio Carlos dos Santos^d

^a Mestranda, Universidade Federal de Uberlândia – laisyp@hotmail.com.br

^b Graduanda, Universidade Federal de Uberlândia – maria.coutinho@ufu.br

^c Mestrando, Universidade Federal de Uberlândia – igor.oliveira@ufu.br

^d Professor Titular, FECIV, Universidade Federal de Uberlândia – acds.pir@gmail.com

*Autor correspondente

RESUMO

A partir de ensaios não destrutivos (ENDs), é possível a obtenção de características dos materiais, de forma não invasiva e sem causar danos ao elemento analisado. No entanto, os resultados obtidos são qualitativos, sendo necessárias correlações por meio de ensaios destrutivos em amostras do material. Assim, o objetivo do presente estudo é correlacionar os parâmetros obtidos nos ensaios não destrutivos, realizados em uma viga tipo I de concreto protendido, com ensaios de resistência à compressão em corpos de prova obtidos do mesmo lote de concreto. O programa experimental foi realizado por meio dos ensaios de dureza superficial (esclerometria), velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico, em diferentes idades. Os ensaios foram realizados 24 horas e 7 dias após a moldagem. Para a obtenção das correlações, foram realizados ensaios resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos, nas mesmas idades de realização dos ensaios não destrutivos. Como resultado, não foram obtidos valores apropriados de correlação dos parâmetros de ENDs com os resultados mecânicos, sendo necessários mais estudos para a viabilização dos ensaios não destrutivos como ferramenta de controle de produção de vigas protendidas nas primeiras idades.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo; Concreto protendido; Controle de produção.

ABSTRACT

Through non-destructive testing (NDT), it is possible to obtain characteristics of the materials, in a non-invasive way and without causing damage to the analyzed element. However, the results obtained are qualitative, requiring correlations through destructive testing on samples of the material. Thus, the objective of this study is to correlate the parameters obtained from non-destructive tests, performed on a prestressed concrete type I beam, with compressive strength tests on specimens obtained from the same concrete mix. The experimental program was carried out through surface hardness tests (sclerometry), ultrasound velocity and dynamic modulus of elasticity, at different ages. The tests were performed 24 hours and 7 hours after molding. In order to obtain the correlations, compressive strength tests were performed on cylindrical specimens at the same ages as the non-destructive tests. As a result, appropriate correlation values of the NDT parameters with the mechanical results were not obtained, requiring further studies for the feasibility of non-destructive testing as a tool for production control of prestressed beams at early ages.

Keywords: Non-destructive testing; prestressed concrete; production control.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos proporcionam uma inspeção mais rápida, eficiente e menos invasiva das estruturas, além de reduzir os custos e os desperdícios de materiais associados a ensaios destrutivos (PRESA; COSTAFREDA; MARTÍN, 2021).

No contexto da construção de estruturas de concreto, os elementos protendidos e pré-moldados têm se destacado como soluções eficientes, com alta qualidade, mais econômicas e sustentáveis, quando em comparação com as estruturas de concreto armado moldadas *in-loco* (JOSHI *et al.*, 2021).

A verificação da qualidade do concreto e do processo de protensão é fundamental para garantir o desempenho adequado das vigas protendidas (LIU *et al.*, 2023). Nesse sentido, o objetivo deste estudo é estabelecer uma correlação entre os resultados de ensaios não destrutivos realizados em vigas de concreto protendido durante a fase de produção e ensaios mecânicos destrutivos em corpos de prova.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. AMOSTRA

O elemento protendido utilizado na pesquisa foi uma viga de seção I com dimensões de 0,35 m x 0,80 m x 20 m, e produzida com um concreto de 45 MPa. Inicialmente à realização dos ensaios, o elemento foi dividido longitudinalmente em 20 seções de um metro cada.

Além disso, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm, com o mesmo concreto empregado na peça protendida. A moldagem foi realizada segundo o proposto pela ABNT NBR 5738:2015, e a cura foi realizada em temperatura e umidade ambiente, da mesma maneira que o elemento ensaiado.

Esses corpos de prova foram destinados aos ensaios de resistência à compressão, conforme ABNT NBR 5739:2018. Os ensaios foram realizados 24 horas e 7 dias após a moldagem. Além disso, antes dos ensaios destrutivos, foram realizados os ensaios de velocidade de ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico nos corpos de prova.

2.2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

2.2.1. Esclerometria

O ensaio de esclerometria foi realizado segundo a norma ABNT NBR 7584: 2012, e consistiu em efetuar 16 impactos ortogonalmente à área da face em cada seção, conforme Fig.

1, na região central da peça em cada uma das seções. Foi utilizado o esclerômetro do modelo *Silver Schmidt Live OS8200*.



Fig. 1: Ensaio de esclerometria sendo realizado, Autores (2023)

2.2.2. Velocidade de ultrassom

O ensaio de ultrassom foi realizado segundo a ABNT NBR 8802: 2019 e consistiu em efetuar a medição da velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto de forma indireta. Foi utilizado o equipamento *Pundit PL-200* com transdutor de 1662 mm², frequência de 54 kHz para onda compressiva e de contato úmido, conforme Fig. 2.



Fig. 2: Ensaio de velocidade de ultrassom sendo realizado, Autores (2023)

Foram realizados 5 pontos de medição em cada seção, sendo que o transdutor emissor ficou fixo em um ponto e o transdutor receptor foi movimentado a cada 20 cm. O valor da velocidade para cada seção, resultou da média das medições efetuadas.

2.2.3. Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico (E_d) foi obtido a partir dos resultados de velocidade de ultrassom e calculado pela Eq. (01) da ASTM C 597-22, sendo que ρ é a densidade (kg/m³), V é a velocidade de ultrassom (km/s) e ν_d é o coeficiente de Poisson (admite-se 0,2).

$$E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{(1 - \nu_d)} \quad (01)$$

3. RESULTADOS

3.1. ESCLEROMETRIA

Os resultados obtidos por meio do ensaio de esclerometria mostraram a homogeneidade da peça quanto à dureza superficial. Com 24 horas, a peça apresentou um índice esclerométrico médio de 35,42. Já aos 7 dias, o índice esclerométrico médio foi de 43,56, representando um aumento de 23% na dureza superficial do concreto.

3.2. VELOCIDADE DE ULTRASSOM

Os resultados obtidos por meio do ensaio de velocidade de ultrassom mostraram valores médios de 3936,52 m/s com 24 horas e 4374,67 m/s aos 7 dias, indicando um aumento de 11,13% na velocidade de propagação de ondas. Todavia, aos 7 dias, as seções 2, 7 e 16 apresentaram valores estatisticamente diferentes dos demais, e não foram considerados no cálculo da média. A disparidade dos valores de ultrassom dessas seções pode ser devido a imprecisões na execução do ensaio. A Fig. 3 apresenta os resultados do ensaio de ultrassom.

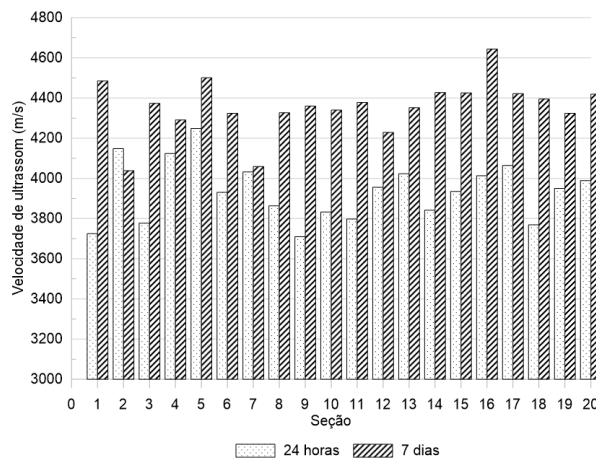


Fig. 3: Resultados do ensaio de ultrassom, Autores (2023)

3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico mostraram valores médios de 33,52 GPa com 24 horas e 41,35 GPa com 7 dias, indicando um aumento de 23,36% no módulo de

elasticidade dinâmico. Como o módulo foi calculado a partir da velocidade de ultrassom, as seções 2, 7 e 16 também apresentaram valores estatisticamente diferentes dos demais, e por isso não foram considerados no cálculo da média.

3.4. ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA

Os resultados de resistência à compressão com 24 horas e 7 dias apresentaram valores médios de 12,94 e 39,15 MPa. A Fig. 4 apresenta o gráfico com a correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão dos testes realizados nos corpos de prova.

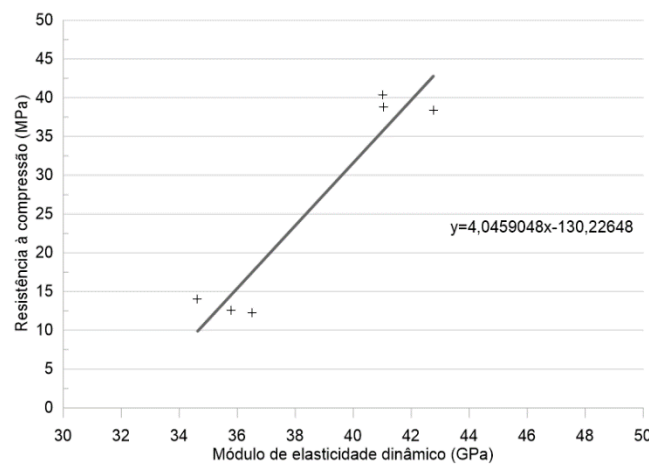


Fig. 4: Correlação entre módulo dinâmico e resistência à compressão, Autores (2023)

Por meio da relação encontrada entre o módulo dinâmico e a resistência à compressão, e os valores experimentais nos corpos de prova, é possível identificar que a equação encontrada na Fig. 4 não é válida, sendo necessário mais estudos para encontrar uma relação ajustada, a fim de qualificar a utilização do ultrassom como ferramenta de controle de produção de elementos pré-moldados e protendidos.

CONCLUSÕES

Visando o exposto no presente trabalho, tem-se como conclusão:

- O ensaio de esclerometria apresentou resultados satisfatórios quanto à verificação da homogeneidade do elemento ensaiado;
- Os ensaios de esclerometria e ultrassom identificaram a densificação do concreto com o aumento da idade, apresentando maiores valores aos 7 dias para ambos os ensaios;
- O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico por meio da velocidade de ultrassom não apresentou uma relação ajustada com o ensaio experimental de resistência à compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 597: Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

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 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

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

JOSHI, Sayali; HAMILTON, Michael; WARREN, Robert; FAUCETT, Danny; TIAN, Wenmeng; WANG, Yu; MA, Junfeng. Implementing Virtual Reality technology for safety training in the precast/ prestressed concrete industry. **Applied Ergonomics**, [S.L.], v. 90, p. 103286, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103286>.

LIU, Xiaoyang; YU, Wen; HUANG, Yue; YANG, Guotao; YOU, Weijie; GAO, Lei; SONG, Jun. Long-term behaviour of recycled aggregate concrete beams prestressed with carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) tendons. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 18, p. e01785, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01785>.

PRESA, Leticia; COSTAFREDA, Jorge L.; MARTÍN, Domingo Alfonso. Correlation between Uniaxial Compression Test and Ultrasonic Pulse Rate in Cement with Different Pozzolanic Additions. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 9, p. 3747, 21 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11093747>.