



PROCEDIMENTO PARA A ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO CARACTERÍSTICO DO CONCRETO, f_{cdin} PROCEDURE FOR ESTIMATING THE CHARACTERISTICAL DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE, f_{cdin}

Pedro Bilesky (1), Paulo Helene (2), Henrique Alves (3), Douglas Couto (4), Alessandra Lorenzetti de Castro (5), Rubens Curti (6)

(1) Mestre em Habitação, (2) Prof. Titular EPUSP, PhD Engenharia, (3) Doutor, ATCP Engenharia Física, (4) Mestre UNICAMP, PhD Engenharia, (5) Prof. Doutora do Dep. de Engenharia de Estruturas, EESC/USP, REALMIX, (6) Engenheiro Civil, ABCP.

bilesky.pc@gmail.com

Resumo

A elevada demanda de materiais de construção civil para atender as necessidades humanas crescentes de moradia, saúde, indústria e mobilidade de uma população crescente, aliado a conceitos de sustentabilidade e preservação do meio ambiente, tem gerado novos desafios às estruturas de concreto. É preciso construir mais com menos e não se pode descartar matérias primas. Como resultado os concretos devem ser produzidos com os agregados disponíveis no local, que nem sempre com a granulometria ideal, nem sempre os mais resistentes, nem os menos reativos, assim como os rejeitos de produção como pós de pedra devem sempre serem aproveitados. Por outra parte as estruturas devem ser mais esbeltas, otimizadas com menores volumes e dimensões. Nestas circunstâncias o módulo de elasticidade, ao lado da resistência à compressão, passa a ser especificado e controlado. Porém o módulo de elasticidade estático é um ensaio caro, demorado e com certa dispersão que tem gerado desgaste entre os intervenientes da cadeia produtiva do concreto. Este artigo busca apresentar um procedimento de recebimento, ensaio, controle e julgamento do módulo de elasticidade do concreto de uma forma mais barata, mais rápida e igualmente confiável. Uma vez que o módulo de elasticidade é uma propriedade que apresenta, devido às dificuldades de medida, uma certa variabilidade, propõem-se para reduzir os desgastes entre as partes, uma forma de julgamento da conformidade do resultado experimental em comparação ao valor especificado no projeto estrutural. Considerando a normalização e popularização do ensaio para determinação do módulo dinâmico do concreto, após a análise de resultados de vastos experimentos laboratoriais que comprovam a eficiência do procedimento, não-destrutivo, atestando a rapidez de execução do ensaio, aliada a alta repetibilidade e reprodutibilidade, vislumbra-se o atendimento dessa demanda. Apresenta-se neste trabalho, uma proposta de procedimento para a estimativa do módulo de elasticidade dinâmico característico do concreto, f_{cdin} , a ser empregado no controle tecnológico específico da propriedade e, com vistas a uma futura normalização, atendendo assim a necessidade de toda a cadeia produtiva da construção civil.

Palavra-Chave: Módulo de elasticidade, ensaio dinâmico, controle tecnológico, módulo característico, procedimento.

Abstract

The high demand for civil construction materials to meet the growing human needs for housing, health, industry, mobility of a growing population, combined with concepts of sustainability and environmental preservation, has generated new challenges for concrete structures. It is necessary to build more with less and raw materials cannot be discarded. As a result, concrete must be produced with aggregates available on site, which are not always with the ideal granulometry, not always the most resistant, nor the least reactive, as well as production waste such as stone powder must always be used. On the other hand, structures must be slimmer, optimized with smaller volumes and dimensions. In these circumstances, the modulus of elasticity, alongside the compressive strength, begins to be specified and controlled. However, the static modulus of elasticity is an expensive, time-consuming and somewhat dispersed test that has generated wear and tear among those involved in the concrete production chain. This article seeks to present a procedure for receiving, testing, controlling and judging the modulus of elasticity of concrete in a cheaper, faster and equally reliable way. Since the modulus of elasticity is a property that presents, due to measurement difficulties, a certain variability, it is proposed to reduce wear between parts, a way of judging the conformity of the experimental result in comparison to the value specified in the project structural. Considering the standardization and popularization of the test to determine the dynamic modulus of concrete, after analyzing the results of vast laboratory experiments that prove the efficiency of the non-destructive procedure, attesting to the speed of execution of the test, combined with high repeatability and reproducibility, this demand is expected to be met. This work presents a proposed procedure for estimating the characteristic dynamic modulus of elasticity of concrete, f_{cdin} , to be used in the specific technological control of the property and, with a view to future standardization, thus meeting the needs of the entire production chain. of civil construction.

Key words: Modulus of elasticity, dynamic test, technological control, characteristic modulus, procedure.



1. Introdução.

Mesmo entendendo que a resistência à compressão do concreto, possa não ser a propriedade de maior importância para durabilidade de uma estrutura, COUTINHO (1994), considera-se que esta forma simples de caracterização, largamente difundida através do ensaio à compressão, realizada em corpos de prova moldados de forma padronizada e submetidos a condições extremas de cura, responda a todas as outras exigências de projeto.

O critério estabelecido pelos procedimentos da ABNT NBR 12655 (2022), para o aceite e recebimento final de uma estrutura de concreto, se baseia somente no atendimento ou não da sua resistência à compressão, deixando sem qualquer regulamentação normativa procedimentos de amostragem, ensaio e análise dos resultados obtidos, a aceitação de outras características físicas ou mecânicas importantes, também solicitadas pelos projetistas das estruturas.

O aumento da resistência e durabilidade do concreto, decorrente da evolução do conhecimento na seleção e produção de agregados, do avanço da tecnologia da indústria química de aditivos, somada ao desenvolvimento apresentado pela indústria produtora de cimento Portland, aliada ainda ao aprimoramento dos estudos de dosagem desenvolvidos pelas empresas de serviços de concretagem, possibilitaram que a cadeia produtiva da construção civil lançasse mão de concretos altamente competitivos, POSSAN, E. *et al*, (2020). Acompanhando esta evolução, os métodos de cálculo das estruturas, utilizados pelos projetistas, também proporcionaram mudanças significativas aos padrões arquitetônicos adotados e possibilitaram uma mudança nos métodos construtivos, permitindo a construção de edifícios mais altos, com vãos livres maiores e seções transversais mais esbeltas, reduzindo a inércia dos elementos estruturais e aumentando os seus deslocamentos, MELO NETO E HELENE (2002). Identificou-se assim a necessidade de se controlar também o módulo de elasticidade do concreto.

Atentos a esta evolução, principalmente aos apelos de sustentabilidade e preservação do meio ambiente, que tem gerado novos desafios aos projetistas e aos executores das estruturas de concreto, buscou-se, num primeiro momento, estudar e estabelecer, BILESKY (2016), um procedimento para embasar a normalização de um ensaio para determinação do módulo dinâmico do concreto, agora de acordo com a Parte 2 da ABNT NBR 8522 (2021), que foi assentada após a análise dos resultados de vastos experimentos laboratoriais, BILESKY *et al* (2017), que permitissem a sua determinação de uma forma eficiente e segura, não destrutiva, logo ecologicamente correta, com alta rapidez, repetibilidade e reprodutibilidade, fato este que viabilizou sua rápida aceitação no meio técnico.

Ora estabelecida a forma adequada e segura de apuração da grandeza, ALVES *et al* (2023), o que justifica a proposição, sugere-se aqui, neste segundo momento, uma proposta de revisão da norma existente, ABNT NBR 12.655 (2022), para o controle tecnológico de aceitação final das estruturas de concreto, que atualmente é realizada somente através da análise dos resultados de determinação da resistência à compressão, contemplando também agora, essa importante grandeza.

Este modelo de revisão, idealizado com vistas a sua incorporação na norma existente de aceitação do concreto, deverá ser aplicado somente nos casos onde o projetista responsável identificar, em seus projetos, a necessária aferição da grandeza, uniformizando assim os procedimentos de amostragem, ensaio e análise dos resultados



obtidos, para aceitação final da estrutura em questão, atendendo assim as necessidades de toda a cadeia produtiva da construção civil, carente de regulamentação.

2. Proposta de revisão da norma ABNT NBR 12.655.

Em linhas gerais, deverão ser respeitados todos os requisitos e procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 12.655, Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento, devendo serem revistas e incluídas apenas recomendações e procedimentos específicos, para a verificação e controle do módulo de elasticidade dinâmico, conforme sugeridos, em negrito, a seguir.

2.1 Revisão do Item 2. Referências normativas.

Deverá ser incluída a Norma **ABNT NBR 8522 (2021) Concreto endurecido — Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação, Partes 1 e 2.**

2.2 Revisão do Item 3. Termos e definições.

Neste Item deverão ser incluídas as seguintes definições:

- a) **módulo de elasticidade dinâmico característico do concreto (f_{cdin})**
valor estabelecido no projeto estrutural, conforme ABNT NBR 6118, **(a ser incluído)**;
- b) **módulo de elasticidade dinâmico característico do concreto estimado ($f_{cdin,est}$)**
valor obtido estatisticamente a partir de ensaios para estimar o módulo de elasticidade dinâmico característico do concreto, a ser comparado com o valor estabelecido no projeto estrutural, (f_{cdin}). Esse valor é calculado por meio de expressões matemáticas distintas, em função do tipo adotado para o controle estatístico do módulo de elasticidade dinâmico do concreto.
- c) **módulo de elasticidade médio do concreto (f_{mdmj})**
valor do módulo de elasticidade médio do concreto, a j dias. Quando não for indicada a idade, refere-se j a 28 dias.

2.3 Revisão do Item 5. Requisitos para o concreto e métodos de verificação,

Alterar o texto do subitem 5.1.2.1 Generalidades para:

5.1.2.1 Generalidades

“A composição do concreto e a escolha dos materiais componentes devem satisfazer as exigências estabelecidas nesta Norma, para concreto fresco e endurecido, observando: consistência, massa específica, resistência, **módulo de elasticidade dinâmico**, durabilidade, proteção das barras de aço quanto à corrosão e o sistema construtivo escolhido para a obra.”

Ainda no Item 5 deve ser criado um subitem relativo ao valor do módulo de elasticidade dinâmico obtido no estudo de dosagem, análogo ao subitem 5.6.3 Cálculo de resistência de dosagem, conforme abaixo:

- a) o valor do módulo de elasticidade dinâmico médio, obtido nos estudos de dosagem, realizados previamente em laboratório, devem ser pelo menos iguais, Equação 1, ao especificado pelo responsável do projeto estrutural, logo:



$$f_{mdmj} \geq f_{cdinj} \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

f_{mdmj} é o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto determinado, previsto para a idade de j dias, expressa em gigapascals (GPa);

f_{cdinj} é o módulo de elasticidade dinâmico característico do concreto, aos j dias, expressa em gigapascals (GPa), estabelecido pelo projetista.

Sabe-se que a resistência à compressão do concreto é um dos fatores que influenciam proporcionalmente na obtenção do módulo de elasticidade do concreto. Considera-se aqui que as variabilidades, medidas pelo desvio padrão, sd, já estabelecidas para os resultados de resistência à compressão, sejam suficientes para o atendimento deste requisito, compensando eventuais perdas ocorridas em função da variabilidade dos resultados, durante a construção.

Seguindo ainda com a revisão do Item 5, sugerimos também que ainda em seu subitem 5.7.1 Procedimento, o texto da nota apresentada seja alterado para:

5.7.1 Procedimento

“NOTA Para os fins desta Norma, aceita-se que a resistência à compressão e o **módulo de elasticidade dinâmico**, sejam verificados em função de resultados de ensaios em idades menores que 28 dias, com base em dados extraídos do estudo de dosagem.”

2.4 Revisão do Item 6. Ensaio de controle de recebimento e aceitação.

Alterar a nomenclatura e o texto do subitem 6.2 Ensaio de resistência à compressão, para:

“6.2 Ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados dos ensaios de resistência, conforme a ABNT NBR 5739 e, **módulo de elasticidade dinâmico, conforme a ABNT NBR 8522 – Parte 2**, realizados em amostras formadas como descrito em 6.2.1 e 6.2.2, devem ser utilizados para aceitação ou rejeição dos lotes.”

Alterar o título da segunda coluna da Tabela 8 – Valores máximos para formação de lotes de concreto ^a, como a seguir:

Tabela 8 – Valores máximos para formação de lote de concreto ^a

Identificação (o mais exigente para cada caso)	Solicitação principal dos elementos da estrutura	
	Compressão, compressão e flexão ou módulo de elasticidade dinâmico	Flexão simples b
Volume de concreto	50 m ³	100 m ³
Número de andares	1	1
Tempo de concretagem	Três dias de concretagem	



^a No caso de controle por amostragem total, cada betonada deve ser considerada um lote, conforme 6.2.3.1
^b No caso de complemento de pilar, o concreto faz parte do volume do lote de lajes e vigas
^c Este período deve ser compreendido no prazo total máximo de sete dias, que inclui eventuais paralizações para tratamento de juntas

Alterar o texto do subitem 6.2.2 Amostragem, para:

6.2.2 Amostragem

As amostras devem ser coletadas aleatoriamente durante a operação de concretagem, conforme a ABNT NBR 16886. Cada exemplar deve ser constituído por dois corpos de prova da mesma amassada para o ensaio de resistência à compressão e, **dois corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico**, conforme a ABNT NBR 5738, para cada idade de rompimento, moldados no mesmo ato. Toma-se como resistência **ou módulo** do exemplar o maior dos dois valores obtidos **nos ensaios de realizados**.

Alterar a nomenclatura e o texto do subitem 6.2.3 Tipos de controle da resistência do concreto, para:

“6.2.3 Tipos de controle do concreto

Consideram-se dois tipos de controle do concreto: o controle estatístico do concreto por amostragem parcial e o controle do concreto por amostragem total. Para o controle por amostragem parcial é prevista uma forma de cálculo do valor estimado da resistência **à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico característicos**, do lote de concreto em estudo. Para o controle por amostragem total a 100 % das betonadas, a análise da conformidade deve ser realizada em cada betonada.

Alterar o texto do subitem 6.2.3.1 Controle do concreto por amostragem total, para:

6.2.3.1 Controle do concreto por amostragem total (100 %)

Consiste na amostragem 100 %, ou seja, todas as betonadas são amostradas e representadas por um exemplar que define a resistência à compressão **ou módulo dinâmico** daquele concreto naquela betonada. Neste caso, conforme Equação 2 abaixo, o valor da resistência característica à compressão do concreto estimada ($f_{ck,est}$) ou, o valor do módulo de elasticidade estimado, ($f_{cdin,est}$), são dados por:

$$f_{ck,est} = f_{c,betonada} \text{ ou } f_{cdin,est} = f_{mdk,betonada} \text{ (Equação 2)}$$

onde

$f_{c,betonada}$ e $f_{cdin,betonada}$ são os valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico do exemplar que representam o concreto da betonada.”

Alterar o texto do subitem 6.2.3.2 Controle estatístico do concreto por amostragem parcial para:

6.2.3.2 Controle estatístico do concreto por amostragem parcial

a) para lotes com números de exemplares $6 \leq n < 20$, o valor estimado da resistência característica à compressão ($f_{ck,est}$) **ou módulo dinâmico característico** ($f_{cdin,est}$), na idade especificada, Equação 3, são dados por:



$$f_{ck,est} \text{ ou } f_{cdin,est} = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m-1} - f_m \quad (\text{Equação 3})$$

onde

m é igual a $n/2$. Despreza-se o valor mais alto de n , se for ímpar;

f_1, f_2, \dots, f_m são valores das resistências **ou dos módulos dos exemplares**, em ordem crescente.

Não se pode tomar para $f_{ck,est}$ **ou** $f_{cdin,est}$ valor menor que $\psi_6 \cdot f_1$, adotando-se para ψ_6 os valores da Tabela 9, em função da condição de preparo do concreto e do número de exemplares da amostra, admitindo-se interpolação linear.

- b) para lotes representados por amostra com número de exemplares $n \geq 20$, Equação 4:

$$f_{ck,est} \text{ ou } f_{cdin,est} = f_{cm} \text{ ou } f_{mdm} - 1,65 \times sd \quad (\text{Equação 4})$$

sendo

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2}$$

onde

$f_{ck,est}$ **ou** $f_{cdin,est}$ é a resistência média **ou o módulo dinâmico médio dos exemplares** do lote, expressa em megapascals (MPa) **ou gigapascals (GPa)**;

sd é o desvio padrão dessa amostra de n exemplares, expresso em megapascals (MPa) **ou gigapascals (GPa)**.

Alterar o texto do subitem 6.2.3.3 Casos excepcionais, para:

6.2.3.3 Casos excepcionais

Nos casos de concreto produzido por betonadas de pequeno volume e sempre que o número total de betonadas (lote) seja superior ao de exemplares da amostra que representa esse lote, ou seja, trate-se de amostragem parcial, pode-se dividir a estrutura em lotes correspondentes a no máximo 10 m³ e amostrá-los com número de exemplares entre 2 e 5. Nestes casos, denominados excepcionais, o valor estimado da resistência característica **ou do módulo de elasticidade dinâmico característico**, Equação 5, é dado por:

$$f_{ck,est} \text{ ou } f_{cdin,est} = \psi_6 \times f_1 \quad (\text{Equação 5})$$

onde

ψ_6 é dado pela Tabela 9, para os números de exemplares de 2 a 5.

Alterar o texto do subitem 6.2.3.3 Conformidade dos lotes de concreto para:

6.2.4 Conformidade dos lotes de concreto

Os lotes de concreto, no caso de amostragem parcial, e os exemplares, no caso de amostragem total, devem ser aceitos, quando o valor estimado da resistência



característica, ou o valor de cada exemplar de uma amostragem a 100 %, calculado conforme 6.2.3, atender à resistência característica do concreto à compressão **ou do módulo de elasticidade dinâmico característico, especificado** no projeto estrutural.

3. Considerações finais

Entende-se que a evolução, gerada pelas necessidades humanas, aliadas aos novos conceitos de sustentabilidade, tem chamado atenção para que o atendimento dessas necessidades serem feitas de forma rápida e segura e, ao mesmo tempo se preservar o meio ambiente. Esta evolução, tem gerado novos desafios as estruturas de concreto, que hoje lança mão de recursos materiais reciclados ou reaproveitados, antes considerados impróprios para uso na construção civil.

A metodologia de ensaios e avaliações do desempenho dos materiais utilizados na construção civil, não pode ficar à margem dessas evoluções. As novas formas seguras e rápidas de se ensaiar materiais e analisar o seu desempenho com o mínimo de recursos utilizados, vão de encontro a estes novos paradigmas, e devem ser amplamente discutidos e adotados.

4. Bibliografia

ABNT NBR 5738 - Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5739 - Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, versão corrigida, 22.11.2023.

ABNT NBR 8522 - Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação, Partes 1 e 2. - Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ALVES, H. *et al.* Considerações sobre a incerteza de medição do módulo de elasticidade do concreto, determinado de acordo com a norma ABNT NBR 8522-1&2:2021. ANAIS DO 64° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - 64CBC2023. ISSN 2175-8182. Florianópolis, outubro 2023. 16 p.

BILESKEY, P. C.. Contribuição aos Estudos do Módulo de Elasticidade do Concreto. 2016. Dissertação Mestrado - Curso de Habitação, Coordenadoria de Ensino Tecnológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., São Paulo, 2016

BILESKEY, P. *et al.* Módulo de elasticidade estático versus módulo de elasticidade dinâmico. ANAIS DO 59° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO– 59CBC2017. ISSN 2175-8182. Bento Gonçalves, RS, outubro e novembro 2017. 13 p.

COUTINHO, A. S. Fabrico e Propriedades do Betão Vol. I. Ed.: LNEC. ISBN.: 972-49-0326-5. Português, p. 401.



MELO NETO, A. A. & HELENE, P. Módulo de Elasticidade Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. ANAIS DO 44° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44CBC2002, Belo Horizonte, MG. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002, 12p.

POSSAN, E. *et al.* Módulo de elasticidade dinâmico do concreto: por que utilizar. ANAIS DO 62° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO– 62CBC2020. ISSN 2175-8182. Florianópolis, SC, setembro 2020. 15 p.