



## **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto através dos ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica**

*Analysis of the static and dynamic modulus of elasticity of concrete through compressive strength tests and ultrasonic wave transmission velocity*

Nilvan Teixeira de Araújo Júnior (1); Sara Torres (1); Victor Estolano (2); Priscilla Basto (2); Antônio Acácio de Melo Neto (3)

(1) Mestrando(a) em Engenharia Civil, LabTag - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE

(2) Doutorando(a) em Engenharia Civil, LabTag - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE

(3) Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado, LabTag - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE

### **Resumo**

A utilização de métodos não-destrutivos para estruturas de concreto armado tem se tornado gradativamente comum. Ensaios dessa natureza, tendo como exemplo o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, são uma ferramenta promissora, uma vez que são capazes de fornecer informações relevantes a respeito da rigidez e da resistência do concreto sem precisar romper corpos de prova ou extrair testemunhos da estrutura. Outra vantagem, é a capacidade de repetição dos ensaios para comparação ao longo do tempo. À vista disso, esse estudo tem como objetivo analisar a correlação dos resultados experimentais obtidos entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático tangente inicial com a resistência à compressão. Utilizou-se o ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico do concreto aos 28 dias em diversos traços. As dosagens dos concretos foram feitas através do método IPT/USP. Foram confeccionados seis traços, sendo em um deles utilizado um aditivo superplastificante na mistura, onde obteve-se a menor relação água/cimento em relação aos outros traços. Realizou-se a comparação dos valores encontrados com os resultados obtidos a partir das expressões da ABNT NBR 6118:2014, fib Model Code (2013) e Eurocode 2 (2004). As expressões que melhor se adequaram aos resultados experimentais foram as propostas pelo fib Model Code (2013) e Eurocode 2 (2004). Realizou-se a adaptação de uma equação presente no CP 110:1972, através do método dos mínimos quadrados, para conceber uma equação que demonstrasse de maneira mais acertada a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão.

*Palavra-Chave: Módulo de elasticidade dinâmico; Método não-destrutivo; Resistência à compressão.*

### **Abstract**

The use of non-destructive methods for reinforced concrete structures has become increasingly common. Tests of this nature, such as dynamic modulus of elasticity test, are a promising tool since they are capable of providing relevant information about the rigidity and strength of concrete without breaking specimens or extracting samples from the structure. Another advantage is the repeatability of the assays for comparison over time. Therefore, this study aims to analyze the correlation of experimental results obtained between static initial tangent and dynamic modulus of elasticity with the compressive strength. The determination of ultrasonic wave transmission velocity was used to obtain the dynamic modulus of elasticity of the concrete at 28 days in several mix proportions. The mix proportioning of the concretes were made by the IPT/USP method. Six mixtures were made, and, in one of them was added a superplasticizer additive in the mixture, where the lowest water/cement ratio was obtained in relation to the other mixtures. The results obtained from the expressions ABNT NBR 6118: 2014, fib Model Code (2013) and Eurocode 2 (2004) were compared. The expressions that best fit the experimental results were those proposed by the Model Code (2013) and Eurocode 2 (2004). The adaptation of an equation present in CP 110: 1972 was made, using the least squares method, to design an equation that more accurately demonstrated the correlation between the dynamic modulus of elasticity and the compressive strength.

*Keywords: Dynamic modulus of elasticity; Non-destructive methods; compressive strength.*

## 1 Introdução

Com o avanço das técnicas de construção e dos conhecimentos científicos ligados à engenharia, atualmente, têm sido projetadas estruturas cada vez mais esbeltas. Isso ocorre devido ao aumento significativo das características de resistência e durabilidade conferidas ao concreto. A propriedade que rege o controle do concreto em obras é a resistência à compressão. Porém, nos dias atuais, com o avanço na tecnologia do mesmo, requerem-se outras propriedades, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade em alguns projetos.

Acompanhando a melhoria nas propriedades do concreto surgiram novas tecnologias para a medição destas. Segundo Diógenes et al. (2011), ensaios dinâmicos, de caráter não destrutivo, são uma poderosa ferramenta aos projetistas, por apresentarem a vantagem de fornecer informações integradas e globais da estrutura a respeito da rigidez e do amortecimento e, além disso, podem ser repetidos e comparados ao longo do tempo. Isto faz com que as informações obtidas a partir deste tipo de ensaio sejam desejáveis na elaboração de projetos estruturais, uma vez que o módulo de elasticidade do material, por exemplo, pode ser monitorado ao longo da vida útil da estrutura a partir de um único corpo de prova, não havendo a necessidade da moldagem de várias amostras. Cabe ressaltar que a partir do módulo de elasticidade é possível estimar a resistência do material, o que enfatiza ainda mais a importância destes ensaios para os projetistas.

O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O objetivo geral deste trabalho é contribuir com os estudos realizados para obtenção do módulo de elasticidade do concreto, comparando aqui os resultados obtidos a partir da técnica de velocidade ultrassônica com os valores de diferentes normas e algumas expressões encontradas na literatura.

## 2 Revisão Bibliográfica

Mehta e Monteiro (2014) descrevem três tipos de módulos de elasticidade, sendo eles: o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ); o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ), que se divide em módulo tangente, módulo secante e módulo corda; e o módulo de deformação à flexão.

Há alguns anos, pesquisadores procuram estabelecer a relação entre o módulo dinâmico e o estático. Segundo Malhotra (1986) essa relação não é facilmente determinada pela análise do comportamento físico, pois a heterogeneidade do concreto influencia os dois módulos de forma diferente.

Melo Neto e Helene (2002), relatam que no caso do concreto, o comportamento deixa de ser linear um pouco antes de 50% da carga última, comportamento este explicado por vários estudos sobre o processo de microfissuração progressiva do concreto sob cargas. Por isso alguns preferem denominar “módulo de deformação” ao invés de “módulo de ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

elasticidade”. Os materiais constituintes do concreto possuem módulo de elasticidade muito diferente do módulo de elasticidade do concreto, os agregados graúdos têm um módulo variando a partir de 35 GPa e a pasta de cimento variando partir 16 GPa. A deformação do concreto provavelmente será um valor intermediário entre o módulo do agregado e do módulo da pasta como pode ser visto na Figura 1.

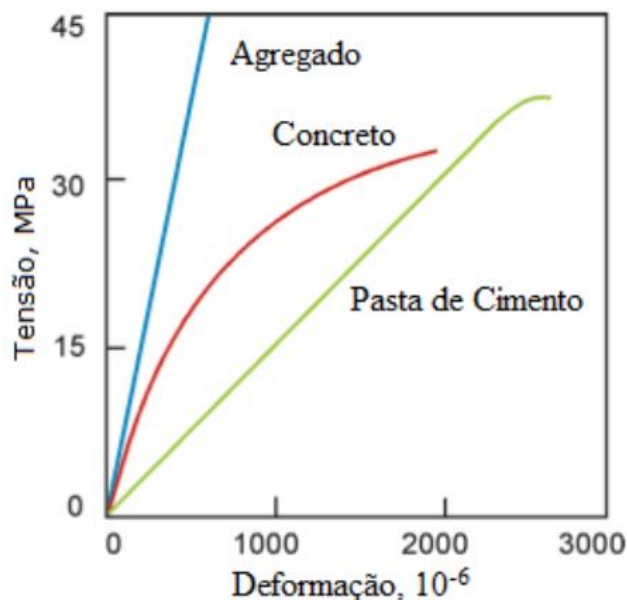


Figura 1 - Comportamento típico da curva tensão-deformação para o concreto e seus principais componentes (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Vários são os fatores que determinam o comportamento elástico do compósito em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto: a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo Shehata (2005), dentre os constituintes do material estudado, os agregados, principalmente os graúdos, têm uma grande influência no módulo. Barbosa e Geyer (2010) colocam que o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência adotada na dosagem do concreto são fatores que definem o resultado do módulo de elasticidade do concreto.

Diógenes et al. (2011) informam que, por apresentar um comportamento não-linear, a curva tensão x deformação do concreto apresenta certa dificuldade para a determinação exata de um único valor do módulo de elasticidade estático, portanto a utilização de métodos experimentais dinâmicos não-destrutivos, que aplicam carregamentos dinâmicos e não interferem diretamente na amostra, fornece o valor do módulo de elasticidade do material de forma mais precisa. Além disso, para a análise de deformações e tensões em estruturas carregadas dinamicamente o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ) é o mais adequado. O  $E_{c,d}$  pode fornecer informações a respeito da deformabilidade do concreto, da rigidez de um elemento estrutural, de suas ligações com outros elementos e da integridade da estrutura, inclusive daquelas que estão submetidas a ações estáticas.

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através métodos não destrutivos. Shehata (2005) destaca dois métodos: um que relaciona o módulo com a frequência natural de vibração e outro que relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo-de-prova. Segundo Pereira e Rodrigues (2010), as técnicas baseadas nas frequências naturais são mais utilizadas para a caracterização de materiais cerâmicos, frágeis e para caracterização em altas temperaturas, enquanto que a técnica de velocidade sônica é mais utilizada para a caracterização de metais e de concretos de construção civil.

No Brasil ainda não existe uma norma para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Entretanto, a ABNT NBR 8802:2013 prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto. Esta norma tem como principais aplicações a verificação da homogeneidade do concreto; a detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições; e o monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico), principalmente pela ação de sulfatos. Apesar desta normativa não ter como finalidade obter o módulo de elasticidade do material em estudo, ela auxilia na execução do ensaio (BENETTI, 2012).

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido a partir da expressão da ASTM C 597:2016 (Eq. 1), onde  $V$  é a velocidade do pulso (m/s),  $\rho$  é a massa específica do concreto ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $\mu$  é o coeficiente de Poisson, onde utiliza-se comumente o valor de 0,20 (DIÓGENES et al., 2011; BENETTI, 2012).

$$E_d = V^2 \times \rho \times \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (\text{Eq.1})$$

Apresentam-se a seguir, nas tabelas 1 e 2, as expressões propostas para estimar esta grandeza, de acordo com as normas que regulamentam a execução de projetos de estruturas de concreto, nacionais e internacionais, bem como as expressões obtidas por Lyndon e Baladran (1986) e Popovics (1975, apud OTANI e PEREIRA, 2015, pág. 15).



Tabela 1 – Expressões encontradas em normas para estimativa do módulo de elasticidade.

Fonte		Expressão
ABNT NBR 6118:2014	Mód. Tangente	$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}}$ , para $f_{ck}$ de 20 a 50 MPa
		$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$ , para $f_{ck}$ de 55 a 90 MPa
	Mód. Secante	$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci}$
		$E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 \times \left(\frac{f_{cm}}{88}\right)\right] \times E_{ci}$
fib MODEL CODE 2010	Mód. Tangente	$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$
		$E_{ci}(t) = \left\{e^{\left[s \times \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]}\right\}^{0,5} \times E_{ci}$
	Mód. Secante	$E_c = \alpha_i \times E_{ci}$
		$E_c = \left[0,8 + 0,2 \times \left(\frac{f_{cm}}{88}\right)\right] \times E_{ci}$
ACI 318-14	Mód. Secante	$E_c = 0,043 \times \omega_c^{1,5} \times \sqrt{f'_c}$ (MPa) , para $\omega_c$ entre 1440 e 2560 kg/m <sup>3</sup>
		$E_c = 4732 \times \sqrt{f'_c}$ (MPa) , para concreto de massa específica normal
EUROCODE 2 2004	Mód. Tangente	$E_c = 1,05 \times E_{cm}$
		$E_c(t) = 1,05 \times \left\{e^{\left[s \times \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]}\right\}^{0,3} \times E_{cm}$
	Mód. Secante	$E_{cm} = 22 \times \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}$ ( $f_{cm}$ em MPa)
		$E_{cd} = E_{cm}/1,2$

Tabela 2 - Expressões que correlacionam o módulo estático com o módulo dinâmico

Modelo	Expressão
Código Britânico BS 8110- 2:1985	$E_c = 1,25 \times E_{c,d} - 19$ (GPa)
	$E_c = 1,04 \times E_{c,d} - 4,1$ (GPa)
Lyndon e Baladran	$E_c = 0,83 \times E_{c,d}$
Popovics	$E_c = \kappa \times E_{c,d}^{1,4} \times \rho^{-1}$

### 3 Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o Cimento Portland composto com fíler, CP II-F 40, com características físicas e mecânicas de acordo com a ABNT NBR 11578:1991 apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Composição química do cimento CP II-F 40 (%).

	PF	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Eq. Alc.	RI
<b>Limites de Norma</b>	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	≤ 2,5
<b>Média</b>	3,84	2,77	2,92	3,37	4,30	62,09	19,37	0,77	0,12	0,63	1,63

Tabela 4 - Característica física e mecânica do cimento CP II-F 40.

Ensaio		Resultados	Limites NBR
Finura	Resíduo na peneira 75 µm (%)	0,2	≤ 10,0
	Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	461,3	≥ 280
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,11	-
Início de Pega (min)		156	≥ 60
Fim de Pega (min)		207	≤ 600
Expansibilidade de Le Chantelier – a Quente (mm)		0	≤ 5
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	35,4	≥ 15
	7 dias	42,0	≥ 25
	28 dias	49,2	≥ 40

O agregado miúdo e o agregado graúdo utilizados neste estudo procedem de Sirinhaém - PE, os quais são ensacados e distribuídos pela empresa AREIASIL. A Tabela 5 apresenta as características dos mesmos e a Figura 2 exibe a curva de distribuição granulométrica dos agregados. Foi utilizada água potável do abastecimento público da região metropolitana do Recife distribuído pela Compesa e foi aplicado durante a realização dos experimentos o Hyperkem™ 60, um aditivo superplastificante redutor de água do tipo SP II da indústria química Novakem.

Tabela 5 - Características do agregado graúdo e miúdo

	Areia	Brita
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,63	2,75
Massa unitária compactada (kg/dm <sup>3</sup> )	1,573	1,575

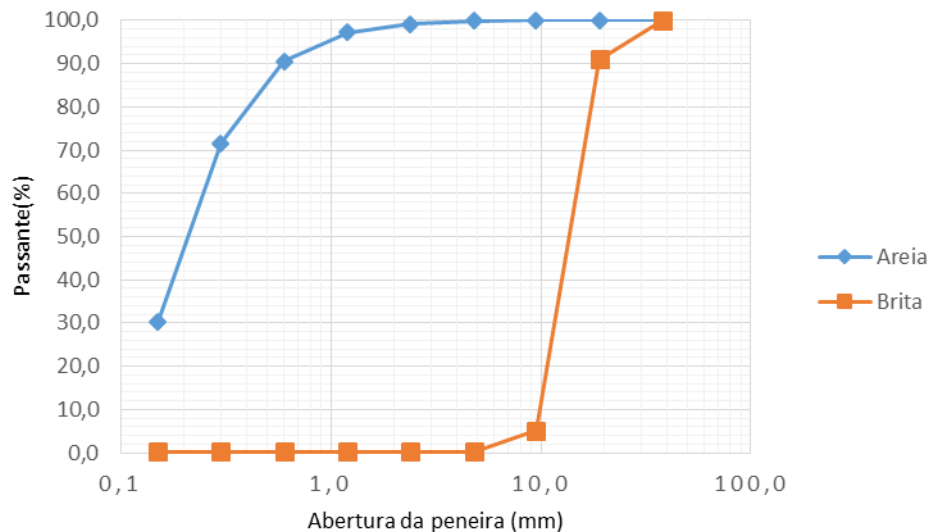


Figura 2 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo e miúdo.

## 4 Metodologia

Foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos, de dimensões 10 cm x 20 cm, no total, sendo 4 amostras para cada traço, conforme descritos na Tabela 6. A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com o procedimento da ABNT NBR 5738:2015. Após a moldagem, os corpos de prova foram identificados e colocados sobre superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que poderia perturbar o concreto. Todos foram armazenados até o momento do ensaio em câmara úmida à temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar superior a 95% durante 28 dias, protegidos de intempéries, com a finalidade de evitar perda de água do concreto.

Tabela 6 – Informações dos traços utilizados no programa experimental.

Componentes	Traço I	Traço II	Traço III	Traço IV	Traço V	Traço VI
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	418,29	526,77	348,47	506,20	356,79	372,84
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	561,94	461,04	630,01	443,03	645,05	674,07
Brita (kg/m <sup>3</sup> )	1109,24	1116,62	1108,01	1073,00	1134,46	1185,49
Água (kg/m <sup>3</sup> )	213,33	226,51	216,05	258,16	181,96	156,59
Ar aprisionado (%)	3,33	2,15	2,89	1,71	4,38	3,43
a/c (kg/kg)	0,51	0,43	0,62	0,51	0,51	0,42
m (kg/kg)	4	3	5	3	5	5
Slump (mm)	75	80	80	200	10	80
Peso específico aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2307,75	2333,21	2307,75	2285,46	2323,66	2393,69
Aditivo (%)	-	-	-	-	-	1,0
Traço unitário em massa	1:1,34:2,65:0,51	1:0,88:2,12:0,43	1:1,81:3,18:0,62	1:0,88:2,12:0,51	1:1,81:3,18:0,51	1:1,81:3,18:0,42

Concluído o tempo de cura, foram realizados, respectivamente, ensaios de obtenção da velocidade de propagação de onda ultrassônica e resistência à compressão.

A metodologia utilizada para obtenção da velocidade de propagação de onda ultrassônica seguiu a procedimento especificado pela ABNT NBR 8802 (2013), que prevê em seu escopo o método de ensaio não destrutivo para determiná-lo, através de um componente de concreto.

Antes de iniciar o ensaio, foi preciso executar a preparação dos corpos de prova, assegurando que as superfícies estivessem planas, lisas e isentas de sujeira. Caso as superfícies não se encontrassem de acordo com o estabelecido, deveriam ser regularizadas através de processos mecânicos ou com camada de pasta de cimento, gesso ou resina epoxídica, com espessura mínima, a fim de possibilitar bom acoplamento.

Uma vez prontos, aplicou-se uma fina camada de acoplante nas faces dos transdutores e nos corpos de prova ensaiados. Há três tipos de arranjos para posicionar os transdutores para determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas: o arranjo de transmissão direta, o indireto e o semidireto. Neste ensaio utilizou-se o arranjo de transmissão direta, onde os transdutores são posicionados nas faces opostas do corpo de prova, conforme ilustra a Figura 3. Este arranjo é mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através do material, pois desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade. Os transdutores, o emissor com frequência de emissão de onda superior a 20 kHz, e o receptor, se posicionam em faces opostas com a utilização de gel acoplante, a fim de permitir o contato contínuo entre as superfícies. Utilizou-se uma frequência de 54 kHz.

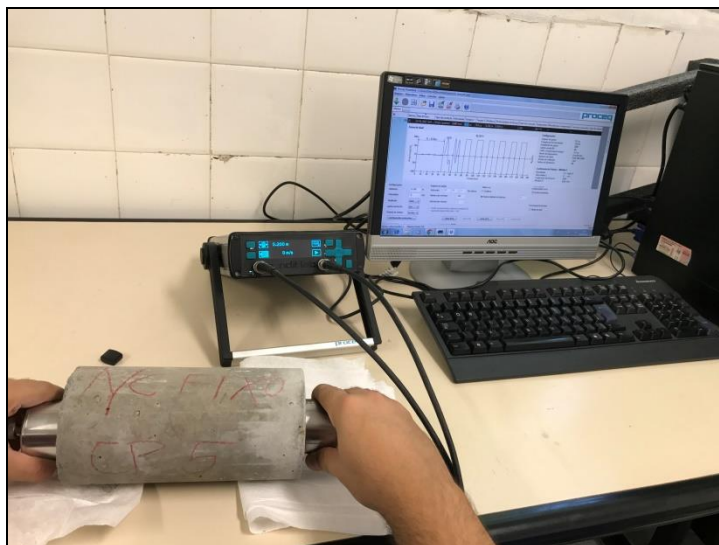


Figura 3 - Execução do ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

O cálculo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas foi realizado a partir da Equação 2.

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Eq. 2})$$



Sendo:

$V$  = Velocidade de propagação da onda ultrassônica, em mm/ $\mu$ s, arredondado a segunda casa decimal;

$L$  = Distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores, em mm;

$t$  = Tempo registrado, em micro segundos.

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser calculado, a partir do conhecimento desta velocidade utilizando-se a expressão da Eq. 1, encontrada na ASTM C 517:2016.

A resistência à compressão foi avaliada no concreto estudado segundo as recomendações da ABNT NBR 5739:2007. As amostras foram rompidas por compressão axial em uma prensa hidráulica de acionamento elétrico da marca Instron, com célula de carga 300 toneladas, localizada no Laboratório de Tecnologia de Aglomerantes da Universidade Federal de Pernambuco (LabTag – UFPE). Os corpos de prova foram cuidadosamente centralizados no prato inferior da prensa, utilizando retíficas com borracha de neoprene, e submetidos ao carregamento contínuo sem choques com a velocidade mantida constante ( $0,45 \pm 0,15$  MPa/s) durante todo o ensaio.

## 5 Resultados

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão e os módulos de elasticidade dinâmicos encontram-se na Tabela 7. Estes são apresentados com os valores médios e os seus respectivos desvios padrões.

Tabela 7 - Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico.

Traço	Resistência $\pm \sigma$ (MPa)	Velocidade $\pm \sigma$ (km/s)	$E_{c,d} \pm \sigma$ (GPa)
I	34,06 $\pm$ 1,83	4,49 $\pm$ 0,12	41,94 $\pm$ 0,51
II	43,67 $\pm$ 1,71	4,61 $\pm$ 0,04	44,69 $\pm$ 0,71
III	26,37 $\pm$ 0,67	4,42 $\pm$ 0,10	40,53 $\pm$ 1,89
IV	32,02 $\pm$ 0,50	4,44 $\pm$ 0,02	40,54 $\pm$ 0,37
V	35,11 $\pm$ 0,32	4,51 $\pm$ 0,01	42,90 $\pm$ 0,79
VI	49,06 $\pm$ 0,47	4,74 $\pm$ 0,03	48,40 $\pm$ 0,66

Mehta e Monteiro (2014) relatam que, geralmente, o módulo de elasticidade dinâmico é 20%, 30% e 40% mais alto que o módulo de elasticidade estático para concreto de alta, média e baixa resistência, respectivamente. Na análise dos dados obtidos, foi estabelecida uma correlação entre os resultados de resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico, sendo necessário convertê-lo para o módulo de elasticidade estático, conforme as expressões da Tabela 2, quando feita a comparação com os valores normativos do módulo de elasticidade tangente inicial indicados na Tabela 1. A 4 ilustra a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

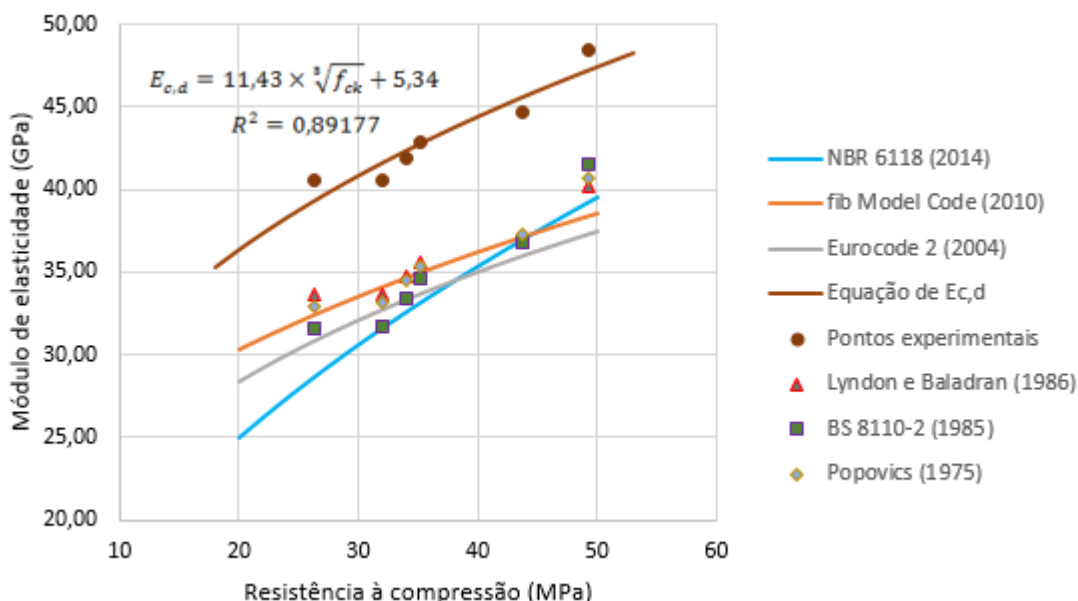


Figura 4 - Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

Procurou-se encontrar uma expressão que representasse os resultados adquiridos para os dados do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ) e resistência à compressão ( $f_c$ ). Diante disso, foi feita uma adaptação da expressão proposta no Código Britânico CP 110 (1972, apud NEVILLE, 1982) que relaciona o  $E_{c,d}$  com a resistência à compressão do corpo de prova cúbico ( $f_{c,cub}$ ), conforme a equação abaixo:

$$E_{c,d} = 7,6 * \sqrt[3]{f_{c,cub}} + 14 \quad (Eq.3)$$

A partir dela, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para encontrar novas constantes para a equação e foi substituído o  $f_{c,cub}$  para corpos de prova cúbicos pelo  $f_c$  para corpos de prova cilíndricos, chegando-se à seguinte equação:

$$E_{c,d} = 11,43 * \sqrt[3]{f_{ck}} + 5,34 \quad ; \quad R^2 = 0,89177 \quad (Eq.4)$$

Analisando a Figura 4, percebe-se que a quantidade de agregados no traço influencia significativamente o módulo de elasticidade dinâmico, uma vez os três pontos que aparecem acima da curva obtida através da Equação 4 são relativos aos traços 1:5. Já os pontos abaixo da curva são referentes aos traços 1:3 e 1:4. Mehta e Monteiro (2014), Diógenes et. al. (2011) e Malhotra (1986) relatam que a quantidade de agregados influencia no módulo de elasticidade do concreto.

Quanto aos valores convertidos para o módulo de elasticidade estático é perceptível que a nuvem de pontos gerada, no intervalo entre 20 MPa e 50 MPa, melhor se adequa às curvas referentes às equações propostas pelo fib Model Code (2010) e pelo Eurocode 2 (2004). Nota-se também que a expressão proposta pela ABNT NBR 6118:2014 é conservadora quanto ao valor do módulo de elasticidade tangente inicial no intervalo de resistência entre 20 MPa e 30 MPa.



## 6 Conclusões

Mediante a análise dos resultados obtidos é possível tirar as seguintes conclusões:

- Quanto maior a quantidade de agregado na mistura do concreto, maior o módulo de elasticidade deste material;
- O módulo de elasticidade dinâmico tende a crescer com o aumento da resistência à compressão;
- As equações propostas pelo fib Model Code (2010) e o Eurocode 2 (2004) apresentam boa correlação com os dados experimentais;
- Os valores obtidos a partir da ABNT NBR 6118:2014 mostraram-se conservadores quando comparados aos demais resultados obtidos para o intervalo de resistência à compressão entre 20 MPa e 30 MPa.

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal do Ensino Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia no Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro e agradecem ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) pelo apoio técnico para a realização da pesquisa.

## 8 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14**: Building Code Requirements for Structural Concrete. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2015. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **5739**: Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos. 2007. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 2013. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **11578**: Cimento Portland composto. 1991. 5 p.

ASTM C597-16 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.



Anais do  
60º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2018  
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

BARBOSA, I. L.S.; GEYER, A.B. Influência do agregado graúdo da Região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais..., 2010.

BENETTI, Joana Kirchner. **Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

BSI — BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 8110-2: 1985 - Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. London, UK. 2001.

DIOGENES, H. J. F. et al . Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo , v. 4, n. 5, p. 803-813, Dec. 2011.

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.

LYNDON, F. D.; BALADRAN, R. V.. Some observations on elastic properties of plain concrete, *Cement and Concrete Research*, v.16, No.3, pp. 314-24. 1986.

MALHOTRA, V.M. (1986). *Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods*. ACI Monograph nº 9. The Iowa State University Press.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. Sao Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

MELO NETO, Antonio Acacio de; HELENE, Paulo Roberto do Lago. Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos. **IBRACON**, São Paulo, p.1-16, 2002.

NEVILLE, A.M. (1982). *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini.

OTANI, L.B., PEREIRA, A.H.A.. Estimativa do módulo de elasticidade estático de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso - Informativo técnico-científico ITC-07. ATCP Engenharia Física, Divisão Sonelastic. Revisão 1.2, 01/05/2017. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26010.24001>.

PEREIRA, A.H.A.; RODRIGUES, J.A. Incerteza de medição do módulo de Young de materiais por métodos não-destrutivos adotando-se um valor estimado para a razão de Poisson. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...**, 2010.



Anais do  
60º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2018  
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

SHEHATA, L.D. Deformações instantâneas de concreto. In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

THE INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. **FIB Model Code for Concrete Structures 2010**. CEB-FIP model code. 2013.