



Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto

Considerations of the Modulus of Elasticity of Concrete

PACHECO, Jéssika ⁽¹⁾; BILESKY, Pedro ⁽¹⁾; MORAIS, Tereza Rachel ⁽¹⁾; GRANDO, Fernanda ⁽¹⁾; HELENE, Paulo ⁽²⁾.

(1) PhD Engenharia;

(2) Professor Titular da EPUSP. PhD Engenharia;

Rua Visconde de Ouro Preto, 201. São Paulo. SP 01303-060

Resumo

Por definição módulo de elasticidade ou módulo de Young é a razão entre uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação específica imediata nele verificada. Ao contrário de materiais idealizados que, segundo Robert Hooke, mantém uma proporcionalidade entre a força aplicada e a deformação verificada, observa-se que no concreto, a partir de determinados níveis de resistências, pela própria natureza do material, esta proporcionalidade não se verifica, sendo dependente e variável segundo o nível da carga aplicada. Por razões de simplicidade de cálculo, define-se em geral apenas dois módulos: o módulo estático de elasticidade tangente inicial da curva tensão-deformação, E_{ci} , e o módulo estático de elasticidade secante, E_{cs} . Essas grandezas podem ser obtidas por ensaios físico mecânicos, ultrassom e impulso estimulado por vibração. Normas internacionais, tais como o **fib** Model Code 2010, Eurocode 2004, ASTM C469/C469M-14, ASTM C597-09, ASTM E1876-09 e o ACI 318-14 possuem diferentes formas de definir, calcular, prever e ensaiar módulo de elasticidade. Como resultado dessas várias metodologias, no mercado há uma certa dificuldade de diálogo que tem gerado grande desgaste entre projetistas estruturais, laboratórios de ensaio e empresas de serviços de concretagem. Buscando um maior conhecimento do assunto, este artigo apresenta também as diferenças entre módulo estático e módulo dinâmico do concreto.

Palavra-Chave: Módulo de elasticidade; ensaios em concreto; normalização; estruturas de concreto.

Abstract

The modulus of elasticity or Young's modulus is defined as the ratio of an applied stress and its resulting strain. Unlike idealized materials that, according to Robert Hooke, maintains proportionality between applied force and its strain, it was observed that in the concrete, from certain levels of resistance, by the nature of the material, this proportionality is not verified, being dependent and variable according to the level of the applied load. For calculus simplicity, is defined, in general, only two modules: the static initial tangent modulus of elasticity, E_{ci} , and the static secant modulus, E_{cs} . These properties can be obtained by physical-mechanical tests, ultrasound tests and exciting impulse vibration tests. International standards such as **fib** Model Code 2010, Eurocode 2004, ASTM C469 / C469M-14, ASTM C597-09, ASTM E1876-09 and ACI 318-14 have different ways for defining, estimating and testing the modulus of elasticity. As a result of these various methodologies, the market has passed through dialogue difficulties wearing structural designers, testing laboratories and ready mix concrete suppliers. For greater acknowledgement of the subject, this paper also presents the difference between static modulus and dynamic modulus of concrete.

Keywords: Modulus of elasticity; concrete test; standardization; concrete structure

1 Introdução

O concreto é um material que apresenta um comportamento não linear quando submetido a tensões de compressão ou de tração, devido à sua natureza visco-elástica de pseudo sólido. O diagrama tensão-deformação mostra que esse material, diferentemente dos materiais homogêneos, não segue a lei de Hooke¹ e nem sempre apresenta proporcionalidade entre tensão aplicada e a deformação específica resultante.

De acordo com os estudos de Mehta & Monteiro (2014), esta importante propriedade do concreto é afetada por diversos fatores, conforme se observa na Fig. 1.

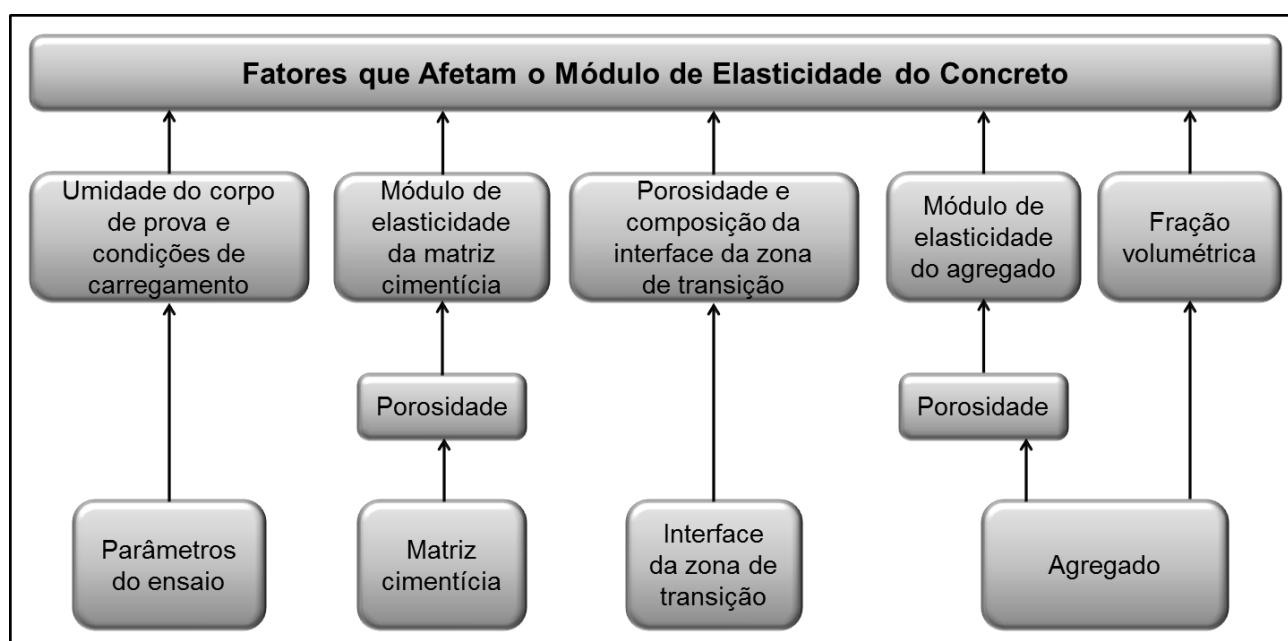


Figura 1. Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto. (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Dentre os fatores intrínsecos ao material concreto, a relação a/c está entre os mais significativos, pois interfere muito na resistência à compressão do concreto, como bem demonstram os estudos experimentais de Duff Abrams (1919), expressados na Fig. 2.

Conforme exposto, vários fatores interferem na determinação experimental do módulo de elasticidade do concreto, tais como método de ensaio, tensões limites de elasticidade, geometria dos corpos de prova, grau de saturação do concreto e outros, de tal forma que ainda é grande a dispersão dos resultados.

Para auxiliar no entendimento da questão e iniciar uma discussão sobre esta importante propriedade do concreto, principalmente quando adotada como um dos critérios de recebimento da estrutura, apresenta-se aqui um resumo das principais definições e ensaios do módulo de elasticidade do concreto.

¹ Robert Hooke, cientista experimental inglês do século XVII, que estudou a elasticidade dos corpos, na qual se calcula a deformação específica causada pela força exercida sobre um corpo, havendo uma proporcionalidade entre os valores dessas grandezas em corpos ideais. A lei de Hooke pode ser utilizada sob a condição de que o limite elástico do material não seja atingido. (WIKIPÉDIA, 2014)

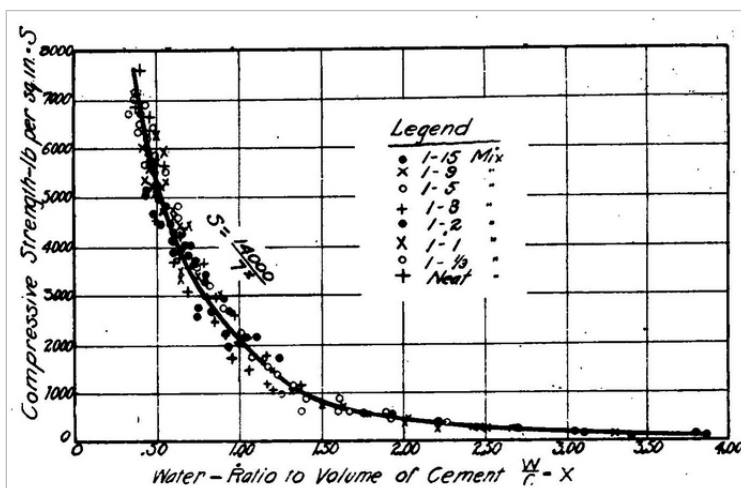


Figura 2. Influência da relação água/cimento na resistência à compressão do concreto (Reproduzido de ABRAMS, 1919).

2 Especificações do Módulo de Elasticidade - Normalização

Apresentam-se a seguir algumas definições de módulo de elasticidade de acordo com as principais normas de concreto; ABNT NBR 6118:2007, ABNT NBR 6118:2014, EUROCODE 2, **fib** Model Code 2010 e ACI 318-14.

ABNT NBR 6118:2007 item 8.1:

- E_{ci} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal a 30% f_c ;
- E_{cs} → módulo de elasticidade secante do concreto, também denominado módulo de deformação secante do concreto;
- $E_{ci}(t_0)$ → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto no instante t_0 ;
- E_{ci28} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto aos 28 dias.

ABNT NBR 6118:2014 item 8.2.8:

- o módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido segundo o método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522, sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade;
- o módulo de deformação secante pode ser obtido segundo método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522, ou estimado pela expressão:

$$E_{cs} = E_{ci} * (0,8 + 0,2 * \frac{f_{ck}}{80}) \leq 1,0;$$

EUROCODE 2 item 1.6:

- E_c → tangent modulus of elasticity of normal weight concrete at a stress of $\sigma_c = 0$;
- $E_{c,eff}$ → effective modulus of elasticity of concrete (item 7.4.3);
- E_{cd} → design value of modulus of elasticity of concrete;

- E_{cm} → secant modulus of elasticity of concrete between $\sigma_c = 0$ and $0,4f_{cm}$;
- $E_c(t)$ → tangent modulus of elasticity of normal weight concrete at a stress of $\sigma_c = 0$ and at time t .

fib Model Code 2010 – Notations:

- E_c → modulus of elasticity for concrete;
- $E_{ci}(t_0)$ → tangent modulus of elasticity of concrete at the time of loading t_0 ;
- E_{ci} → tangent modulus of elasticity of concrete at an age of 28 days;
- $E_{ci}(t)$ → modulus of elasticity of concrete at an age $t \neq 28$ days;
- $E_{c,1}$ → secant modulus from the origin to the peak compressive stress (Table 5.1-8);
- $E_{c,imp}$ → modulus of elasticity of concrete for impact loading (item 5.1.11.2.4).

ACI 318-14 item 2.2:

- E_c → modulus of elasticity of concrete;
- E_{cb} → modulus of elasticity of beam concrete;
- E_{cs} → modulus of elasticity of slab concrete.

Na ausência de resultados de ensaio, o valor do módulo estático de elasticidade do concreto a ser considerado na elaboração do projeto pode ser estimado, pelos projetistas, em função do f_{ck} de projeto ou da resistência média esperada através do ensaio à compressão aos j dias de idade num corpo de prova cilíndrico, utilizando-se as expressões apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Expressões para a estimativa do módulo de elasticidade.

NORMA	MÓDULO TANGENTE	MÓDULO SECANTE
ABNT NBR 6118:2007	$E_{ci} = 5600 * \sqrt{f_{ck}}$	$E_{cs} = 0,85 * E_{ci}$
ABNT NBR 6118:2014*	$E_{ci} = \alpha_E * 5600 * \sqrt{f_{ck}}$ para f_{ck} de 20MPa a 50MPa $E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$ para f_{ck} de 55MPa a 90MPa	$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci}$ $E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 * \left(\frac{f_{ck}}{80}\right)\right] * E_{ci}$
fib MODEL CODE 2010*	$E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$ $E_{ci}(t) = \left(e^{\left\{s * \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right]\right\}}\right)^{0,5} * E_{ci}$	$E_c = \alpha_i * E_{ci}$ $E_c = \left[0,8 + 0,2 * \left(\frac{f_{cm}}{88}\right)\right] * E_{ci}$
ACI 318 -14**	-	$E_c = 0,043 * \omega_c^{1,5} * f_c'^{1/2}$ (MPa) para ω_c entre 1440 e 2560 kg/m ³ $E_c = 4732 * f_c'^{1/2}$ (MPa) para concreto de massa específica normal
EUROCODE 2	$E_c = 1,05 * E_{cm}$ $E_c(t) = 1,05 * \left(e^{\left\{s * \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right]\right\}}\right)^{0,3} * E_{cm}$	$E_{cm} = 22 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}$ (f_{cm} em MPa) $E_{cd} = E_{cm}/1,2$

* $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaiss; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.



***o item R19.2.2.1 traz a definição de E_c como a inclinação da reta traçada a partir da origem até a tensão de compressão de $0,45f_c$ e que os valores de módulo de elasticidade obtidos através de ensaios podem variar de 80% a 120% dos valores previstos.*

Dentre as especificações apresentadas, destacam-se os critérios do ACI 318 e da ABNT NBR 6118, ora revisada, que contemplam em suas expressões variações nas suas expectativas de módulo de elasticidade estático em função das variações das massas específicas do concreto promovidas pela natureza petrográfica dos agregados que compõe o concreto.

Ainda, conforme apresentado, a definição do módulo de elasticidade nas diversas normas é variada, não havendo uma coincidência entre elas, dificultando sua compreensão no caso de projetos envolvendo pessoas de países distintos.

3 Métodos experimentais de determinação do módulo de elasticidade

Para o controle do valor do módulo especificado pelo projetista, obtido através das expressões apresentadas, diversos métodos de ensaio podem ser utilizados. Apresentam-se a seguir algumas vantagens e desvantagens das formas conhecidas de se determinar o módulo de elasticidade do concreto de forma estática, de acordo com a normalização brasileira, ou de forma dinâmica de acordo com normas e métodos internacionais.

3.1 Ensaio estático

No Brasil, o ensaio estático é normalizado pela ABNT NBR 8522:2008. Esta norma prevê a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial, E_{ci} . Para esta determinação os corpos de prova cilíndricos são inicialmente posicionados no centro da prensa, submetidos primeiramente ao processo de escorvação, ou seja, três carregamentos e descarregamentos sucessivos até o limite de $0,3f_c$, quando então são anotadas as medidas de deformação. Posteriormente estes corpos de prova são carregados até a sua ruptura. No seu anexo A, Informativo, prevê a determinação do módulo secante a qualquer tensão especificada entre $0,2f_c$ e $0,8f_c$, sem escorvação prévia do corpo de prova, simulando assim as deformações que o concreto de uma estrutura de concreto sofre em seu primeiro carregamento. Apresentam-se a seguir as definições da norma.

ABNT NBR 8522:2008:

- Item 3.5 Módulo de deformação secante (E_{cs}): Propriedade do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos pontos A e B correspondentes, respectivamente, à tensão σ_a e à tensão considerada no ensaio;
- Item 3.6 Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}): módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, que é considerado **equivalente** ao módulo de deformação **secante** ou cordal entre σ_a e $30\%f_c$, para o carregamento estabelecido neste método de ensaio;

Segundo a ABNT NBR 8522, a tensão (σ_b) corresponde a 30% da tensão de ruptura (f_c) obtida através do ensaio prévio de resistência à compressão de corpos de prova irmãos ou quando o ensaio for realizado a uma tensão especificada pelo projetista, pode-se prescindir da determinação prévia da resistência à compressão, desde que o valor da tensão especificada seja de **até $0,4 \cdot f_{ck}$** e a resistência à compressão $f_{c,ef}$ obtida ao final do ensaio seja igual ou superior ao f_{ck} especificado.

As Figs. 3 e 4 mostram exemplos da obtenção do módulo secante, segundo a normalização nacional e internacional.

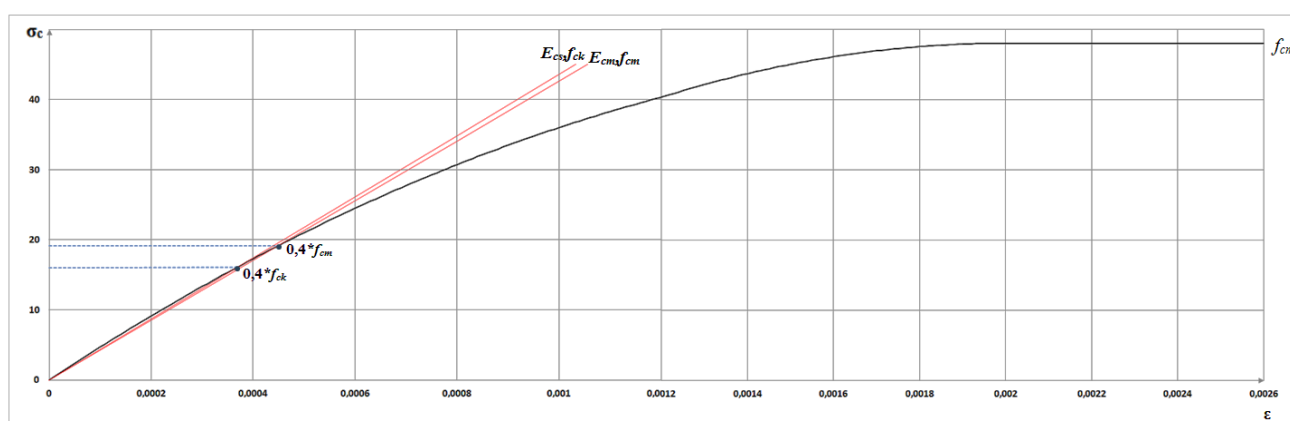


Figura 3. Determinação do módulo secante, segundo a ABNT NBR 6118:2014 e EUROCODE, para um concreto genérico de $f_{ck}=40\text{MPa}$.

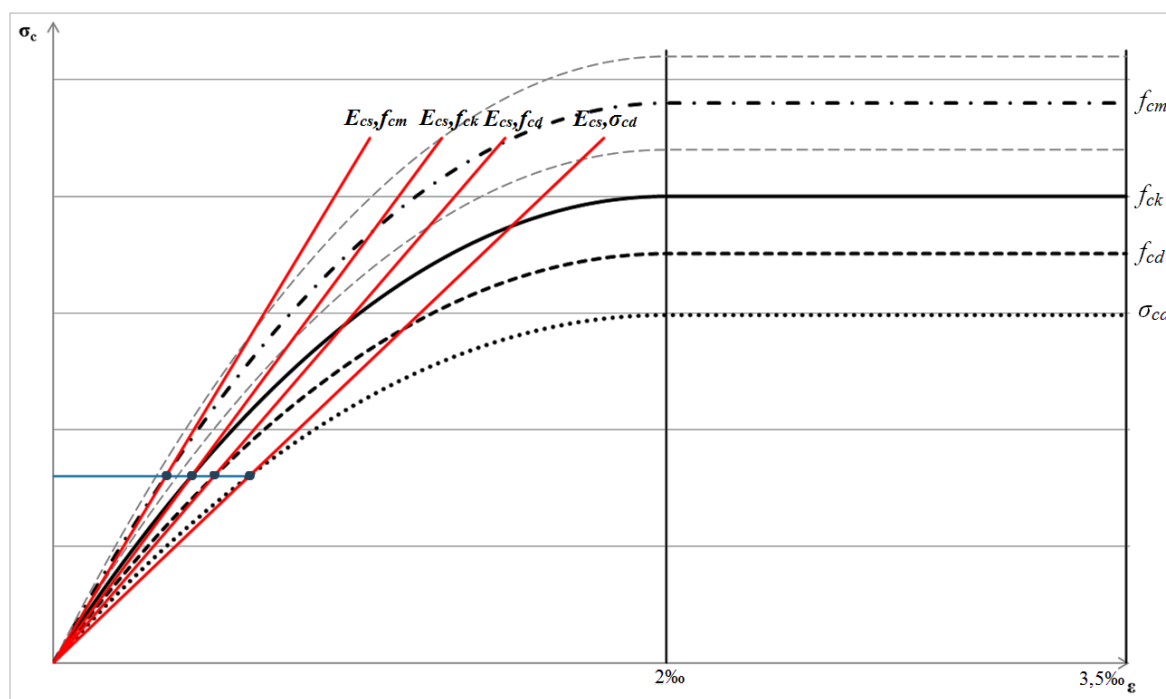


Figura 4. Diagrama tensão-deformação específica idealizado, adaptado da ABNT NBR 6118:2014, Figura 8.2.



Observa-se que, de acordo com a normalização adotada, o ponto do diagrama a ser considerado para o traçado da reta secante influencia em seu coeficiente angular, fazendo com que o valor do módulo seja maior ou menor, sendo a decisão do ponto a ser adotado de competência do projetista estrutural. Esse fato gera muita confusão, pois não há um consenso de qual valor deve ser adotado.

É importante lembrar ainda que, mesmo com a padronização dos procedimentos de ensaios e a modernização dos equipamentos de medição, pequenos descuidos na preparação dos corpos de prova e execução destes ensaios podem gerar prejuízos irreversíveis aos resultados a serem obtidos.

De acordo com Montija (2007), as variabilidades dentro do ensaio estático, aferidas em programas interlaboratoriais nacionais, podem promover desvios padrões da ordem de 3,5GPa. Dados atualizados destes mesmos interlaboratoriais, de acordo com os resultados apresentados por Bittencourt et al. (2014), mostram que estes desvios são de 5,8GPa a 6,3GPa, o que significa uma variabilidade expressa pelo coeficiente de variação da ordem de 10% a 15%, que é equivalente à variabilidade da resistência de um concreto na condição de preparo do grupo B (concreto produzido no canteiro segundo ABNT NBR 12655:2006).

Por desconhecimento dessa natural e elevada variabilidade dos resultados, também constatada pelo ACI 318 que recomenda tolerância de 0,8 a 1,2 do resultado previsto pelo modelo matemático, infelizmente tem havido discussões e desgastes desnecessários entre fornecedores, construtores e projetistas.

3.2 Ensaios dinâmicos

3.2.1 Módulo de elasticidade a partir do ensaio estimulado por impulso

O método de estímulo por impulso consiste em obter as frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica provocada pelo impacto de um pulsador no corpo de prova e, com base na sua massa e dimensões, é calculado o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Nota-se que não existe uma normalização nacional sobre esse ensaio, sendo a ASTM E1876-09 a norma de referência para a sua realização. Esta norma prescreve que os corpos de prova a serem ensaiados devem ser possuir geometrias regulares, ou seja, devem ser paralelepípedos retangulares, cilindros ou discos.

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido tanto pelas frequências flexionais (no qual o impulso e a captação ocorrem no centro do corpo de prova) quanto longitudinais (no qual o impulso é aplicado em uma extremidade e captado no lado oposto do corpo de prova), sendo que o valor do módulo obtido no modo flexional é superior ao obtido no modo longitudinal.

Assim, o módulo de elasticidade, a partir da frequência flexional, pode ser calculado por:

$$E = 1,6067 \cdot \left(\frac{L^3}{D^4} \right) \cdot (m \cdot f_f^2) \cdot T_f \quad (\text{Equação 1})$$



$$T_1' = 1 + 4,939(1 + 0,0752 \cdot \mu + 0,8109 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^2 - 0,4883 \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^4 - \left[\frac{4,691 \cdot (1 + 0,2023 \cdot \mu + 2,173 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^4}{1 + 4,754 \cdot (1 + 0,1408 \cdot \mu + 1,536 \cdot \mu^2) \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^2} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

No caso da frequência longitudinal, o módulo de elasticidade pode ser calculado por:

$$E = 16 \cdot m \cdot f_1^2 \cdot \left(\frac{L}{\pi \cdot D^2 \cdot k} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

$$K = 1 - \left(\frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot D^2}{8 \cdot L^2} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = comprimento do corpo de prova (mm);

M = massa do corpo de prova (g);

f_f = frequência de ressonância fundamental flexional (Hz);

f_1 = frequência de ressonância fundamental longitudinal (Hz);

μ = coeficiente de Poisson.

Observa-se ainda que algumas propriedades dos corpos de prova podem afetar os resultados obtidos por este ensaio, como: retificação dos topos, presença de desmoldantes ou sujeiras impregnadas na superfície, vazios no concreto, segregação e fissuras.

No método de estímulo por impulso são aplicadas tensões muito baixas Neville (1982), o que consequentemente resulta em deformações instantâneas também muito baixas. Sendo assim, o módulo de elasticidade dinâmico obtido por esse ensaio representa o comportamento elástico do concreto e seu valor se aproxima do módulo tangente inicial estático (sendo consequentemente superior ao módulo secante estático). Segundo Mehta & Monteiro (1994), o módulo de elasticidade dinâmico é geralmente 20%, 30% e 40% superior ao módulo de elasticidade estático para concretos de alta ($f_{ck} \geq 40\text{MPa}$), média ($20 < f_{ck} < 40\text{MPa}$) e baixa resistência ($f_{ck} \leq 20\text{MPa}$), respectivamente.

Segundo Almeida (2008), estudos experimentais realizados com corpos de prova cilíndricos moldados com concretos de baixa e média resistências (ensaiados aos 28 dias) e alta resistência (ensaiados aos 124 dias) mostraram que o módulo dinâmico flexional ($E_{d,trans}$) é maior que o módulo estático em torno de 28% para concretos de baixa resistência, 21% para média resistência e 6% para alta resistência. Já o módulo dinâmico longitudinal ($E_{d,long}$) é maior que o estático em torno de 34%, 27% e 8% (baixa, média e alta resistência, respectivamente).

Conforme Popovics (2008) foram realizados estudos com corpos de prova moldados com pastas de cimento com relações água/cimento de 0,34 e 0,45, nos quais se comprovou

que os módulos de elasticidade dinâmicos obtidos pelos ensaios de ultrassom e pelo método de estímulo por impulso (modo longitudinal), que são os métodos dinâmicos, resultaram em valores muito próximos, como pode ser observado na Fig. 5.

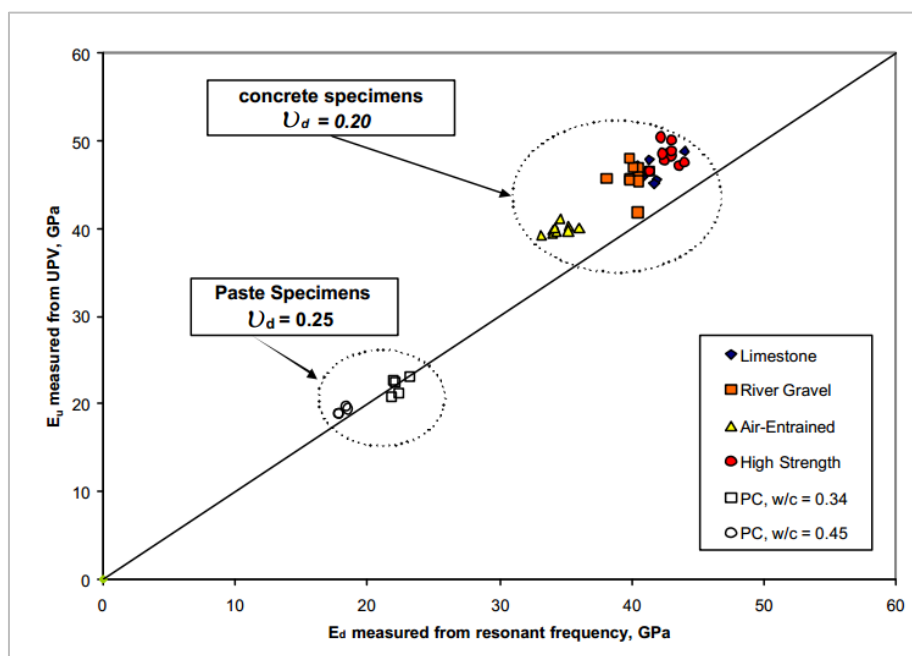


Figura 5. Comparação entre os valores do módulo de elasticidade obtidos pelo ensaio de estímulo por impulso (modo longitudinal) e pelo ensaio de ultrassom em testes realizados em corpos de prova de concreto e pastas de cimento. (POPOVICS, 2008)

3.2.2 Módulo de elasticidade a partir do ensaio de determinação da velocidade de onda ultrassônica

De acordo com o ASTM C597-09 o método de ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica em corpos de prova de concreto é aplicável para avaliar a uniformidade e a qualidade relativa do concreto e indicar a presença de vazios. As ondas longitudinais com frequências que variam de 20KHz a 150KHz são as normalmente usadas, já os tempos de percurso entre a partida inicial e recepção do pulso são medidas eletronicamente.

A velocidade de pulso, V , de ondas longitudinais numa massa de concreto está relacionada com as suas propriedades elásticas e sua massa específica de acordo com a seguinte equação:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

E = módulo de elasticidade dinâmico;

μ = coeficiente de Poisson dinâmico;

ρ = massa específica

Conforme observado, a obtenção do valor do módulo de elasticidade por esse método é feita indiretamente, isolando-se essa variável na fórmula apresentada.

Segundo a *ABNT NBR 8802:2013* o arranjo de transmissão direta (longitudinal) 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 se posicionam em faces opostas com a utilização de acoplante², a fim de permitir o contato contínuo entre as superfícies, conforme apresentado na Fig. 6.

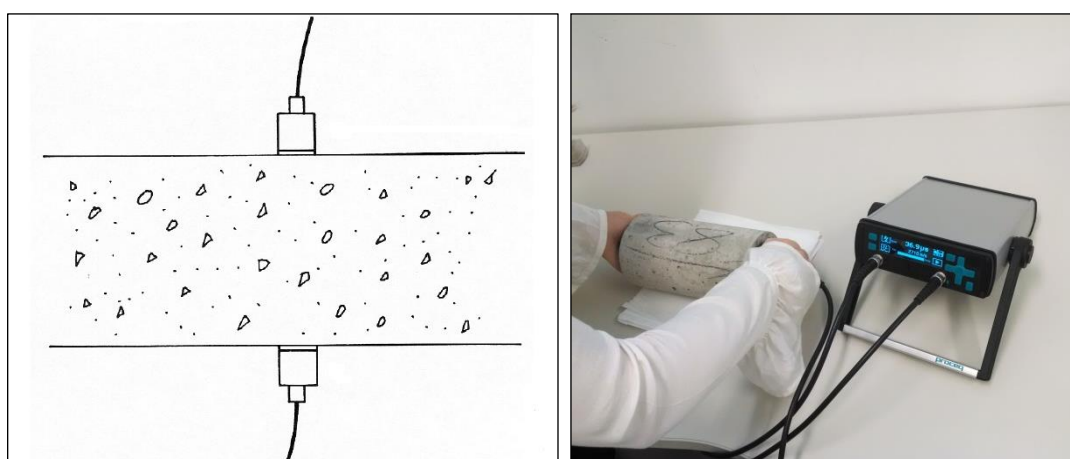


Figura 6. Posição relativa entre os dois transdutores do equipamento de ultrassom: Transmissão direta (longitudinal) e ensaio de ultrassom em andamento.

No caso de testes realizados no concreto muito deteriorado, a variação dos resultados é substancialmente aumentada. A atenuação é afetada pela natureza da deterioração e a frequência de ressonância do transdutor. As diferenças entre operadores ou instrumentos podem interferir nos resultados dos testes, de modo considerável, chegando a 20%. Nesses casos, as velocidades calculadas serão suficientemente baixas para indicar claramente a presença de deficiências patológicas no concreto analisado, conforme especificado na ASTM C597-09.

No entanto, devem-se levar em consideração os fatores que influenciam nos resultados, ressaltando desta forma a distância entre as superfícies de contato dos transdutores; a presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda; massa específica do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem; tipo, massa específica e outras características dos agregados; tipo de cimento e grau de hidratação; direção de ensaio da peça; tipo de adensamento e idade do concreto.

De acordo com Abo-Qudais (2005) o tamanho do agregado utilizado no concreto também se constitui em um fator determinante. Segundo o referido autor, quanto maior o tamanho do mesmo, maior a velocidade das ondas ultrassônicas, o que também é afirmado por Evangelista (2002), ao mostrar que concreto com agregados de massa específica maior

² Material a ser utilizado entre as faces dos transdutores e do material a ser ensaiado, a fim de permitir o contato contínuo entre as superfícies, na menor espessura possível, conforme preconizado na ABNT NBR 8802:2013 *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*.

ou com maiores quantidades de agregado, apresentam maior velocidade. Popovics (2006), afirma que a velocidade de pulso verificada em concretos de mesmo traço e com o mesmo nível de resistência, porém fabricados com diferentes tipos de agregados graúdos, pode ser diferente. Já os concretos confeccionados com cascalho arredondado apresentam menor velocidade de pulso quando comparado com concreto confeccionado com pedra calcária ou com granito que, por sua vez, apresentaram valores maiores e intermediários, respectivamente.

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através de métodos não destrutivos. Shehata (2005) destaca dois métodos: um que relaciona o módulo com a frequência natural de vibração (método do estímulo) e outro que relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo de prova. De acordo com Pereira & 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 propagação de ondas ultrassônicas é mais utilizada para a caracterização de metais e de concretos na construção civil. A Tab. 2 apresenta normas para ensaio de ultrassom e algumas diferenças entre seus procedimentos.

Tabela 2. Normas para ensaios de propagação de ondas ultrassônicas. (adaptado de Evangelista, 2002)

PARÂMETRO	NORMAS		
	NM58/1996 ABNT NBR 8802:2013	BS1881: Part. 203:1986	ASTM C597/2009
Frequência do ultrassom	Acima de 20KHz	20 KHz a 150 KHz*	20 KHz a 100 KHz
Superfície	Seca ao ar, limpa e plana	Seca ao ar, limpa e plana	Seca ao ar, limpa e plana
Área de ensaio para verificar uniformidade de elementos estruturais grandes	1m ²	-	-
Distância entre os transdutores	Precisão de $\pm 1\%$	Precisão de $\pm 1\%$	Precisão de $\pm 0,5\%$
Medições de velocidade	Precisão de $\pm 1\%$	Precisão de $\pm 0,5\%$	Precisão de $\pm 0,5\%$

No Brasil, ainda não existe norma para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Porém, a ABNT NBR 8802:2013 estabelece 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, e tem como principais aplicações verificação da homogeneidade do concreto, detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições, monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico) principalmente pela ação de sulfatos.



4 Considerações finais

Quando o módulo de elasticidade do concreto é especificado como parâmetro de recebimento e aceitação de uma estrutura de concreto, a aferição desta grandeza pelos laboratórios brasileiros é realizada através da tomada de medidas de deformação do concreto diretas na geratriz do corpo de prova, conforme estabelecido pelos procedimentos da ABNT NBR 8522:2008, módulo estático de elasticidade, que tanto pode fornecer o módulo tangente inicial ou o módulo secante.

Como demonstrado, a escolha do ponto do diagrama tensão-deformação a ser considerado para a obtenção do módulo de elasticidade estático é bastante dispersa e os procedimentos normalizados adotados para aferição experimental deste módulo são muito suscetíveis a erros, conforme registrado nos resultados dos programas interlaboratoriais realizados no Brasil. Destaca-se novamente que o ACI 318 recomenda que valores experimentais do módulo de elasticidade dentro do intervalo de $0,8 \cdot E_c$ (previsto) a $1,2 \cdot E_c$ podem ocorrer e devem ser aceitos sem questionamentos.

O aperfeiçoamento de outras tecnologias para a determinação do módulo de elasticidade e o eventual estabelecimento de novos procedimentos para sua verificação, tais como a ultrassonografia e o método do estímulo, devem ser considerados e implementados.

Considerando estes fatos e verificando os resultados de alguns estudos já realizados de determinação do módulo dinâmico do concreto, através da medida da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas ou pelo método de estímulo por impulso, entende-se que estes possam representar, para os concretos usuais, uma opção mais adequada, simples e não destrutiva. Esta perspectiva incentiva a realização de novos estudos experimentais, com a finalidade de encontrar a maneira mais adequada de realizar as medições para uma determinação mais precisa e mais rápida dessa importante grandeza.

5 Referências

ABO-QUDAIS, S.A. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**, 2005, v. 19. p. 257-263.

ABRAMS, D. A. **Design of Concrete Mixture**. Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 1919. 27 p.

ALMEIDA, S. F.; HANAI, J. B. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v.10, n. 44, p. 49-66, 2008.

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. **ASTM C597-09: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**. W. Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-09: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. W. Conshohocken, PA : ASTM International, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C469 / C469M - 14: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. W. Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522. Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802. Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM STP 169D. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials**. Joseph F. Lamond and James H. Pielert (Ed.). Pennsylvania, 2006.

BITTENCOURT, R. M.; FARIAS, L. A.; INÁCIO, J. J.; MARQUES, R. A. **Relatório do XIX Programa Interlaboratorial de Ensaios de Concreto/2013**, Furnas Centrais Elétricas S.A., à Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaios em Construção Civil do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO-CTLE-01), Goiânia, 2014.

fib COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. CEB-FIP model code. 2013.

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.

EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

MEHTA, P.K. & MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. New York: McGraw-Hill. 2014.



MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto.** 2007. 261 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

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

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.

POPOVICS, J. S. **A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete.** University of Illinois, Urbana, IL. ACI-CRC Final Report. 2008.

POPOVICS, S. Effects of uneven moisture Distribution on the Strength of and Wave Velocity in Concrete. **Ultrasonics**, 2005, v. 43. p. 429-434.

SCHOPPE, B. M. **Shrinkage and Modulus of Elasticity in Concrete with Recycled Aggregates.** Tese de Mestrado. Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 201.

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

WIKIPÉDIA. **Lei de Hooke.** 2014. Disponível em:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Hooke> Acesso em: 19 maio 2014.