



# ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

**Palavras-Chave:** Resistência a Compressão, Ultrassom, Módulo de Elasticidade Dinâmico

**Autores:**

**Edvania Rosa Santos, FT - UNICAMP**

**Prof.ª Dr.ª Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira, FT - UNICAMP**

**Msc. Marinara Andrade Nascimento Moura, FEC - UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

A grande demanda do uso do concreto na construção civil traz consigo preocupações quanto à durabilidade dos elementos estruturais de uma edificação. A análise estrutural do concreto normalmente é feita por meio de ensaios destrutivos, entretanto, métodos não destrutivos vêm ganhando cada vez mais destaque. O ensaio de ultrassom, por exemplo, é utilizado para a caracterização das propriedades mecânicas do concreto (constantes elásticas e resistência à compressão), através da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) (MOURA et al., 2019). Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo estimar a resistência à compressão do concreto ( $R_c$ ), através do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ). A metodologia adotada envolveu ensaios de ultrassom em corpos de prova cilíndricos de concreto, obtendo-se os valores da VPU com ondas de compressão (P) e ondas de cisalhamento (S), os quais foram utilizados para se obter  $E_d$ . Com os valores de  $E_d$  foi possível estimar a  $R_c$ , conforme ABNT NBR 6118 (2013), ACI e Eurocode. Assim, determinou-se os valores de  $R^2$  para as relações entre a  $R_c$  e  $R_c$  estimada. Os resultados indicaram que é possível estimar a  $R_c$  do concreto através dos valores de  $E_d$ , entretanto, ainda são necessários estudos mais aprofundados para viabilizar o uso do ultrassom conforme critérios de segurança das estruturas de concreto armado.

## OBJETIVO:

O objetivo geral deste projeto de pesquisa é estimar a resistência do concreto, através do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), adotando equações propostas em normas nacionais e internacionais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados 62 corpos de prova cilíndricos (10 cm x 30 cm), moldados em 2016 conforme pesquisa desenvolvida por Amadio et al. (2018), na FT-Unicamp, nos laboratórios da Faculdade de

Tecnologia da Unicamp, em Limeira. Os concretos utilizados na moldagem dos corpos de prova foram identificados como C1, C2 e C3, conforme tabela 1.

Material (Kg.m <sup>-3</sup> )	Concreto		
	C1	C2	C3
<b>Cimento CPIIE 32</b>	368,59	509,56	368,59
<b>Areia</b>	737,17	764,29	737,17
<b>Agregado graúdo (basalto)</b>	1105,76	764,29	-
<b>Agregado graúdo (diabásio)</b>	-	-	1105,76
<b>Relação a/c</b>	0,35	0,50	0,49
<b>f<sub>cd</sub> (MPa)</b>	30	50	30

Tabela 1 – Traços dos concretos utilizados na confecção dos corpos de prova cilíndricos. (fonte: Amadio, 2018)

Os ensaios de ultrassom foram realizados com o equipamento Pundit 200 (Proceq, Suíça) com transdutores de onda de compressão de 54 KHz e transdutores de onda de cisalhamento de 40 KHz. Estes ensaios foram realizados através do método de transmissão direta, para determinar os valores das velocidades de propagação do pulso ultrassônico (VPU), tanto das ondas de compressão (P), quanto das ondas de cisalhamento (S), respectivamente.

A determinação das constantes elásticas do concreto (módulo de elasticidade longitudinal, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson) ocorreu através da matriz de rigidez [C], encontrando sua inversa, a matriz de flexibilidade [S] (Christoffel, 1877 e Bucur, 1984). O módulo de elasticidade dinâmico também foi obtido conforme procedimentos da ASTM C597-16. A estimativa da resistência à compressão dos concretos (R<sub>c</sub>), através do módulo de elasticidade dinâmico (E<sub>US</sub>), foi calculada conforme as normas NBR 6118 (ABNT, 2014), Eurocode 2 e ACI 318-14, utilizando-se as equações 1, 2, 3, respectivamente.

$$f_{ck} = \left( \frac{E}{\alpha_e 5600} \right)^2 \quad \text{Equação (1)}$$

O Eurocode 2 (equação 3). Para o coeficiente de Poisson também é considerado o valor de 0,2.

$$f_{ck} = 10 * \left( \frac{E_{ci}}{1,05 * 22} \right)^3 - 8 \quad \text{Equação (2)}$$

Para o ACI 318-14 (equação 4), o valor do coeficiente de Poisson também foi adotado como 0,2. Os valores de  $\omega_c$  e  $f_{ck}$  correspondem à massa específica e resistência à compressão do concreto.

$$f_{ck} = \left( \frac{E_{ci}}{0,043 * \omega_c^{1,5}} \right)^2 \quad \text{Equação (3)}$$

A resistência à compressão do concreto foi obtida através dos ensaios de compressão axial simples, conforme NBR 5739 (ABNT,2018).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os valores das constantes elásticas dos concretos, os quais foram subdivididos conforme os 3 traços de concreto, ou seja, 1 ao 4 (agregado graúdo de basalto) e 5 ao 8 (agregado graúdo de diabásio). Observamos que o valor fixado de 0,2 para o coeficiente de Poisson

( $\nu$ ) não é adequado, visto que os valores obtidos através da matriz de flexibilidade [S] variam deste valor fixo.

CP		$E_d$ (MPa)	$G_d$ (MPa)	$\nu$
C1	1	13569	6853	0,01
	2	27648	14074	0,02
C2	3	18280	7873	0,16
	4	21091	11342	0,07
1C3	5	29070	11110	0,31
	6	24716	10993	0,12
	7	15044	10715	0,30
	8	26785	11398	0,17

Tabela 1. Valores das constantes elásticas: Módulo de Elasticidade Longitudinal ( $E_d$ ), Transversal ( $G_d$ ) e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

A tabela 2 apresenta os valores da  $R_c$ , conforme as normas adotadas (equações 1 a 3). Os valores do  $E_{US}$  foram calculados conforme a matriz de flexibilidade [S] e a norma ASTM C547. Adotou-se um valor de 0,2 para o Coeficiente de Poisson.

		<b>NBR 8522</b>	<b>ASTM C547</b>	<b>Matriz [S]</b>	<b>ASTM C547</b>	<b>Matriz [S]</b>	<b>ASTM C547</b>	<b>Matriz [S]</b>
CP		<b><math>R_c</math> (MPa)</b>	<b>Rc estimada NBR 6118 (MPa)</b>		<b>Rc estimada Eurocode (MPa)</b>		<b>Rc estimada ACI 318-14 (MPa)</b>	
C1	1	42,2	3,3	4,1	1,5	2,0	5,2	6,4
	2	44,8	6,8	7,4	4,4	5,0	13,8	15,0
C2	3	30,2	13,7	16,9	12,5	17,1	22,4	27,6
	4	46,4	8,1	9,9	5,7	7,6	16,0	19,3
<b>Média</b>		<b>43,5</b>	<b>7,5</b>	<b>8,6</b>	<b>6,3</b>	<b>14,9</b>	<b>14,9</b>	<b>17,1</b>
C3	5	42,3	28,9	18,7	19,9	51,2	51,2	33,2
	6	36,3	11,9	13,5	12,2	20,7	20,7	23,5
	7	28,5	6,3	5,0	2,8	11,1	11,1	8,7
	8	24,0	15,0	15,9	15,6	27,7	27,7	29,3
<b>Média</b>		<b>32,8</b>	<b>15,5</b>	<b>13,3</b>	<b>12,2</b>	<b>27,7</b>	<b>27,7</b>	<b>23,7</b>

Tabela 2. Valores da resistência à compressão dos traços de concreto, considerando os valores de  $E_d$  e as equações das normas NBR 6118; Eurocode; ACI 318-14 em função do módulo  $E_d$ . (Valores em MPa).

As figuras 1 a 4 apresentam os valores de índice de correlação ( $R^2$ ) entre os valores de  $R_c$  estimados (conforme equações 1, 2 e 3), considerando os valores de módulo de elasticidade ( $E_d$ ), obtidos com a ASTM e matriz de flexibilidade. Para os traços 1 e 2 (agregado basalto), os valores de  $R^2$  obtidos com a relação entre a  $R_c$  estimada com os valores de  $E_d$  (matriz de flexibilidade) foram excelentes (0,65 a 0,73). Quando comparamos entre as 3 normas (Eurocode; ABNT; ACI), verifica-se que a equação do ACI apresentou valores de  $R^2$  mais próximos de 1, ou seja, semelhantes aos obtidos com ensaios destrutivos (0,85 e 0,87). Já os concretos compostos com agregado de diabásio apresentaram valores de  $R^2$  maiores para os valores de  $R_c$  estimada com  $E_d$  obtido pela norma ASTM (0,87 a 0,90), quando comparados aos valores obtidos pela Matriz de flexibilidade (0,66 a 0,73).

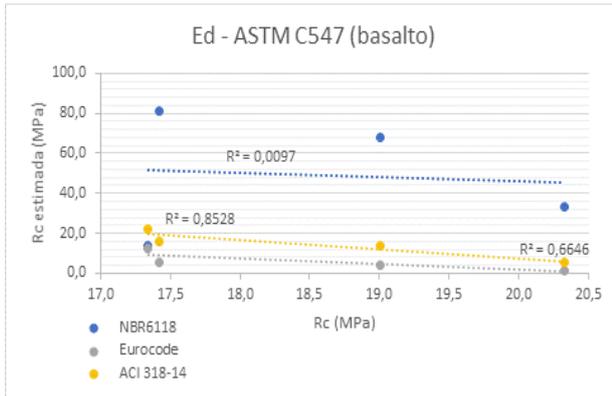


Figura 1. Valores de Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) entre as equações (ACI, NBR 6118, Eurocode) obtidos com Ed (ASTM), e a  $R_c$ , concreto com agregado graúdo de basalto.

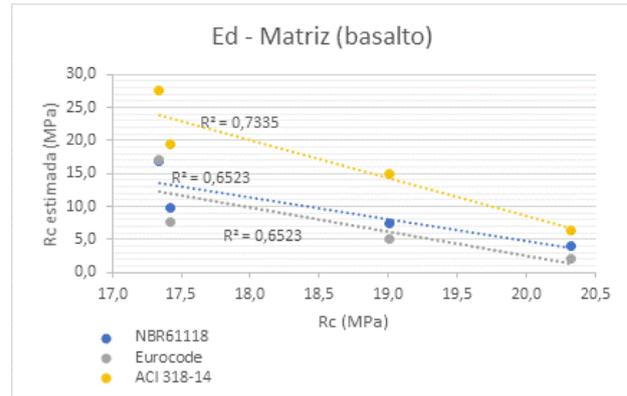


Figura 2. Valores de Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) entre as equações (ACI, NBR 6118, Eurocode) obtidos com Ed (Matriz), e a  $R_c$ , concreto com agregado graúdo de basalto.

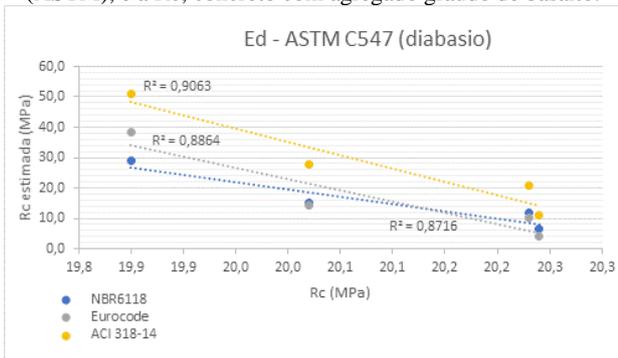


Figura 3. Valores de Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) entre as equações (ACI, NBR 6118, Eurocode) obtidos com Ed (ASTM), e a  $R_c$ , concreto com agregado graúdo de diabásio.

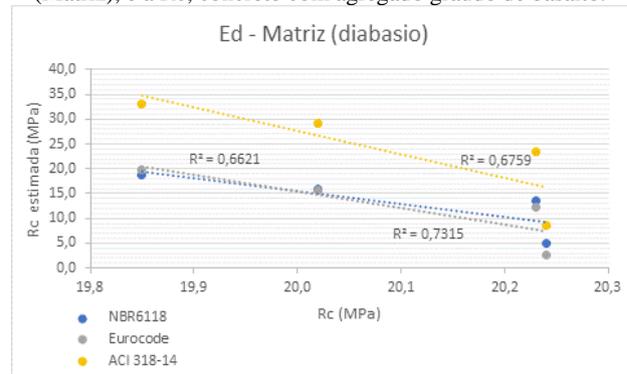


Figura 4. Valores de Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) entre as equações (ACI, NBR 6118, Eurocode) obtidos com Ed (Matriz), e a  $R_c$ , concreto com agregado graúdo de diabásio.

## CONCLUSÕES:

A partir dos resultados desta pesquisa foi possível concluir que a resistência à compressão do concreto pode ser estimada através do Ed, obtidos pela norma ASTM C547 e pela matriz de flexibilidade [S]. Entretanto, apesar dos valores de  $R^2$ , obtidos para a relação entre a  $R_c$  e  $R_c$  estimada, estarem próximos de 1, são necessários estudos mais aprofundados para se determinar coeficientes de correção. Esses coeficientes devem ser aplicados para a  $R_c$  estimada, já que os valores foram maiores do que aqueles obtidos nos ensaios destrutivos ( $R_c$ ), o que não está a favor da segurança das estruturas de concreto armado.

## BIBLIOGRAFIA

Amadio A.; Briones-Rocha A.; Galletto A.; Sprincigo T.; Ferreira G. “Análise de comportamento da onda ultrassônica e a resistência de concretos com diferentes agregados”. In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2018 – IBRACON, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete. Texto de revisão em discussão pública (maio de 2014).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C597-16: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Philadelphia, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2018. Concreto –Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014. Concreto – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014. 221p.

BUCUR, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, v. 21, p. 116-126. 1983.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 2: design of Concrete Structures: part 1-1: general rules and rules for buildings. EN 1992-1-1. Brussels, Belgium, 2004.

Moura N. A. M.; Petrelli G. A.; Amadio P. A.; Briones-Rocha C. I. A.; Ferreira S. C. G.; Carvalho G. A. M. “Validação do módulo de elasticidade do concreto obtido por ensaios de ultrassom”, 10/2019, 61º Congresso Brasileiro do concreto CBC2019 – IBRACON, Fortaleza, CE, BRASIL,2019.