

Avaliação de procedimentos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade do concreto

J. V. F. Altoé^{1*}, C. S. de Faria¹, C. L. Pereira¹, G. S. Veríssimo¹, J. L. R. Paes¹

*Autor de Contacto: joao.fioresi@ufv.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar procedimentos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade do concreto. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade estático (E_{ci}) e velocidade de propagação ultrassônica (VPU) em corpos de prova cilíndricos e em vigas de concreto armado. Os resultados de E_{ci} obtidos experimentalmente foram comparados com os módulos de elasticidade dinâmicos (E_d), obtidos pelo ensaio de VPU, a partir de modelos de correlação presentes na literatura. As estimativas não se mostraram efetivas. Os valores de E_{ci} foram estimados por equações normatizadas a partir do valor de f_c . As expressões da ABNT NBR 6118:2014 e do ACI 318-19 retornaram os valores mais próximos dos resultados experimentais.

Palavras-chave: concreto; módulo de elasticidade estático; módulo de elasticidade dinâmico; VPU; ensaios não destrutivos.

Citar como: Altoé, J.V.F. et al. (2023). “Avaliação de procedimentos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade do concreto” en: Álvaro G. Sánchez Bellido, Juan Carlos Rojas Vidovic, Alan J. Aparicio Ortubé, Enio J. Pazini Figueiredo y Pedro Castro Borges (Eds.), Memorias del XVII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIX Congreso de Control de Calidad en la Construcción, CONPAT 2023. Santa Cruz de la Sierra (BOL), (pp. 15). DOI: <https://doi.org/10.21041/CONPAT2023/V1CC8510>

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.

Evaluation of experimental procedures for determining the modulus of elasticity of concrete

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate experimental procedures for determining the modulus of elasticity of concrete. Tests were conducted on cylindrical specimens and on reinforced concrete beams, including compressive strength (f_c), static modulus of elasticity (E_{ci}), and ultrasonic propagation velocity (UPV). The experimentally obtained results of E_{ci} were compared with the dynamic modulus of elasticity (E_d) obtained from VPU tests using correlation models found in the literature. The estimations did not prove to be effective. The values of E_{ci} were estimated using standardized equations based on the value of f_c . The expressions from ABNT NBR 6118:2014 and ACI 318-19 returned the values closest to the experimental results.

Keywords: concrete; static modulus of elasticity; dynamic modulus of elasticity; UPV; concrete nondestructive testing.

Evaluación de procedimientos experimentales para determinar el módulo de elasticidad del hormigón

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar procedimientos experimentales para determinar el módulo de elasticidad del hormigón. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión (f_c), módulo de elasticidad estático (E_{ci}) y velocidad de propagación ultrasónica (VPU) en muestras cilíndricas y en vigas de hormigón armado. Los resultados de E_{ci} obtenidos experimentalmente se compararon con los módulos de elasticidad dinámicos (E_d), obtenidos mediante el ensayo de VPU, utilizando modelos de correlación encontrados en la literatura. Las estimaciones no resultaron efectivas. Los valores de E_{ci} se estimaron mediante ecuaciones normalizadas basadas en el valor de f_c . Las expresiones de ABNT NBR 6118:2014 y ACI 318-19 devolvieron los valores más cercanos a los resultados experimentales.

Palabras clave: hormigón; módulo de elasticidad estático; módulo de elasticidad dinámico; VPU; ensayos no destructivos.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização das propriedades mecânicas do concreto, tais como a resistência à compressão (f_c) e o módulo de elasticidade (E_c), são de suma importância em tempo de projeto para o cálculo e o dimensionamento das estruturas (MACHADO *et al.*, 2009) e, após a construção da estrutura, para a determinação das técnicas de intervenção a serem adotadas em um reparo e/ou reforço estrutural (ACI 440.2R). A caracterização dessas propriedades mecânicas pode ser feita através de corpos de prova moldados a partir do concreto fresco ou, no caso de estruturas pré-existentes, a partir de testemunhos retirados da estrutura e ensaiados em laboratório. Apesar de apresentarem boa precisão, essas técnicas apresentam desvantagens. No caso da extração de testemunhos, pode-se citar o alto custo de investigação, a limitação da área investigada, além de modificar a integridade estrutural do elemento estrutural e demandar reparos (MACHADO *et al.*, 2009;

PALACIOS, 2012).

A realização de ensaios não destrutivos (END), como é o caso do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU), tem diversos aspectos positivos, tais como a facilidade de execução, o menor consumo de tempo e a redução do dano à estrutura (TSIOULOU *et al.*, 2017). Os métodos de END para obtenção das propriedades mecânicas do concreto são mais simples e fáceis de empregar que os ensaios mecânicos em corpos de prova moldados. No âmbito da pesquisa experimental, com frequência essas propriedades mecânicas também são de grande interesse, pois são dados de entrada fundamentais para o modelo constitutivo do concreto empregado em simulações numéricas. E, evidentemente, é desejável que os valores medidos desses dois parâmetros sejam representativos do material na estrutura real.

Recentemente, durante um programa experimental no Laboratório de Estruturas da UFV foram realizados ensaios de módulo de elasticidade estático (E_{ci}) e ensaios de VPU em corpos de prova cilíndricos de concreto. Observou-se uma dispersão considerável nos valores de E_{ci} medidos. Além disso, uma mesma amostra de concreto foi submetida a vários ensaios de E_{ci} , a cada vez girando a peça cerca de 45 graus em relação ao seu eixo. Para cada medição obteve-se um valor diferente. Esse procedimento foi repetido com o ultrassom e observou-se que as medições permaneceram inalteradas. Tais resultados indicaram que o ensaio estático possuía grande variabilidade. Notou-se também que as equações para estimar o E_{ci} , comumente encontradas em normas internacionais de concreto, produziram valores distantes do módulo de elasticidade medido experimentalmente. Com base no exposto, decidiu-se realizar uma bateria de ensaios no intuito de avaliar os procedimentos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade do concreto. Para isso, foram produzidas três vigas de concreto armado com dimensões 180×18×9 cm e cinco corpos de prova cilíndricos de 20×10 cm. Os cilindros foram utilizados para os ensaios de velocidade de pulso ultrassônico, módulo de elasticidade estático e compressão simples. As vigas foram utilizadas em ensaios de flexão a 4 pontos e em ensaios de ultrassom. Através dos ensaios de flexão obteve-se a curva força-flecha, a partir da qual foi obtido o E_{ci} por engenharia reversa pela equação de flecha. De posse dos resultados, foi realizada uma análise comparativa dos métodos experimentais para determinação do módulo de elasticidade do concreto. Concomitantemente, foi realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de levantar resultados e conclusões obtidos por outros autores.

Machado *et al.* (2009) estudaram concretos com resistência de 25 MPa e 30 MPa, variando a relação água/cimento (a/c) e a característica petrográfica do agregado graúdo. Os autores realizaram ensaios de f_c , E_{ci} , VPU, esclerometria e penetração de pinos em concretos com 3, 7, 14, 28 e 90 dias e, a partir dos resultados, propuseram curvas de correlação experimentais simples e combinadas para estimar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. Constatou-se que a estimativa do E_{ci} através do ensaio de VPU apresentou resultados satisfatórios, enquanto a estimativa de f_c utilizando o método VPU apresentou a pior correlação entre os métodos utilizados. Palacios (2012) estudou o emprego de END (VPU, esclerometria e penetração de pino) e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão de concretos com resistências nominais de 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa. A autora avaliou a variabilidade dos ensaios, indicando que o ensaio de VPU apresentou o menor coeficiente de variação. Além disso, elaborou curvas e equações de correlação entre as leituras dos END e a resistência à compressão do concreto. Os resultados indicaram que os END podem ser utilizados para estimar o f_c , desde que seja elaborada uma curva de correlação com os materiais utilizados. A correlação entre VPU e f_c foi a que apresentou o pior ajuste estatístico, enquanto os concretos com menores resistências apresentaram maior variabilidade.

Cabral *et al.* (2014) realizaram uma análise comparativa do módulo de elasticidade obtido a partir

de ensaios estáticos e dinâmicos (VPU) e calculado segundo diferentes normas. Os autores estudaram concretos com diferentes consistências (plástica ou auto adensável), traços e resistências à compressão (variando entre 20 e 50 MPa). O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) obtido a partir do ensaio de VPU foi, em média, 1,5 maior que o E_{ci} . Além disso, os resultados da expressão apresentada na norma ACI 318-19 foram mais próximos dos resultados obtidos experimentalmente e a partir do modelo da ABNT NBR 6118:2014.

Bilesky (2016) realizou o ensaio de E_{ci} e os END de vibração acústica e VPU para determinação do módulo de elasticidade de corpos de prova de concretos, variando a resistência à compressão de 20 MPa a 80 MPa, a relação a/c e a natureza petrográfica do agregado graúdo. O ensaio de VPU apresentou maior variabilidade nos resultados e o valor do E_d médio obtido a partir desse ensaio foi 1,13 maior que o E_{ci} para concretos de resistência média. O autor também propôs equações de regressão para estimar o E_{ci} e o E_d em função da classe de resistência do concreto e do tipo de agregado graúdo.

Irrigaray *et al.* (2016) estudaram misturas de concreto com diferentes relações a/c e volumes de pasta a partir de ensaios de f_c e VPU em corpos de prova de pasta e de argamassa. Os autores estabeleceram uma correlação única entre a VPU na pasta de cimento e a resistência à compressão do concreto para um determinado tipo de cimento, que independe da relação a/c e do volume e tipo de agregado utilizado na mistura.

Favarato *et al.* (2019) realizaram ensaios de f_c , VPU e esclerometria com 26 corpos de prova de concretos com diferentes dosagens, tipos de cimento e idades. A partir dos resultados dos END, os autores estimaram valores de f_c por meio de modelos teóricos e empíricos encontradas na literatura e compararam com os valores de f_c obtidos experimentalmente. Os resultados apontaram para a existência de uma correlação entre as leituras dos END e o ensaio de compressão simples. No entanto, é importante que o engenheiro identifique quais equações da literatura foram ajustadas a partir de conjuntos representativos e com características similares ao concreto em análise.

Amâncio *et al.* (2019) estudaram a correlação entre o ensaio de VPU e as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com classes de resistência de 20, 30 e 40 MPa. Para isso, além do ensaio de VPU, foram realizados ensaios de resistência à compressão, de tração por compressão diametral, de módulo de elasticidade estático, de absorção de água por imersão, de índice de vazios, de capilaridade e de penetração acelerada de íons cloreto. Os autores observaram boa correlação entre a VPU e as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

Thomaz (2020) realizou ensaios de E_{ci} , de excitação por impulso (TEI) e de VPU para a determinação do módulo de elasticidade de corpos de prova de concreto, variando a relação a/c e a fonte mineralógica e o teor do agregado graúdo basáltico. A partir dos resultados obtidos, o autor propôs uma equação de correlação entre o módulo estático e o módulo dinâmico em função da massa específica do agregado graúdo, do teor de agregado no concreto e do método de medição utilizado.

Camargo e Ferrari (2021) realizaram END de VPU, de esclerometria (IE) e de ressonância acústica, bem como ensaios destrutivos de f_c e E_{ci} em corpos de prova de concreto com diferentes idades e resistências entre 25 e 50 MPa. A partir dos resultados, desenvolveram curvas de correlação simples e múltiplas para a estimativa da resistência à compressão. A correlação múltipla ($VPU \times IE \times f_c$) implicou no menor coeficiente de variação. Os resultados demonstraram ainda que existe relação entre os módulos estático e dinâmico, assim como o f_c influencia na determinação do E_d .

A combinação de mais de um END para o desenvolvimento de correlações entre esses ensaios e as propriedades mecânicas do concreto melhoram o nível de confiabilidade dos resultados (MACHADO *et al.*, 2009; LIM e CAO, 2013; TSIIOULOU *et al.*, 2017; VINCENTINI e

FERRARI, 2020; CAMARGO e FERRARI, 2021). Machado *et al.* (2009) ponderam que o aumento de acurácia dos resultados obtidos por correlações múltiplas deve ser suficiente para justificar os aumentos de tempo e custo decorrente do emprego de vários métodos não destrutivos ao mesmo tempo.

1.1 Equações para estimativa do módulo de elasticidade estático

Na ausência de resultados de ensaios estáticos e dinâmicos, o módulo de elasticidade estático do concreto pode ser estimado pelos projetistas através de expressões encontradas na literatura e nas normas. Normalmente, é necessário conhecer a resistência à compressão do concreto (f_c) para calcular o E_{ci} a partir dessas equações. As equações apresentadas pela ABNT NBR 8522-1:2021, pelo ACI 318-19 e pelo *fib Model Code* 2010 para o cálculo do módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}) estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Equações para estimativa do módulo de elasticidade estático.

Referência	Equação
ABNT NBR 8522-1:2021	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}$, para f_{ck} entre 20 e 50 MPa (1)
	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}$, para f_{ck} entre 55 e 90 MPa (2)
ACI 318-19	$E_{ci} = 0,043 \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_{ck}}$ (3)
<i>fib Model Code</i> 2010	$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$ (4)
Sendo: α_E - fator que considera o tipo de agregado γ_c - peso específico do concreto (kg/m ³)	

1.2 Equações de correlação entre os módulos estático e dinâmico

Os ensaios não destrutivos são indicados para análises de tensões e deformações de estruturas carregadas dinamicamente, como pontes, e podem fornecer informações a respeito da integridade da estrutura (inclusive daquelas submetidas a carregamento estático), da deformabilidade do concreto e da rigidez de um elemento estrutural (ALMEIDA, 2005). Segundo Mehta e Monteiro (2006), o módulo dinâmico (E_d) é “geralmente 20, 30 e 40 por cento maior do que o módulo estático de deformação para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente”.

Como citado anteriormente, várias relações empíricas de correlação entre os módulos dinâmico e estático, válidas em intervalos limitados de condições, foram desenvolvidas ao longo do tempo. A relação mais simples, proposta por Lydon e Balendran (1986, *apud* NEVILLE, 2016), é dada pela Eq. (5), mostrada na Tabela 2. O código britânico de concreto estrutural BS 8110-2:1985 e a ABNT NBR 8522-1:2021, em seu Anexo B, também apresentam equações de correlação para cálculo do módulo de elasticidade estático (E_{ci}) a partir do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) – Eq.(6) e Eq. (7) apresentadas na Tabela 2, respectivamente.

Tabela 2. Equações de correlação entre o E_d e E_{ci} .

Referência	Equação
Lydon e Balendran (1986)	$E_{ci} = 0,83 \times E_d$, E_d em GPa (5)
BS 8110-2:1985	$E_{ci} = 1,25 \cdot E_d - 19$, E_d em GPa (6)
ABNT NBR 8522-1:2021	$E_{ci} = \frac{0,4275}{\rho} E_d^{1,4}$ (7)
Sendo: E_d em GPa ρ - massa específica do concreto (g/cm^3)	

1.3 Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU)

O ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica (VPU) é um método de ensaio não destrutivo consagrado, que permitiria, em tese, calcular o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Esse ensaio consiste em determinar o tempo com que ondas longitudinais de compressão percorrem uma determinada distância.

Neville (2016) define a velocidade da onda ultrassônica, em meio elástico, homogêneo e isotrópico, entretanto, não recomenda a determinação do módulo dinâmico a partir do pulso ultrassônico, já que o concreto não atende totalmente as exigências físicas que validam a expressão e acrescenta, ainda, que o coeficiente de Poisson normalmente não é determinado com precisão e isso pode acarretar em estimativas de valores de módulo de elasticidade com até 11% de diferença. A norma brasileira, ABNT NBR 8802:2019, por sua vez, estabelece o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente para a verificação da homogeneidade do concreto e para a detecção de eventuais fissuras e falhas internas e monitoramento do concreto ao longo do tempo. Contudo, a determinação do módulo de elasticidade dinâmico e a correlação da resistência à compressão e/ou módulo de elasticidade com a VPU são apresentadas apenas como “possíveis aplicações”.

Em contrapartida, segundo Mehta e Monteiro (2006) e o código britânico, BS 1881: *Part* 203 (1986), a velocidade da onda ultrassônica pode, sim, ser relacionada com o módulo de elasticidade do concreto e sua resistência mecânica. Ressalta-se, porém, que fatores como a idade do concreto, as condições de cura, o tipo e tamanho do agregado, o tipo de cimento, a dosagem da mistura, a microfissuração interna, a presença de barras de aço, dentre outros, podem influenciar na velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos. O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica é normatizado pela norma americana ASTM C 597-09 e pelo código britânico BS 1881: *Part* 203 (1986), que apresentam a Eq. (8) para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico a partir do ensaio de VPU, em que ρ é a massa específica (kg/m^3), ν o coeficiente de Poisson e V a velocidade de propagação do pulso ultrassônico (km/s).

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (8)$$

Nota-se que existem diversos modos de se obter o módulo de elasticidade estático do concreto: ensaios estáticos, modelos que estimam o módulo estático a partir do f_c e através de ensaios não destrutivos (correlações entre módulo estático e dinâmico). Diante das divergências encontradas

na literatura e visando analisar a possibilidade de se obter o módulo de elasticidade a partir de correlações com ensaios não destrutivos, este trabalho teve como objetivo avaliar os procedimentos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade do concreto. Para isso, foi realizada uma análise comparativa entre os valores de E_{ci} obtidos a partir de ensaios, os valores estimados a partir das equações de correlação com o módulo dinâmico - obtido através de ensaios de VPU - e os valores estimados a partir da resistência à compressão.

2. METODOLOGIA

Foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em vigas de concreto armado, de dimensões 9×18×180 cm, para a determinação do módulo de elasticidade por engenharia reversa a partir da equação de flecha, e ensaios de módulo estático em cilindros de concreto com 10×20 cm, numa máquina universal de ensaios EMIC DL-60000, utilizando-se sensor de deformações EMIC EE08, com faixa de medição entre 0,0001 e 2,5000 mm e base de medida de 100 mm. Tanto as vigas quanto os corpos de prova também foram submetidos ao END de VPU, utilizando-se o Pundit Lab - Proceq. Os dados foram gravados com um sistema HBM QuantumX MX840A, com uma taxa de amostragem de 10 Hz.

2.1 Características dos materiais

O concreto utilizado tanto na composição das vigas quanto na composição dos corpos de prova tinha a seguinte composição: cimento Portland CPII-E-32, areia natural quartzosa, pó de pedra de origem gnáissica, brita gnáissica nº1, água e aditivo plastificante. As propriedades físicas dos materiais componentes do concreto estão apresentadas na Tabela 3 e o traço, relação água/cimento e valor obtido no abatimento do tronco de cone, estão apresentados na Tabela 4. O traço adotado neste trabalho foi proposto por Lima (2017).

A determinação da massa específica do cimento foi realizada segundo a ABNT NBR NM 23:2001. A massa unitária dos agregados foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006. O percentual de material pulverulento foi definido conforme indicado pela ABNT NBR NM 46:2003. A massa específica e a absorção dos agregados miúdos foram definidas segundo as especificações da ABNT NBR NM 52:2009 e da ABNT NBR NM 30:2001 e a massa específica dos agregados graúdos, segundo a ABNT NBR NM 53:2009. A determinação da massa específica do cimento Portland foi realizada segundo a metodologia prescrita pela ABNT NBR 16605:2017. Foi realizada a análise granulométrica dos agregados miúdos e graúdos, utilizados na produção do concreto, segundo as especificações da ABNT NBR 7211:2019 e de acordo com a metodologia estabelecida pela ABNT NBR NM 248:2003. A determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizada conforme as diretrizes da ABNT NBR NM 67:1998. O aditivo líquido plastificante utilizado possuía cor castanho escuro, pH de 6,3 e densidade de 1,10 g/cm³. Utilizou-se aço CA-60 com módulo de elasticidade (E_s) igual a 210.000 MPa e resistência ao escoamento (f_{yk}) igual a 600 MPa nas armaduras das vigas.

Tabela 3. Propriedades físicas dos materiais componentes do concreto.

Material	Descrição / procedência	Massa específica (kg/m ³)	Abs. (%)	Massa unitária (kg/m ³)	D_{max} (mm)	Módulo finura	Material pulverulento (%)
Cimento	CPII-E-32	2956	-	-	-	-	-
Agregado miúdo natural	Areia natural quartzosa	2610	0,9	1433	4,8	2,74	0,6
Agregado miúdo artificial	Pó de pedra	2857	-	1433	6,3	4,32	-
Agregado graúdo	Brita Gnáissica ¹	2800	0,4	1440	19,0	6,59	1,9

Tabela 4. Traço base do concreto (kg/m³).

CPII-E-32	Areia	Pó de pedra	Brita	Água	Aditivo	Relação a/c	Slump Test
350	591	197	981	210	0,50 %	0,60	21

2.2 Ensaios das vigas de concreto armado

Foram moldadas três vigas de concreto armado de dimensões 9×18×180 cm. Para as armaduras longitudinais positivas e para os porta-estribos foram adotadas barras de aço CA-60 com diâmetro de Ø 5.0 mm. Para as armaduras transversais foram utilizadas barras de aço com diâmetro de Ø 4.2 mm. Um esquema representando as armaduras está mostrado na Figura 1.

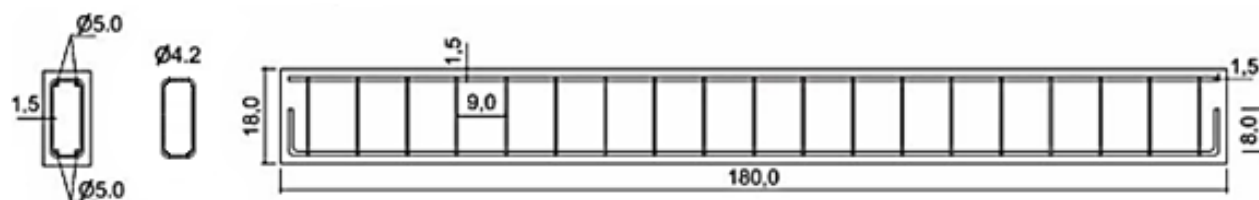


Figura 1. Armadura das vigas de concreto armado.

As formas foram confeccionadas com madeira compensada plastificada. Antes da concretagem, aplicou-se um desmoldante de base mineral às formas e foram utilizados espaçadores plásticos nas armaduras a fim de garantir o cobrimento adequado de concreto. O concreto foi lançado nas formas e adensado manualmente – ver Figura 2. Durante os três primeiros dias de cura, as vigas foram umedecidas e cobertas com lona plástica.

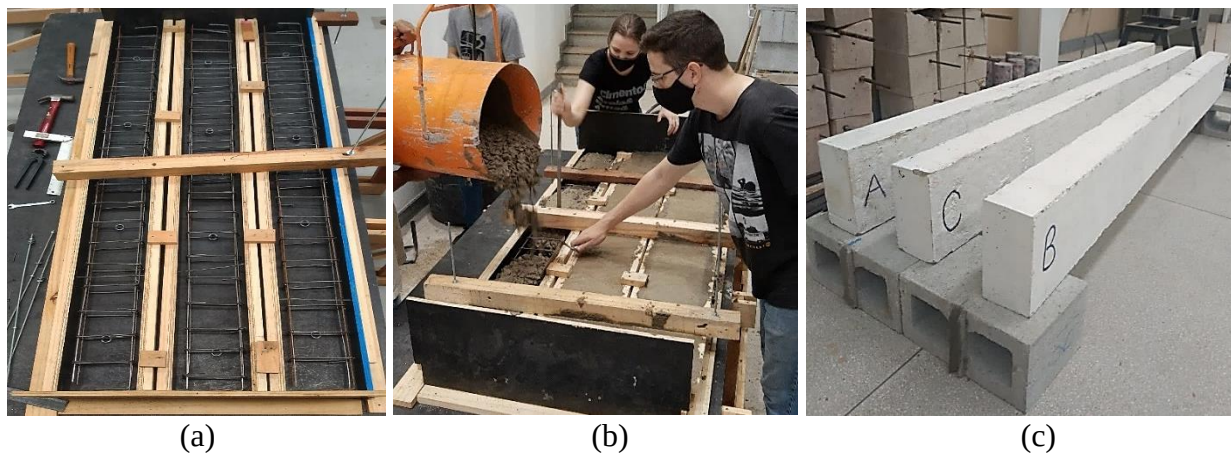


Figura 2. Produção das vigas de concreto armado. (a) Posicionamento da armadura nas formas; (b) concretagem; (c) vigas após a cura e a desforma.

As vigas de concreto armado foram submetidas a ensaio de flexão. Para aplicação do carregamento, os elementos foram posicionados no eixo da máquina universal de ensaios, sobre uma viga de reação de apoio previamente instalada. A configuração utilizada no ensaio foi do tipo Stuttgart (4 pontos). Foi utilizado um transdutor de deslocamento, posicionado no centro do vão da peça, para medição da flecha. Uma célula de carga HBM C6A, com capacidade de 200 kN foi posicionada entre o atuador e a viga, para medição da força aplicada ao longo do ensaio (Figura 2). Cada uma das vigas foi submetida a três ciclos de carregamento e descarregamento, com o objetivo de evitar que os efeitos de acomodação interferissem nos resultados. A etapa de carregamento foi realizada com um valor de carga pré-determinado, de forma que o concreto não ultrapassasse o Estádio I, no qual o material trabalha no regime elástico e não há formação de fissuras.



Figura 2. Aspecto geral da montagem do ensaio de flexão a quatro pontos.

O carregamento monotônico foi aplicado com o auxílio do software de controle da máquina universal, definindo-se cargas alvo para cada etapa de carregamento e descarregamento. Adicionalmente, realizou-se o ensaio de VPU nas vigas. Utilizou-se um pacômetro para auxiliar na localização das barras da armadura, para que as medidas de velocidade de propagação do pulso fossem tomadas em posições em que houvesse apenas concreto.

2.3 Ensaios dos corpos de prova

Foram moldados cinco corpos de prova com dimensões 10×20 cm. Após decorridas 24 horas da concretagem, os corpos de prova foram armazenados em cura imersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, segundo as prescrições da ABNT NBR 5738:2015. É uma prática comum em laboratórios de pesquisa deixar amostras de concreto curarem ao ar, nas mesmas condições dos espécimes para experimentação. No entanto, neste estudo, optou-se por realizar a cura imersa dos corpos de prova levando em consideração os resultados apresentados por Faria *et al.* (2021).

A resistência à compressão, o módulo de elasticidade estático do concreto e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foram realizados segundo as normas ABNT NBR 5739:2018, ABNT NBR 8522-1:2021 e ABNT NBR 8802:2019, respectivamente.

Nos ensaios de módulo de elasticidade, os sensores de deformação foram posicionados diametralmente opostos e na mesma altura no corpo de prova (Figura 4a).

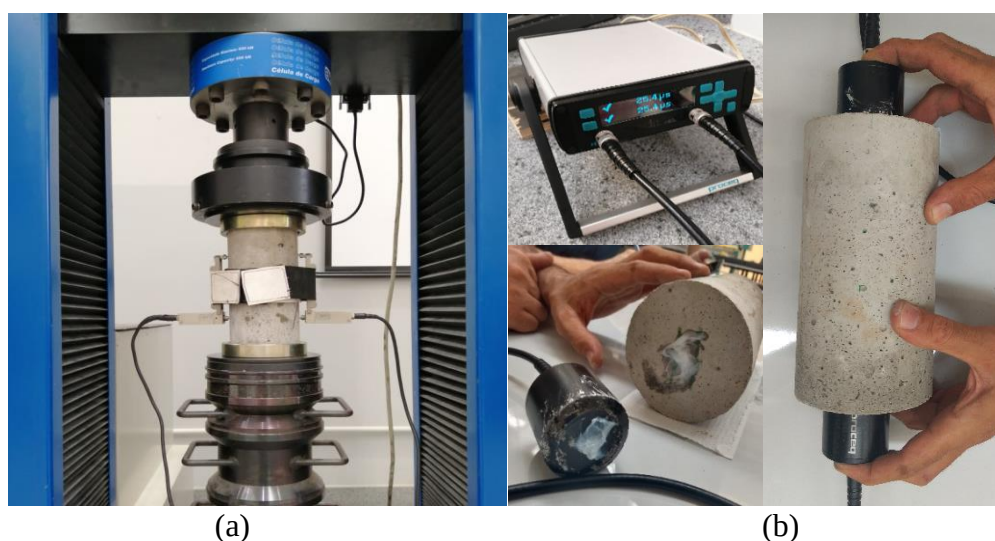


Figura 4. Ensaios dos CPs: (a) módulo de elasticidade estático; (b) VPU.

O ensaio de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado conforme as indicações da ABNT NBR 8802:2019 e do manual do fabricante. O primeiro passo para realizar este ensaio foi preparar os corpos de prova, de forma a garantir que as superfícies estivessem planas, lisas e limpas. Com a superfície das amostras preparadas e o aparelho calibrado, aplicou-se uma fina camada de acoplante nas superfícies superior e inferior dos corpos de prova e dos transdutores. Os transdutores foram posicionados segundo o arranjo de transmissão direta, nas faces opostas do corpo de prova (Figura 4b), conforme recomendado pela ABNT NBR 8802:2019 para este ensaio.

3. RESULTADOS

3.1 Corpos de prova

A seguir estão descritos os resultados obtidos a partir dos experimentos dos corpos de prova. Seguem apresentados, na Tabela 5, os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, de módulo de elasticidade estático e de VPU, além dos valores do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) calculados a partir da Eq. (8), para um coeficiente de Poisson igual a 0,2.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial, módulo de elasticidade estático e VPU.

CP	Idade (dias)	t (μ s)	v (m/s)	f_c (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_d (GPa)
5	28	41,9	4606	25,78	-	45,76
10	28	41,9	4613	22,80	-	46,09
15	28	43,9	4410	26,19	24,70	41,13
20	28	42,9	4510	26,22	24,02	43,93
25	28	43,4	4461	21,95	23,04	42,74
Média				24,59	23,92	43,93

Para fins de comparação, os resultados experimentais médios do módulo de elasticidade estático e dinâmico estão descritos na

Tabela 6, bem como as estimativas do módulo estático (E_{ci}) a partir do módulo dinâmico, conforme as equações Eq. (5), Eq. (6) e Eq. (7).

Tabela 6. Módulo estático (E_{ci}) versus módulo dinâmico (E_d).

CP (Dias)	$E_{ci,exp}$ (GPa)	E_d (GPa)	$\frac{E_d}{E_{ci,exp}} - 1$	$E_{ci}^{(1)}$ (GPa)	$E_{ci}^{(2)}$ (GPa)	$E_{ci}^{(3)}$ (GPa)
28	23,92	43,93	84%	36,46	35,91	35,81
⁽¹⁾ Lydon e Balendran (1986) – Eq. (5) ⁽²⁾ BS 8110-2:1985 – Eq. (6) ⁽³⁾ ABNT NBR 8522-1:2021 – Eq. (7)						

É possível observar que o módulo dinâmico, calculado pela Eq. (8) a partir da velocidade de propagação de onda ultrassônica, é, em média, 84% maior que o módulo de elasticidade estático, obtido a partir da metodologia de ensaio descrita pela ABNT NBR 8522-1:2021.

As estimativas do módulo estático a partir do módulo dinâmico não se mostraram efetivas. As três equações utilizadas (Eq. 5, Eq. 6 e Eq. 7) superestimaram em média 50% o módulo de elasticidade estático experimental.

As estimativas do módulo de elasticidade estático a partir da Eq. (1), da Eq. (3) e da Eq. (4), prescritas pela ABNT NBR 6118:2014, pelo ACI 318-19 e pelo *fib Model Code* 2010, respectivamente, seguem apresentadas na Tabela 7, bem como a comparação dessas expressões com o resultado médio obtido experimentalmente.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7, nota-se que as expressões da ABNT NBR 6118:2014 e do ACI 318-19 estimaram com boa precisão o módulo de elasticidade estático do concreto dos corpos de prova. Por sua vez, a equação do *fib Model Code* 2010 apresentou um erro médio de 20,8%.

Tabela 7. Estimativas do módulo de elasticidade estático a partir de f_c – CPs 28 dias.

$E_{ci,exp}$ (GPa)	$E_{ci}^{(1)}$ (GPa)	$E_{ci}^{(2)}$ (GPa)	$E_{ci}^{(3)}$ (GPa)	$\frac{E_{ci}}{E_{ci,exp}} - 1$	$\frac{E_{ci}^{(2)}}{E_{ci,exp}} - 1$	$\frac{E_{ci}^{(3)}}{E_{ci,exp}} - 1$
23,92	23,55	24,72	28,90	-1,5%	2,8%	20,8%

⁽¹⁾ ABNT NBR 6118:2014 – Eq. (1)

⁽²⁾ ACI 318-19 – Eq. (3)

⁽³⁾ *fib Model Code 2010* – Eq. (4)

3.2 Vigas de concreto armado

Seguem apresentados, na Tabela 8, os resultados dos ensaios das vigas de concreto armado, a saber: ensaio de flexão a quatro pontos e ensaio de ultrassom. Também estão descritos os valores de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) obtidos a partir da Eq. (8), para um coeficiente de Poisson igual a 0,2. O módulo de elasticidade estático das vigas foi calculado por engenharia reversa a partir da equação de flecha, considerando os momentos de inércia da seções transversais homogeneizadas das vigas em Estádio I e utilizando dois pontos do diagrama força-deslocamento vertical (ΔP e Δ_{flecha}) do último ciclo de carregamento realizado em cada uma das vigas.

Tabela 8. Resultados dos ensaios realizados nas vigas de concreto armado.

Vigas	ρ (kg/m ³)	ΔP (kN)	Δ_{flecha} (cm)	E_{ci} (GPa)	t (μ s)	v (m/s)	E_d (GPa)
A	2347,87	0,4988	0,0078	22,11	22,07	4169,67	36,74
B	2354,27	0,4992	0,0078	22,45	22,23	4228,00	37,88
C	2370,51	0,5007	0,0077	23,03	22,23	4171,54	37,13

Seguem apresentados, na

Tabela 9, os resultados experimentais do módulo de elasticidade estático e dinâmico das vigas, bem como as estimativas do módulo estático (E_{ci}) a partir do módulo dinâmico, conforme as equações Eq. (5), Eq. (6) e Eq. (7).

Tabela 9. Módulo estático (E_{ci}) versus módulo dinâmico (E_d).

Vigas	E_{ci_exp} (GPa)	E_d (GPa)	$\frac{E_d}{E_{ci_exp}} - 1$	$E_{ci}^{(1)}$ (GPa)	$E_{ci}^{(2)}$ (GPa)	$E_{ci}^{(3)}$ (GPa)
A	22,11	36,74	66%	30,49	26,92	28,28
B	22,45	37,88	69%	31,44	28,35	29,43
C	23,03	37,13	61%	30,81	27,41	28,42
⁽¹⁾ Lydon e Balendran (1986) – Eq. (5) ⁽²⁾ BS 8110-2:1985 – Eq. (6) ⁽³⁾ ABNT NBR 8522-1:2021 – Eq. (7)						

É possível observar, a partir dos dados apresentados na Tabela 8 e na

Tabela 9, que o E_d , calculado pela Eq. (8) a partir das leituras do ensaio de VPU, é, em média, 65% maior que o módulo estático. Novamente, as estimativas do E_{ci} a partir do E_d não se mostraram efetivas. A Eq. (6), proposta pelo BS 8110-2:1985, é a que mais se aproximou do resultado experimental, porém superestimou em cerca de 22% o módulo de elasticidade. A Eq. (5), proposta por Lydon e Balendran (1986), superestimou o módulo estático em 37% e a Eq. (7), presente na ABNT NBR 8522-2:2021, superestimou em 27%.

Encontram-se apresentados, na Tabela 10, os resultados médios dos módulos de elasticidade

experimental estático e dinâmico dos corpos de prova de concreto e das vigas de concreto armado.

Tabela 10. Módulo de elasticidade médio: corpos de prova *versus* vigas (28 dias).

ID	ρ (kg/m ³)	t (μ s)	v (m/s)	E_{ci} (GPa)	E_d (GPa)	$\frac{E_d}{E_{ci}} - 1$
CPs	2387,62	42,80	4520,18	23,92	43,93	84%
Vigas	2357,55	22,18	4189,73	22,53	37,25	65%

Nota-se que os valores médios obtidos de E_{ci} foram próximos: obteve-se uma diferença percentual de 5,8%. Isso indica que a escolha de realizar a cura imersa dos CPs segundo as prescrições da ABNT NBR 8522-1:2021, conforme recomendado por Faria *et al.* (2021), foi adequada. Os resultados médios do E_d destoaram cerca de 15%. O E_d calculado pela Eq. (8) depende da massa específica, do coeficiente de Poisson e da velocidade de propagação ultrassônica (VPU), obtida no ensaio de ultrassom. Sendo assim, a diferença entre o módulo dinâmico médio dos corpos de prova e das vigas, aos 28 dias, deve-se a diferença de VPU medida (cerca de 7%).

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliaram-se procedimentos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade do concreto. Realizou-se uma campanha experimental com três vigas de concreto armado e cinco corpos de prova de concreto (CPs), moldados a partir de uma mesma betonada. No caso das vigas, efetuou-se o ensaio de flexão a quatro pontos em Estádio I para obtenção do módulo de elasticidade após 28 dias de cura. Os CPs, por sua vez, foram submetidos a ensaios de módulo de elasticidade estático (E_{ci}), resistência à compressão (f_c) e velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) aos 28 dias.

Os resultados mostraram que a obtenção do módulo de elasticidade estático do concreto pelo método normatizado (ABNT NBR 8522-1:2021) é eficiente, já que a diferença percentual entre os valores médios dos CPs e das vigas foi de 5,8%. O ensaio de VPU resultou em uma diferença percentual de cerca de 15% entre os módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs e das vigas. Essa diferença pode ter sido ocasionada pelo procedimento de cura: as vigas foram curadas ao ar, enquanto os CPs foram submetidos a cura imersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, resultando em diferentes estruturas internas do concreto e, consequentemente, diferentes VPU.

Os módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs e das vigas, obtidos a partir do ensaio de VPU, foram 84% e 65% superiores aos valores dos módulos estáticos, respectivamente. Estes resultados divergem dos valores indicados por Mehta e Monteiro (2006), Cabral *et al.* (2014) e Bilesky (2016). Além disso, as equações utilizadas neste trabalho para estimar o módulo de elasticidade estático a partir do módulo dinâmico não se mostraram efetivas.

No que diz respeito às estimativas do módulo estático a partir dos valores experimentais de f_c , os resultados mostraram que as expressões da ABNT NBR 6118:2014 e do ACI 318-19 estimaram com maior precisão o módulo de elasticidade estático.

5. REFERÊNCIAS

- Almeida, S. F. (2005). “Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva”. Masters Thesis, Universidade de São Paulo. p. 193.
- Amâncio, F. A.; Dias, A. R. O.; Lucas, S. O.; Lima, D. A.; Cabral, A. E. B. (2019), *Correlação entre o ensaio de ultrassom e as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos convencionais*. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, Edição Especial: 1-14.

- American Concrete Institute. (2019). *ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills.
- American Concrete Institute. (2017). *ACI 440.2R: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Detroit.
- ASTM International. (2009). *ASTM C 597-09: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Conshohocken.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5738: Versão Corrigida: 2016: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- _____. (2018). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- _____. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- _____. (2019). *NBR 7211: Versão Corrigida: 2019: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro.
- _____. (2021). *NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação. Parte 1 – Módulos estáticos à compressão*. Rio de Janeiro.
- _____. (2021). *NBR 8522-2: Concreto endurecido – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação. Parte 2 – Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração*. Rio de Janeiro.
- _____. (2019). *NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Rio de Janeiro.
- _____. (2012). *NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200)*. Rio de Janeiro.
- _____. (2017) *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- _____. (2001). *NBR NM 23 Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- _____. (2001). *NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- _____. (2006). *NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- _____. (2003). *NBR NM 46 Cimento Portland – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem*. Rio de Janeiro.
- _____. (2009). *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- _____. (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- _____. (1998). *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- _____. (2003). *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Bilesky, P. C. (2016). “Contribuição aos Estudos do Módulo de Elasticidade do Concreto”. Master Thesis, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. p. 134.
- Branson, D. E. (1968). *Design procedures for computing deflections*. ACI Journal. 65(9):730-742. <http://dx.doi.org/10.14359/7508>.
- British Standards Institution. (1986). *BS 1881: Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. London.
- _____. (1985). *BS 8110: Part 2. Structural use of concrete - Code of practice for special circumstances*. London.
- Cabral, L.; Monteiro, E.; Helene, P. (2014). *Análise comparativa do Módulo de elasticidade calculado segundo diferentes Normas*. Revista Alconpat, 4(2):140-156. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.65>.
- Camargo, M. V.; Ferrari, V. J. (2021). *Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END)*. Revista Matéria, 26(3):e13047. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13047>.
- Faria, C. S.; Altoé, J. V. F.; Pereira C. L.; Veríssimo, G. S.; Petruski, M. C. (2021). “Análise da influência

- do método de cura na evolução da resistência à compressão do concreto com o tempo”. XVI Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIII de Control de Calidad em la Construcción, Alconpat, Brasil (Evento 100% Online), pp. 316-330. <https://doi.org/10.4322/conpat2021.612>.
- Favarato, L.F., Rosário, C.V.S., Alzuguir, J.P.C., et al. (2019). *Avaliação teórico-experimental da resistência à compressão de concretos através de ensaios não destrutivos*. Revista Matéria. 24(4):e-12526. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0851>.
- Fédération Internationale du Béton. (2010). fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne. <http://dx.doi.org/10.1002/9783433604090>.
- Irigaray, M. P. A., Pinto, R. C. A., Padaratz, I. J. (2016). *Um novo procedimento para estimar a resistência à compressão do concreto pelo método VPU*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. 9(3):395-402. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000300004>.
- Lim, M.K., Cao, H. (2013). *Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness*. Construction and Building Materials, 38:1310-1315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.01.011>.
- Lima, G. E. S. (2017). *“Avaliação dinâmica do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas à degradação de rigidez”*. Master Thesis, Univesidade Federal de Viçosa, p. 157.
- Machado, M. D., Shehata, L. C. D., Shehata, I. A. E. M. (2009). *Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos Usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaios Não Destrutivos*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. 2(2):100-123. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952009000200001>.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2006). **“Concrete: Microstructure, Properties and materials”**. McGraw-Hill, New York, Usa, p. 684.
- Neville, A. M. (2016). *“Propriedades do Concreto”*. Bookman Editora. São Paulo, Brasil. p. 912.
- Palacios, M. P. G. (2012). *“Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto”*. Master Thesis, Universidade Nacional de Brasília. p. 165.
- Thomaz, W. A. (2020). *“Estudo comparativo do módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos contendo agregados basálticos”*. Master Thesis, Universidade Federal da Integração Lantino-Americana. p. 134.
- Tsioulou, O., Lampropoulos, A., Paschalis, S. (2017). *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, 131:66-77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.068>.
- Vinentini, J.M., Ferrari. V. J. (2020). *Esclerometria e velocidade de propagação do pulso ultrassônico para a estimativa da Resistência à Compressão do concreto por meio de curvas de correlação*. Revista Tecnológica, 29(1):49-61. <https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i1.49939> de Conclusão de Curso em Educação e Meio Ambiente, FAEMA, Rondônia, p. 68.