

MÓDULO de ELASTICIDADE ESTÁTICO VERSUS MÓDULO de ELASTICIDADE DINÂMICO STATIC VERSUS DYNAMIC ELASTICITY MODULUS

BILESKY, Pedro⁽¹⁾; SANTOS, Rafael⁽²⁾; PACHECO, Jéssika⁽³⁾; HELENE, Paulo⁽⁴⁾

(1) Mestre em Habitação, PhD Engenharia;

(2) Mestre em Habitação, IPT;

(3) Engenheira civil, PhD Engenharia;

(4) Prof. Titular EPUSP. PhD Engenharia.

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

Resumo

O módulo de elasticidade do concreto é uma propriedade influenciada por diversos fatores, podendo ser estimada ou medida por diferentes métodos. Através de estudo experimental, foram avaliados comparativamente os resultados dos ensaios realizados para determinação do módulo de elasticidade do concreto pelo método de ensaio estático, conforme proposto pela norma da ABNT NBR 8522:2008, com os resultados obtidos pelo chamado método dinâmico, por vibração acústica através de estímulo por impulso, conforme a ASTM C 215:2014 e ASTM E 1876:2015. Foram estudados concretos de resistências à compressão que variaram de 20 MPa a 80 MPa, produzidos com 3 agregados graúdos de diferente natureza petrográfica. Os resultados obtidos de ensaios dinâmicos foram sempre superiores aos resultados obtidos de ensaios estáticos. A influência da resistência à compressão do concreto também se mostrou significativa e superior à influência da natureza dos agregados. A repetitividade dos resultados foi avaliada estatisticamente e os resultados mostraram-se adequados.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade, módulo estático versus dinâmico, ensaios; normalização; concreto.

Abstract

The modulus of elasticity of the concrete is a property influenced by several factors, and can be estimated by different methods. In an extensive experimental program, the results of different tests to evaluate the static modulus of elasticity of the concrete, following the procedure presented in the ABNT NBR 8522:2008, were compared to results obtained by dynamic method, as prescribed in the ASTM C 215:2014 and ASTM E 1876:2015. The samples compressive strength ranged from 20 MPa to 80 MPa, mixed with three different coarse aggregates. The dynamic results were always greater than the static ones. Such difference seems to be closely related to the compressive strength of the concrete, but does not seem to significantly change as the petrographic aggregate nature. The statistical significance of the results was evaluated deemed adequate.

Keywords: Modulus of elasticity; static versus dynamic modulus; tests; standardization; concrete.

1 Introdução

As propriedades mecânicas do concreto, mais comumente controladas em obras de edificações e de infraestrutura por ensaios específicos, são parâmetros obrigatórios, utilizados para o aceite definitivo de uma estrutura, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, tais como sua resistência à compressão e à tração e, mais recentemente, o seu módulo de elasticidade, devido principalmente à evolução das resistências dos concretos, que mudaram os padrões construtivos e arquitetônicos até então praticados (MELO NETO & HELENE, 2002; MARTINS, 2008).

Neste trabalho foi realizada a comparação dos resultados de ensaios obtidos pela determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, através de estímulo por Impulso conforme métodos ASTM C215:2014 e ASTM E 1876:2015, ilustrados nas Figs. 01 e 02, com os resultados obtidos pelo ensaio estático, consagrado e de uso corrente no Brasil, para determinação do módulo de elasticidade, $E_{ci,0,3^*f_c}$, ilustrado na Fig. 03, em conformidade com a ABNT NBR 8522:2008.

Especificamente, objetivou-se contribuir na busca de um procedimento de ensaio mais simples e acessível, que forneça resultados adequados, com mais rapidez aos construtores e projetistas para que estes possam idealizar e executar seus projetos com maior segurança e economia.

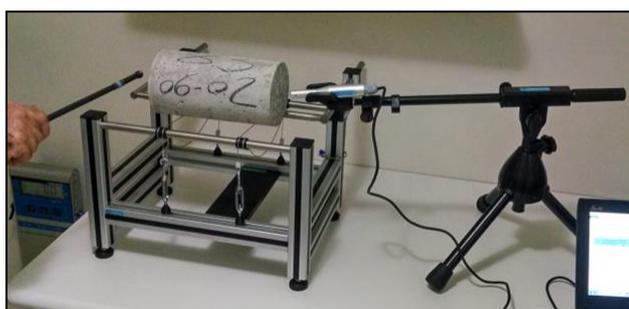


Figura 1. Vista geral do ensaio dinâmico através de estímulo por impulso e aquisição da resposta acústica, para frequência de ressonância fundamental longitudinal ($E_{ci,ei}$).



Figura 2. Forma de aplicação do estímulo por impulso e aquisição da resposta acústica, para frequência de ressonância fundamental transversal (G_c).

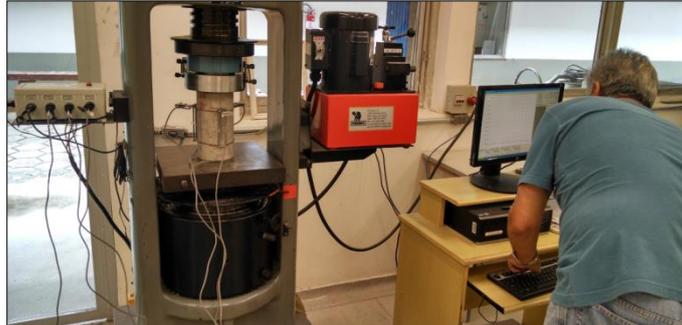


Figura 3. Aspectos da bancada do IPT para ensaios estáticos (E_{ci}).

2 Programa experimental

Evidentemente que para realização deste trabalho, não se pretendeu verificar a influência de todos os parâmetros e variáveis que interferem na obtenção do módulo de elasticidade. Assim, foram fixadas as seguintes variáveis independentes:

- consistência do concreto fresco: bombeável Classe S100;
- porcentagem de argamassa seca: 51%;
- idade do ensaio: 28 dias;
- areia de quartzo;
- areia artificial: calcária;
- agregados graúdos: diabásio, granito e calcário, com $D_{max} = 25\text{mm}$
- cimento CP II E 40;
- dimensão dos corpos de prova: 100 mm x 200 mm;
- tipo de cura: úmida até 7 dias de idade, equilíbrio do laboratório até 28 dias.

A partir do estabelecimento destas premissas, foram inseridas e controladas as seguintes variáveis intervenientes:

- cinco traços distintos de concreto, “m” em kg: 3,31; 5,0; 6,28; 6,84; 10,54.
- cinco relações distintas de água/cimento em kg/kg: 0,30; 0,45; 0,55; 0,60; 0,90.
- cinco massas específicas do concreto em kg/m^3 : 2.453; 2.398; 2.383; 2.378; 2.359.
- cinco consumos de cimento por m^3 de concreto, C, em kg/m^3 : 545; 382; 312; 290; 190.

Conhecendo e controlando todas estas variáveis, foram analisadas com segurança as seguintes variáveis dependentes, objeto deste estudo:

- resistência à compressão (f_c);
- módulo de elasticidade estático tangente inicial ($E_{ci,0,3f_c}$)
- módulo de elasticidade dinâmico longitudinal obtido através de estímulo por impulso ($E_{ci,ei}$)

Por serem mais usuais entre os laboratórios e empresas de serviços de concretagem, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões nominais de 100 mm x 200 mm, de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 e que atendem as recomendações da ABNT NBR 8522:2008.

Realizaram-se ensaios em concretos produzidos de acordo com as recomendações de consumo de cimento mínimo e relações água/cimento máximos, conforme definido e recomendado pela norma brasileira ABNT NBR 12655:2015, em seu Item 5.2.2.1, para as classes de agressividade ambiental II, III e IV. Avaliaram-se também os módulos de elasticidade em um traço de concreto de baixa resistência, com relação água/cimento maior do que o especificado pela norma brasileira. Ampliou-se ainda o escopo deste trabalho incluindo o estudo de um concreto de baixa relação água/cimento e alta resistência.

Para cumprimento dos objetivos desta pesquisa, no programa experimental executado foram seguidos os seguintes passos, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 4, para cada natureza petrográfica de agregado graúdo utilizado; diabásio, granito e calcário.

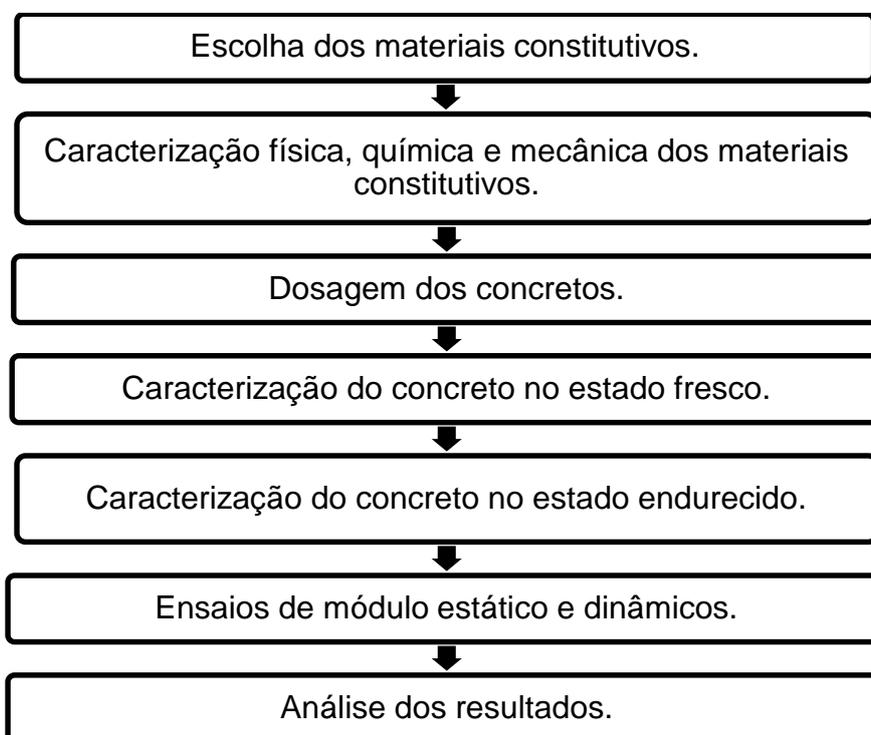


Figura 4. Fluxograma de atividades do programa experimental.

A Tabela 1 apresenta os traços unitários estudados para cada natureza petrográfica utilizada.

Tabela 1. Traços unitários adotados

Identificação do traço	A	B	C	D	E
cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
areia de quartzo	0,54	0,95	1,22	1,35	2,27
areia artificial de calcário	0,66	1,09	1,49	1,65	2,77
agregado graúdo de granito	2,11	2,96	3,57	3,84	5,50
água	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
aditivo polifuncional	0,257	0,178	0,052	0,105	0,086
aditivo plastificante	-	-	-	-	0,121
aditivo superplastificante	0,121	-	-	-	-
fator água/materiais secos (%)	7,0	7,5	7,5	7,7	7,8
teor de argamassa seca (%)	51				
consumo cimento / m ³	545	382	312	290	190
consumo água / m ³	164	172	172	174	171
relação a/c (kg/kg)	0,30	0,45	0,55	0,60	0,90
atende classe de agressividade ABNT NBR 12655	IV	IV	III	II	---
massa específica (kg/m ³)	2.453	2.398	2.383	2.378	2.359

Para os ensaios à compressão foram moldados dois corpos de prova a serem rompidos antes da realização dos ensaios de módulo, que foram realizados em seis corpos de prova moldados para cada tipo de ensaio realizado.

Com o intuito de se verificar a repetitividade dos resultados dos ensaios de caracterização dos concretos realizados, a programação completa foi realizada em duplicata, moldando-se corpos de prova dos mesmos traços, a cada 15 dias aproximadamente. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a ABNT NBR 5738:2015.

3 Resultados e análise

3.1 Materiais constitutivos dos concretos

Todos os materiais constitutivos do concreto foram analisados com base nas suas especificações e considerados apropriados para produção de concreto, conforme apresentado detalhadamente na Dissertação de Mestrado de BILESKY (2016).

3.2 Propriedades do concreto no estado fresco

Os concretos produzidos para este estudo atenderam aos parâmetros pré-estabelecidos no programa experimental. Apresentam-se nas Figs. 5 a 6 as propriedades dos concretos estudados no estado fresco.

É importante frisar que a massa específica aparente e o teor de ar aprisionado do concreto não variaram significativamente entre os traços análogos estudados e apresentaram-se inversamente proporcionais às relações água/cimento. De acordo com Geyer e De Sá (2006) concretos convencionais, sem adição de aditivos incorporadores de ar possuem teores de ar aprisionado entre 1% e 3%. Percentuais de ar incorporado ao concreto acima de 5% devido à utilização de aditivos podem trazer prejuízos ao desempenho mecânico destas misturas.

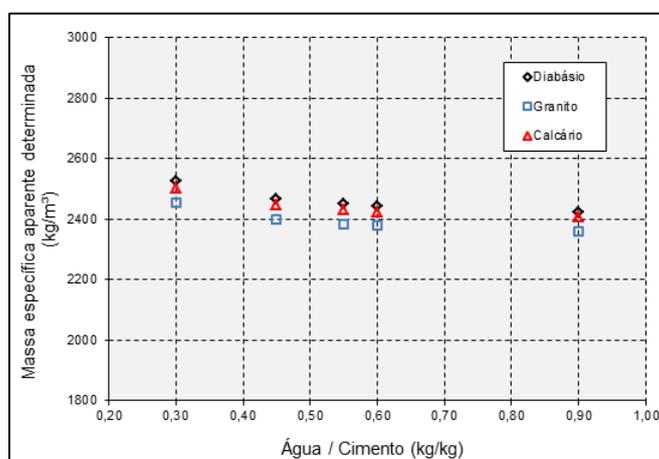


Figura 5. Massa específica aparente determinada

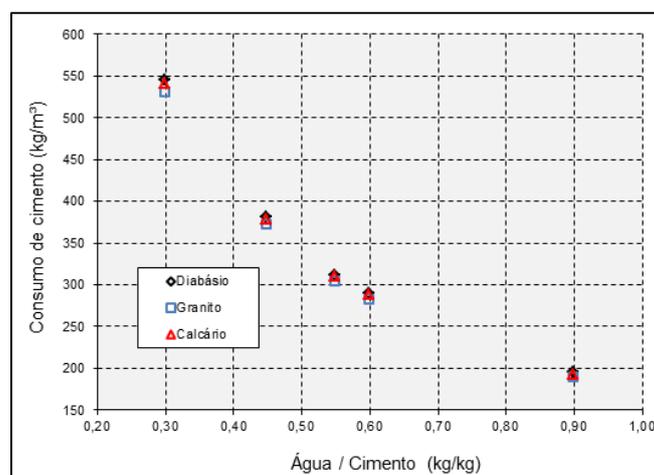


Figura 6. Consumos de cimento concretos estudados

3.3 Propriedades no estado endurecido

De acordo com o plano experimental apresentado, os corpos de prova foram moldados e curados em câmara úmida até os 7 dias de idade, conforme prescreve a ABNT NBR 5738:2015, ficando acondicionados no ambiente no laboratório até a data de ensaio (28 dias de idade).

3.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto, propriedade mais importante do concreto objeto de controle e aceitação de estruturas, depende principalmente da relação água/cimento e sua compactação (NEVILLE, 2016).

Conforme os estudos apresentados por Abrams (1919), a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento, isso significa que quanto maior for o seu valor, menor será a resistência obtida, em função da maior porosidade da matriz (HELENE; TUTIKIAN, 2011). A natureza petrográfica dos agregados graúdos, assim como a sua massa específica, são fatores que influenciam nestes resultados. O gráfico da Fig. 7 ilustra este crescimento com os resultados de resistência médias à compressão obtidos aos 28 dias.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos ora estudados e realizados para parametrizar os ensaios de módulo estáticos realizados atenderam às prescrições do Anexo B da ABNT NBR 5739:2007, apresentando coeficientes de variação do ensaio iguais ou abaixo de 1,5%, que são considerados excelentes conforme a Tabela 2.B. da referida norma. Ainda, o ACI 214:2012, mais tolerante, limita esta classificação para corpos de prova moldados para estudos laboratoriais em 2,0% (BILESKY, 2016).

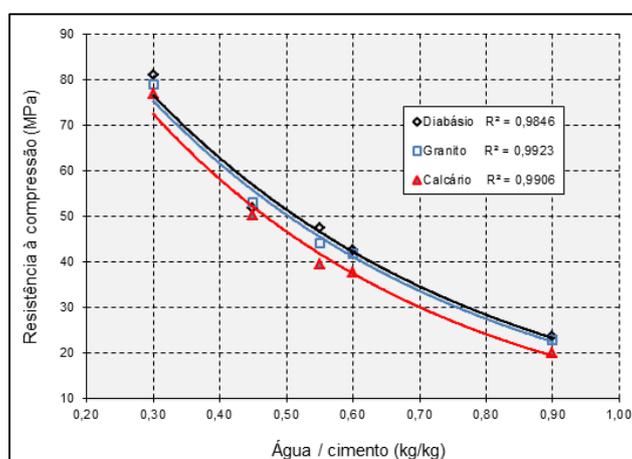


Figura 7. Resistências à compressão médias obtidas

3.3.2 Módulo de elasticidade estático e dinâmico

Nos gráficos das Figs. 8 e 9 são apresentados os resultados médios de duas séries de seis corpos de prova dos módulos estáticos e dinâmicos realizados, bem como as curvas polinomiais de tendência ajustadas, as suas respectivas equações de regressão e o coeficiente de determinação (R^2) de cada uma das naturezas petrográficas estudadas.

Os resultados dos ensaios estáticos realizados atenderam aos limites sugeridos pela ABNT NBR 8522:2008 para dispersão no ensaio, podendo ser assim as duas séries do mesmo traço consideradas iguais.

Cabe ainda ressaltar que todas as séries ensaiadas em duplicata tiveram os seus resultados considerados estatisticamente iguais, para um intervalo de confiança de 95%. O coeficiente de variação máximo determinado no ensaio estático foi de 4,4% e nos ensaios dinâmicos ficaram abaixo de 2,5%.

A partir dos dados fornecidos por estas curvas de tendência e utilizando as respectivas equações de regressão, foram estimados os valores dos módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos para as classes de resistência dos concretos estruturais C20, C30, C40, C50, C60, C70 e C80, conforme a ABNT NBR 8953:2015.

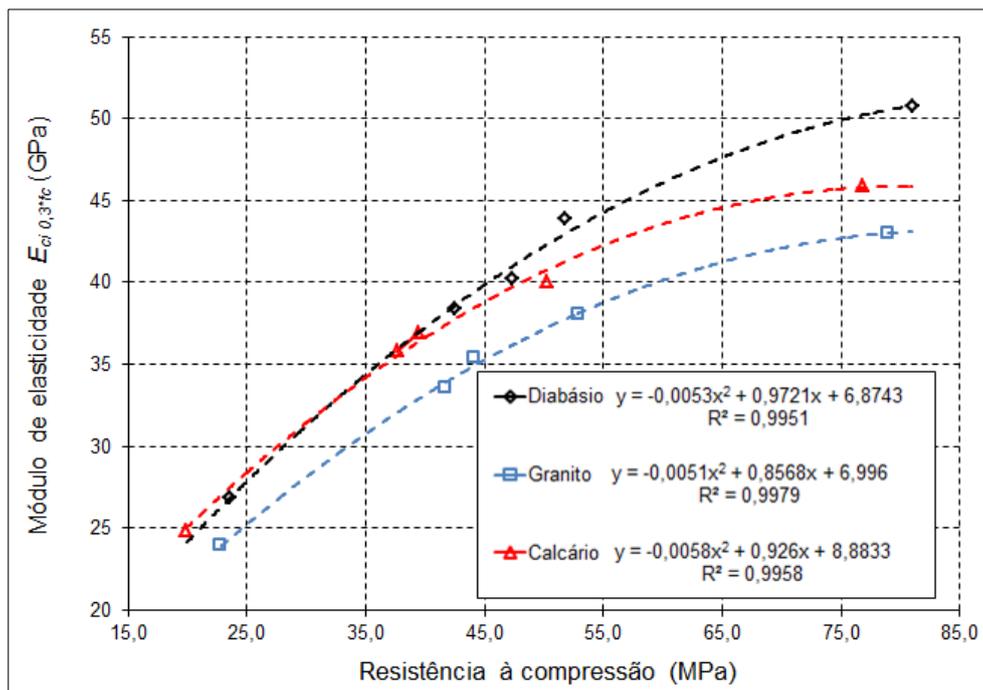


Figura 8. Módulo de elasticidade estático, $E_{ci,0,3fc}$

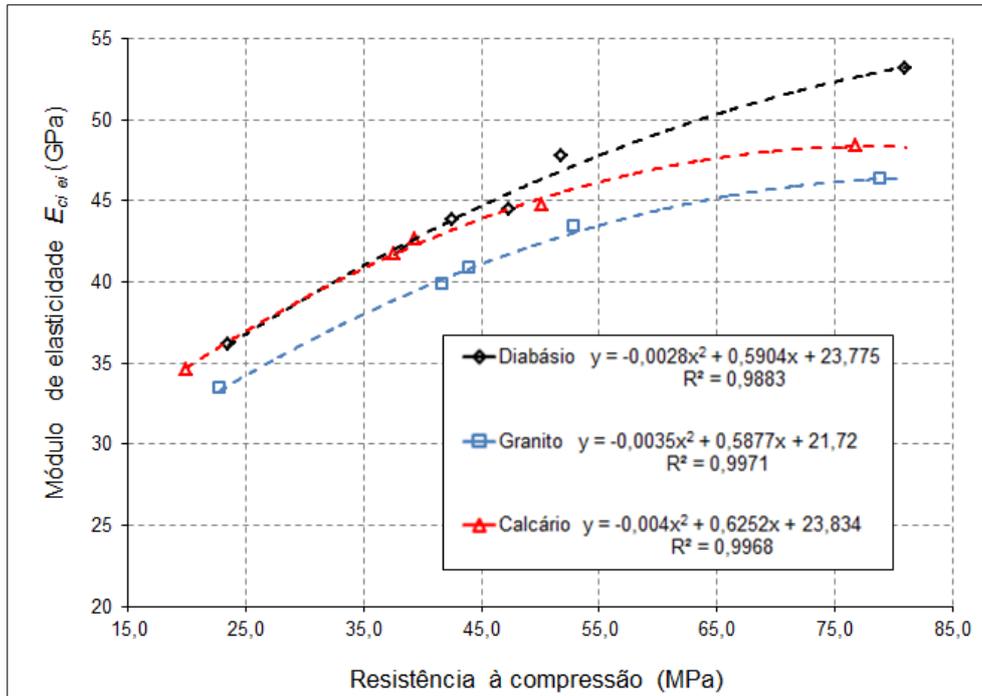


Figura 9. Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico através de estímulo por impulso, $E_{ci,ei}$.

Os gráficos das Figs. 10 e 11 apresentam os resultados destes cálculos para cada tipo de ensaio de módulo realizado, estático ou dinâmico, para cada uma das três naturezas petrográficas estudadas.

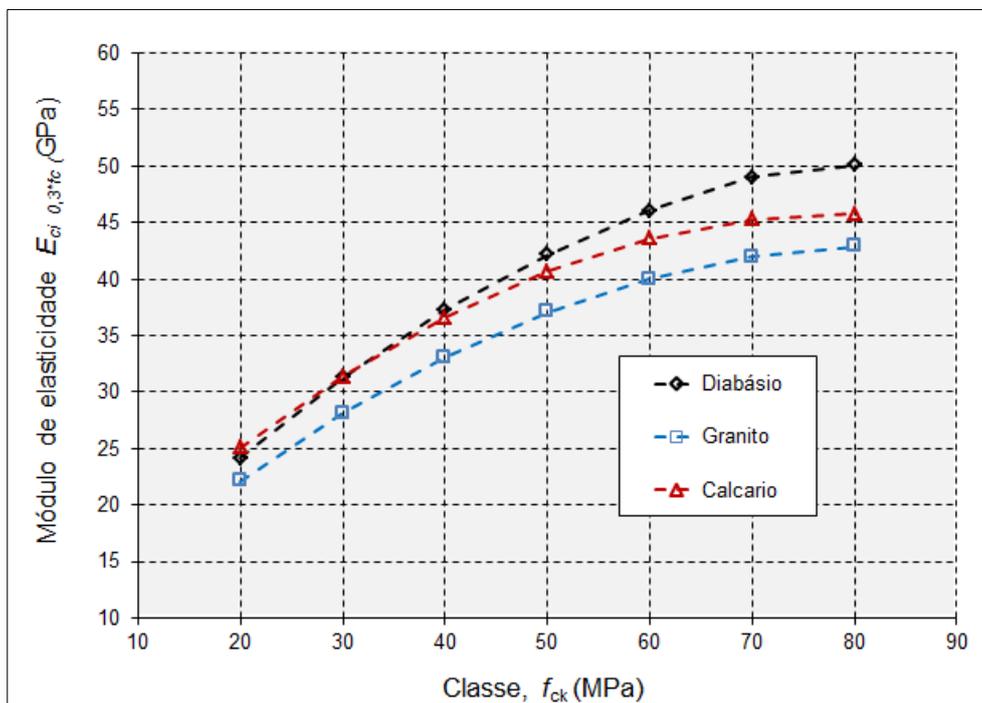


Figura 10. Módulo de elasticidade estático, $E_{ci,0,3*fc}$, por classe de resistência

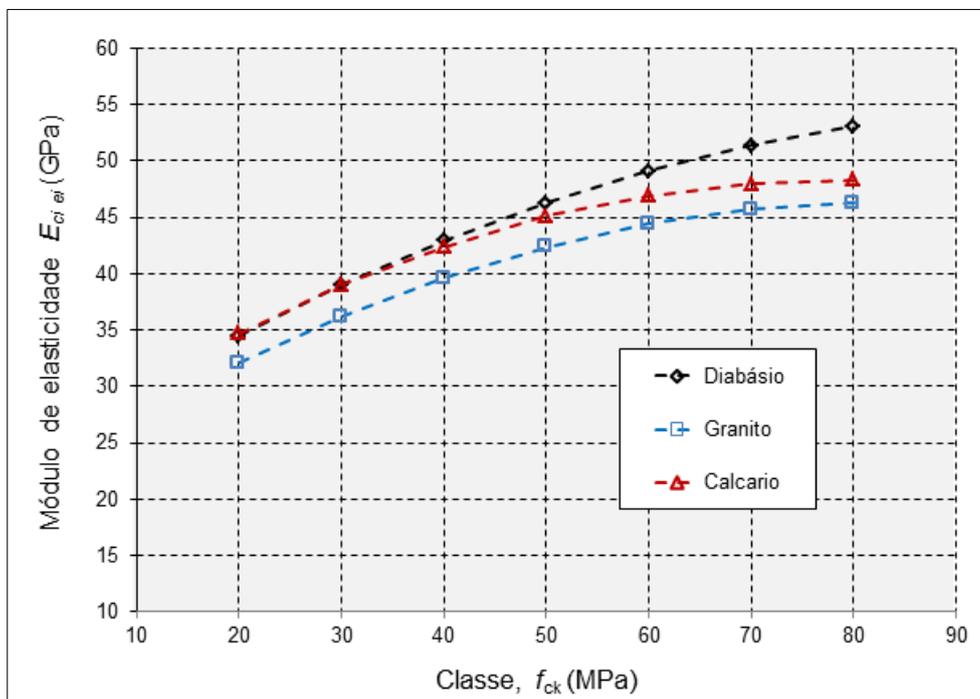


Figura 11. Módulo de elasticidade dinâmico através de estímulo por impulso longitudinal, $E_{ci,ei}$, por classe de resistência

3.4 Módulo estático versus módulo dinâmico

Como está divulgado na literatura e conforme exposto na Tabela 2 por MEHTA E MONTEIRO (2014), os resultados dos ensaios de determinação dos módulos dinâmicos, em geral, são maiores quando comparados aos resultados dos ensaios estáticos. ALMEIDA (2008), por sua vez, conforme apresentado na mesma tabela, observou que, especificamente no ensaio de estímulo por impulso longitudinal, estas discrepâncias eram menores e diminuía em função do aumento da resistência do concreto.

Tabela 2. Relação entre resultados de módulo de elasticidade dinâmico com módulo de elasticidade estático

Classe de resistência à compressão (MPa)	Mehta & Monteiro (2014)	Almeida (2008)	Este estudo
	Ensaio dinâmico em geral	Estímulo por Impulso Longitudinal	Estímulo por impulso longitudinal
Média ($20 \leq f_{ck} \leq 40$)	1,30	1,27	1,15 a 1,45
Alta (> 40)	1,20	1,08	1,05 a 1,15

Se forem tomados como “verdadeiros” os resultados dos ensaios estáticos, e como se pode observar no gráfico da Fig. 12, os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos realizados para embasamento desta pesquisa confirmaram estas tendências.

Observa-se que os resultados dos ensaios estáticos são mais suscetíveis a erros sistemáticos ou aleatórios que os resultados dos ensaios dinâmicos, como alertado por VASCONCELOS E GIANMUSSO (2009), mostrando que estes erros não podem ser eliminados completamente nem minimizados, e acabam incorporando uma dispersão de $\pm 25\%$ em relação à curva de tendência dos resultados obtidos em ensaio.

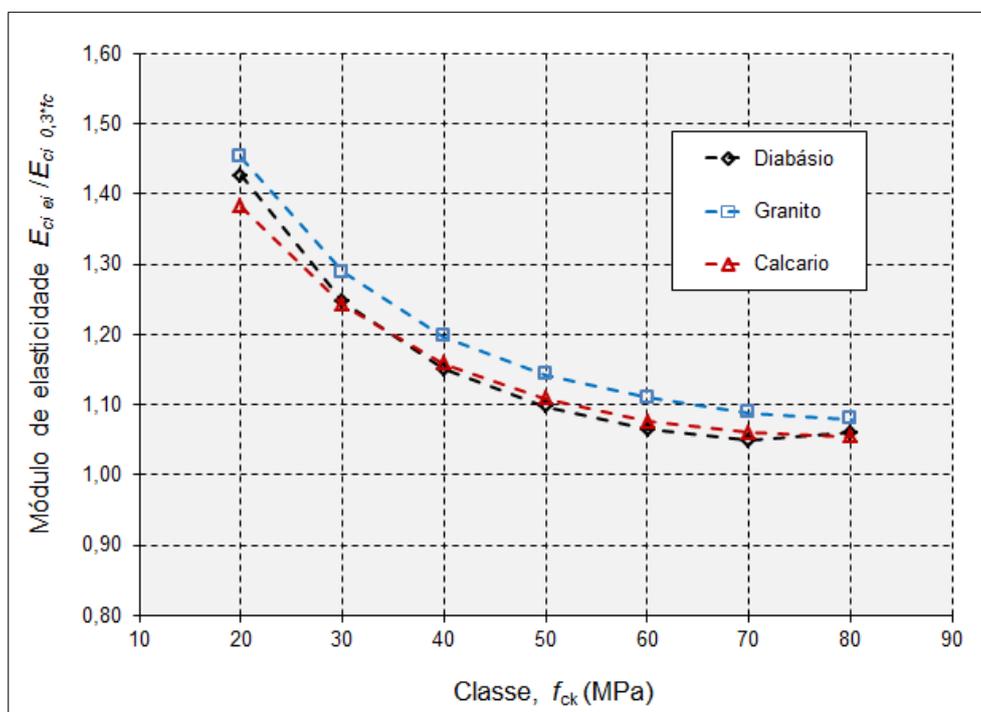


Figura 12. Comparação $E_{ci,ei} / E_{ci,0,3f_c}$, por classe de resistência.

4 Conclusões

A inexistência de resultados tidos como verdadeiros limita a comparação dos resultados dos ensaios dinâmicos aos resultados dos ensaios estáticos que, como é de amplo conhecimento, apresentam variabilidade expressa pelo coeficiente de variação da ordem de 10% a 15% conforme estudos interlaboratoriais relatados por BITTENCOURT et al., (2014), causada principalmente pela incidência dos inúmeros erros de origem aleatória, a qual esta metodologia está sujeita.

O ensaio dinâmico de determinação do módulo de elasticidade por ressonância, no caso estímulo por impulso, apesar de apresentar resultados numericamente maiores que os resultados dos ensaios estáticos normalizados trazem princípios inovadores já utilizados com sucesso em outros materiais para determinação da grandeza.

Notoriamente, os resultados dos ensaios de determinação do módulo dinâmico por estímulo por impulso apresentaram as menores dispersões e representam uma boa alternativa para melhorar qualidade dos serviços prestados pelos laboratórios. Uma vez implantado, após

estudos interlaboratoriais, poderá ser obtida redução drástica do tempo de realização do ensaio e de emissão do relatório, economia de gastos com strain gages, somando-se a possibilidade de ensaiar várias vezes o mesmo corpo de prova em outras idades, por se tratar de um ensaio não destrutivo.

5 Referências

- 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 SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **C-215**: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. 2014. 7p.
- _____. **E1876**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration . 2015. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova .Rio de Janeiro, 2015. 9p.
- _____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos .Rio de Janeiro, 2007. 9p.
- _____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16p.
- _____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3p.
- _____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 23p.
- BITTENCOURT, R. M.; FARIAS, L. A.; INÁCIO, J. J.; MARQUES, R. A. **Relatório do XIX Programa Interlaboratorial de Ensaio de Concreto/2013**, Furnas Centrais Elétricas S.A., à Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaio em Construção Civil do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO-CTLE-01), Goiânia, 2014.
- GEYER, A.L.B.; DE SÁ, R.R. **Informativo Técnico Realmix**. Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco, Ano 2, Nº 2, jul. 2006 .
- MARTINS, D. G. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos e, Goiânia-GO**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008.
- MELO NETO, A.A. HELENE, P. Módulo de Elasticidade Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte – MG. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. CD-ROM.
- METHA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.



Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2017
Outubro-Novembro / 2017



@ 2017 - IBRACON - ISSN 2175-8182

- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. Trad. Ruy A. Cremonini. São Paulo: Pini, 2015. 452p.
- TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. et al. **Concreto: Ciência e Tecnologia** 2.v. v.1 Cap. 12, p. 415-451. São Paulo: Ed. IBRACON, 2011.
- VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. O misterioso módulo de elasticidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1998. CD-ROM - Trabalho_090.