

Polêmicas em torno do módulo de elasticidade do concreto e as soluções possíveis

FÁBIO LUÍS PEDROSO - EDITOR - <https://orcid.org/0000-0002-5848-8710> (fabio@ibracon.org.br)

As estruturas e os elementos de concreto se deformam como reação às cargas aplicadas neles. Uma laje encurva-se para baixo sob ação de seu próprio peso, ainda mais se desimbrada prematuramente. As alvenarias de fechamento podem fissurar com a deformação lenta das estruturas sob ação prolongada do seu peso, fenômeno este conhecido como fluência do concreto, que pode causar também deslocamentos dos revestimentos.

A própria estabilidade e principalmente o conforto psicológico dos usuários são postos em risco quando os deslocamentos das peças de concreto ultrapassam determinados limites de deformação conhecidos como estados limites de serviço (ELS).

Vasconcelos e Giammusso (2009) apontaram o problema no artigo “O misterioso módulo de elasticidade” ao afirmarem que “os maiores transtornos que ocorrem em estruturas são causados pela não considera-

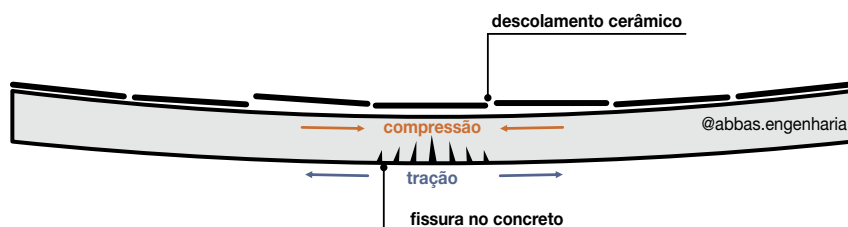


FIGURA 1

FLECHA EM LAJE – ESQUEMATIZAÇÃO DE FISSURAS EM LAJE E DESPLACAMENTO DE PISOS DEVIDO AO DESLOCAMENTO

ção das deformações e dos deslocamentos corretos nas primeiras idades do concreto”.

O problema da deformação nas estruturas de concreto vem se agravando com as mudanças nos padrões construtivos e arquitetônicos de edificações, propiciados pelos avanços no projeto estrutural e no desenvolvimento tecnológico dos materiais, que, por décadas, têm privilegiado

estruturas mais esbeltas, vãos maiores de vigas e seções transversais menores.

Um dos parâmetros de projeto para o controle das deformações nos elementos estruturais de uma obra é o módulo de elasticidade do concreto, propriedade do material que correlaciona a tensão e a deformação.

Cada material pode apresentar um ou vários valores de módulo de elasticidade, dependendo de sua composição. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior deverá ser a tensão para produzir uma certa deformação. Ou, por outro lado, quanto maior o módulo de elasticidade, menores serão os deslocamentos para um mesmo carregamento. Por isso, o módulo de elasticidade é uma das medidas da rigidez do material.

O módulo de elasticidade do concreto pode ser obtido por meio de um ensaio padronizado, seja estático ou dinâmico, e seu valor pode variar em função dos materiais constituintes do concreto, de sua proporção e da interação entre eles.

Especificar o valor do módulo de elasticidade do concreto que será usado numa estrutura é uma exigência normativa da ABNT NBR 6118, seja por tabelas ou fórmulas, seja por meio de ensaios experimentais.



FIGURA 2

MASP: DESTAQUE PARA O GRANDE VÃO DA EDIFICAÇÃO



FIGURA 3

ESTACIONAMENTO DO EDIFÍCIO LEOPOLDO 1201, ONDE É POSSÍVEL OBSERVAR GRANDES VÃOS

Com o valor do módulo de elasticidade do concreto e das tensões que atuam sobre os elementos estruturais, os projetistas podem calcular as deformações a que essas peças estarão sujeitas e se seus valores estão dentro dos limites especificados na própria norma de projeto, que garantem sua estabilidade global e sua funcionalidade.

“Um exemplo típico é o redimensionamento das cargas das paredes sobre um piso de edifício, substituindo-as por paredes mais leves quando as flechas do piso, calculadas com o auxílio do módulo de elasticidade, indicam valores acima do respectivo limite especificado nos ELS”, exemplifica o professor emérito da Universidade Federal da Bahia, Antonio Carlos Reis Laranjeiras.

A polêmica em torno do módulo de elasticidade começa quando o projetista, por não dispor de resultados de ensaio do módulo de elasticidade do concreto a ser usado numa obra, estima seu valor com base em equações matemáticas contidas na própria norma de projeto.

A ABNT NBR 6118 estabelece que o módulo de elasticidade deve ser obtido segundo o método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522. Mas, diz a norma, quando não forem realizados esses ensaios, pode-se estimar e adotar um valor para o módulo de elasticidade.

As equações da norma estimam o valor do módulo de elasticidade do concreto em função da sua resistência característica à compressão, e da natureza dos agregados,

mas existem outras variáveis importantes.

Em razão disso, construtoras, laboratórios de controle tecnológico e usinas de concreto no Brasil têm alegado que os valores estimados de módulo de elasticidade e normalmente exigidos em projetos têm sido bem superiores aos valores recorrentemente obtidos por meio dos ensaios padronizados. Sendo assim, elas têm arcado com os custos de ajustar os traços dos concretos ou de buscar agregados compatíveis em regiões distantes das obras para atender ao módulo de elasticidade especificado pelo contratante. Por conseguinte, pleiteiam ajustar as fórmulas matemáticas para que retornem valo-

res mais compatíveis com os resultados dos ensaios.

A controvérsia não é nova. Em 2007, o Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON organizou o Painel de Assuntos Controversos – Módulo de Elasticidade: mitos e realidades no 49º Congresso Brasileiro do Concreto, em Bento Gonçalves. A principal polêmica levantada e discutida foi se as equações empíricas da ABNT NBR 6118 vigente na época eram adequadas para refletir o comportamento do concreto feito com os materiais disponíveis nas diferentes regiões do país.

Apesar das alegações de discrepância entre os valores estimados e calculados do módulo de elasticidade serem renovadas até hoje, a norma de projeto acabou de ser revista e manteve as estimativas para os valores de módulo de elasticidade da última versão, preservando os mesmos coeficientes de ajustes em função dos tipos de agregado introduzidos na norma de 2014. Ou seja: para os profissionais que colaboraram com a revisão de 2023, as equações de estimativa do módulo de elasticidade espelham razoavelmente e com segurança o comportamento rígido dos concretos fabricados no Brasil.

Quem tem razão? A controvérsia é real? Quais as soluções para o impasse? Quais outras polêmicas envolvem o conceito de módulo de elasticidade?

CONCEITO PRÁTICO

O módulo de elasticidade pressupõe os materiais como elásticos, isto é, a



FIGURA 4

PAINEL DE ASSUNTOS CONTROVERSOS NO 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

proporcionalidade entre tensão e alongamento é constante, tanto no carregamento quanto no descarregamento, sendo que cessada a solitação, a deformação desaparece. Este comportamento configura a Lei de Hooke.

Mas, a rigor esses materiais elásticos não existem, pois, para alguns materiais, a deformação deixa resíduos de deslocamento, enquanto para outros, é preciso certo tempo após a liberação da carga para a recuperação integral da deformação.

O comportamento linear dos materiais pode ser admitido para valores pequenos de tensões aplicadas. “A realidade se mostrou muito diferente para tensões maiores do que 50% das tensões de ruptura. Para o concreto, em particular, a falta de linearidade começa com valores muito menores de tensões”, ponderam Vasconcelos e Giamusso (2009).

A ABNT NBR 6118 e a ABNT NBR 8522 admitem o comportamento elástico-linear do concreto a despeito desse comportamento não ser observado na realidade. A elasticidade do concreto pode ser grosseiramente admitida até o limite de 30% da sua tensão de ruptura.

Após esse limite, parte da deformação no concreto se torna permanente, ou seja, ela não desaparece quando a carga é retirada, fenômeno conhecido como plasticidade. Para o concreto, as deformações plásticas se iniciam com valores abaixo de 50% da carga de ruptura.

A explicação do comportamento elástico, viscoelástico e plástico do concreto está

na sua microfissuração progressiva sob cargas (Mehta e Monteiro, 2014). As microfissuras causadas na interface entre o agregado e a pasta permanecem estáveis até 30% da tensão de ruptura. Por conseguinte, o diagrama que relaciona a tensão e a deformação é quase linear. Entre 30% e 50% da carga de ruptura, as microfissuras na zona de transição aumentam em comprimento, abertura e quantidade, de modo que a curva tensão-deformação se desvia da linha reta, encurvando-se sensivelmente. Daí em diante, a fissuração se torna instável e se propaga cada vez mais para a matriz cimentícia, de modo que a curva tensão-deformação se torna quase horizontal, até o rompimento.

Em razão desse comportamento do concreto, com deformações elásticas seguidas de deformações viscoelásticas (parcialmente reversíveis) e, finalmente, por deformações plásticas, prefere-se atualmente o termo módulo de deformação do concreto. “O módulo de deformação correlaciona a deformação unitária de um corpo feito do material à tensão aplicada nele, sem que haja elasticidade nem linearidade”, explica a superintendente do ABNT/CB-18 Concretos, argamassas e agregados, Eng^a. Inês Battagin.

A despeito da terminologia e do comportamento real do concreto, as estruturas são projetadas para que, via de regra, não ultrapassem os valores de tensão-deformação correspondentes à zona “elástica”.

O comportamento da curva tensão-deformação do concreto é aproximadamente

uma reta para tensões da ordem de 30% da resistência. Acima disso passa a ser uma curva. Se fosse uma reta perfeita, a inclinação da reta seria o módulo de elasticidade. Como não é uma reta, tem-se diferentes convenções de módulo de elasticidade.

É por meio dessa “simplificação que se torna possível associar facilmente cargas a deformações de elementos estruturais de concreto e, assim, determinar a rigidez das peças (fluência e flechas em vigas e lajes) e a estabilidade global da estrutura”, esclarece o Prof. Antonio Laranjeiras.

Todavia, nem a curva tensão-deformação nem o módulo de elasticidade do concreto refletem o comportamento real da estrutura ou do elemento estrutural, “pois assumem não haver nem armadura nem fissuração nem fluência”, alerta o Prof. Laranjeiras. “No entanto, essas abstrações são consentidas pela norma NBR 6118 como seguras para o dimensionamento da estrutura”, complementa.

Com ele concorda o projetista de estruturas, Antonio Quintella Baptista, ao afirmar que a relação linear entre tensão-deformação simplifica enormemente os cálculos, sendo uma aproximação aceitável. “Desde que as deformações sejam pequenas, a experiência tem mostrado que o desempenho das estruturas calculadas com base na teoria da elasticidade é satisfatório”, enfatizou.

Segundo ele, as deformações no concreto são pequenas, da ordem de micrômetros, porque o concreto é muito rígido, sendo seu módulo de elasticidade elevado em comparação às tensões atuantes na peça (da ordem de 1000 vezes mais).

“A engenharia civil trabalha muitas vezes com modelos de comportamento do material e de cálculo, permitindo simplificações que não acarretem perda de segurança e de usabilidade”, explica Gustavo Fortes, diretor adjunto de normas da ABCE, quanto ao uso do módulo de elasticidade no projeto estrutural.

CONTROLE DOS PARÂMETROS DE ENSAIO E SUA EVOLUÇÃO

Como o módulo de elasticidade ou deformação é medido?

Como uma convenção para fins de dimensionamento das estruturas, existem diferentes módulos, para diferentes propósitos de análise estrutural, que são obtidos

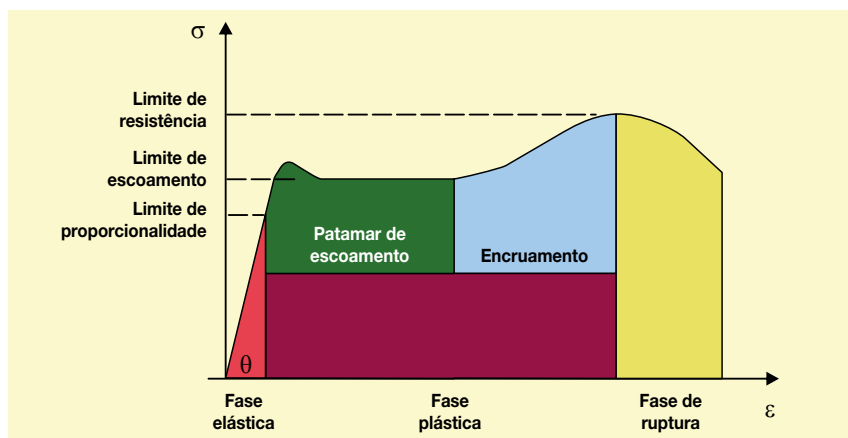


FIGURA 5

GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

por diferentes procedimentos de ensaio.

A ABNT NBR 8522-1 especifica um método para a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do concreto endurecido, em corpos de prova cilíndricos moldados ou extraídos da estrutura.

A partir de três corpos de prova para determinação do módulo de elasticidade e dois corpos de prova do mesmo concreto para obter a resistência à compressão, mede-se, no equipamento devidamente instrumentado, a deformação específica sob carregamento com controle de tensão, ou a tensão necessária para a deformação específica controlada.

O módulo de elasticidade é o resultado da relação entre a variação das tensões aplicadas e a variação das deformações específicas medidas.

Para o ensaio, considera-se um ponto de baixa tensão (0,5 MPa), que garante uma deformação mínima de compressão do concreto, e uma tensão máxima estipulada dentro do regime elástico do concreto.

A tensão mínima considerada no ensaio e os carregamentos e descarregamentos sucessivos antes de se aferir as medidas visam minimizar os efeitos indesejados que podem interferir nos resultados e invalidá-los. A presença de imperfeições nos corpos de prova, a variabilidade das máquinas de ensaio e o processo de acomodação do topo e base dos corpos de prova aos pratos da prensa podem gerar uma perturbação inicial no diagrama tensão-deformação (Rodrigues e Figueiredo, 2005).

Se a tensão máxima considerada é 30% da tensão de ruptura, então se obtém o módulo de deformação tangente inicial, que é usado para obter as deformações sob tensões usuais no projeto estrutural, estimativas de fluência e perdas de protensão, bem como o comportamento global da estrutura.

Como existe uma variação normal das resistências à compressão do concreto, se o corpo de prova ensaiado para determinação do módulo for menos resistente que o corpo de prova usado para determinar a resistência à compressão, haverá, na prática, um carregamento maior do que 30% da tensão de ruptura, de modo que o resultado do módulo será subestimado. Por outro lado, este resultado poderá ser

superestimado na situação inversa (Borin *et al.*, 2010).

Para minimizar os efeitos dessas situações, a ABNT NBR 8522-1 determina que se a resistência à compressão no corpo de prova ensaiado para obter o valor do módulo de elasticidade tangente for maior que 20% da resistência à compressão do corpo de prova ensaiado para determinar a resistência à compressão, os resultados devem ser descartados.

Já, para o ensaio do módulo de deformação secante, a resistência à compressão na ruptura deste corpo de prova deve ser maior que a resistência à compressão. O módulo de deformação secante é obtido quando a tensão máxima é especificada pelo projetista ou pelo contratante, sendo usado para estimar os esforços solicitantes e os estados limites nas estruturas, bem como as flechas em vigas e lajes.

Como o que acaba por variar na prática é o nível de tensão máxima, os módulos de deformação tangente e secante são, de fato, módulos de deformação secantes associados a nível de tensão mais baixo e a outro maior, respectivamente (Borin *et al.*, 2010).

Para traçar o diagrama tensão-deformação, a tensão é aplicada crescentemente nos corpos de prova, com incrementos de 10% da tensão de ruptura, sendo medida a deformação correspondente a cada incremento.

Os diagramas tensão-deformação do concreto numa determinada idade dependem dos seus materiais constituintes, da proporção e interação entre eles, bem como dos corpos de prova e dos métodos de ensaio (Shehata, 2005).

A forma e dimensão da seção transversal, a relação entre comprimento e base e a direção de concretagem dos corpos de prova influenciam os resultados dos módulos de deformação. Já, o teor de umidade do corpo de prova, a velocidade de aplicação da tensão, a restrição da deformação pelas extremidades capeadas do corpo de prova e até o comprimento ao longo do qual se mede a deformação são parâmetros do ensaio que influenciam os resultados do módulo de deformação.

Uma vez que o corpo de prova e o método de ensaio são padronizados, como o faz a ABNT NBR 8522-1, o diagrama tensão-deformação passa a depender das características do concreto, tais como: poro-



FIGURA 6

ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

sidade dos agregados (agregados densos têm maior rigidez); porosidade da matriz cimentícia (controlada pela relação água/cimento, teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento); e vazios capilares e microfissuras na zona de transição da interface entre o agregado e a matriz cimentícia (afetada pela dimensão, forma textura, distribuição granulométrica e composição dos agregados).

“Agregados íntegros, de maior módulo de elasticidade – que pode ser determinado pela ABNT NBR 10341 – possibilitam a obtenção de concretos com maiores valores de módulo de elasticidade, bem como concretos de maior resistência, maior massa específica e menor relação água/cimento, que apresentam menor porosidade na zona de transição pasta/agregado”, comenta Inês Battagin.

Essas correlações apareceram no Relatório EPUSP (1998), que avaliou o módulo de elasticidade tangente inicial de concretos produzidos com agregado graúdo de rocha granítica de São Paulo e de concretos produzidos com agregado graúdo de gnaiss do Rio de Janeiro: os concretos com consistência fluida apresentaram menores valores de módulo de elasticidade do que os de consistência seca, mas módulos maiores que os concretos produzidos no Rio de Janeiro, para todas as idades (Shehata, 2005).

O tipo de agregado influencia o valor do módulo de elasticidade devido à sua composição mineralógica, estrutura e textura, mas também devido ao intemperismo - umedecimento/secagem, aquecimento/resfriamento, congelamento/degelo, solubilização por ácidos. “Assim, não é difícil prever que rochas da mesma família, com graus de intemperismo diferentes, possam apresentar módulos de deformação acentuadamente divergentes”, explica o diretor do IBRACON, Eng. Carlos Massucato, que estudou a influência dos tipos de agregados no módulo de elasticidade do concreto.

Essa variabilidade significativa entre os valores de módulo de elasticidade dos concretos produzidos em diferentes regiões do país mostra a importância do ensaio para informar a análise e o projeto estrutural. Por outro lado, a multiplicidade de fatores intervenientes e suas complexas interações não deixam margem para dúvidas de que estimar o módulo de elasticidade a partir da resistência característica à compressão do concreto é uma simplificação grosseira.

Todavia, a dispersão nos resultados dos ensaios passa a ser um problema quando acontece em condições controladas dos parâmetros de ensaio e de características do concreto. Essa dispersão foi verificada em nove edições do Programa Interlaboratorial de Ensaio em Concreto Endurecido, o que deu margem a críticas quanto à confiabilidade dos resultados do ensaio padronizado pela ABNT NBR 8522.

Essa dispersão balizou a revisão desta norma, em 2008. Para diminuí-la, a nova norma estabeleceu: a introdução de um limite máximo admissível de 5% entre os resultados individuais de deformação específica e a média das deformações; e a fixação dos limites de 5% de repetitividade — ensaios feitos num mesmo laboratório — e de 10% de reprodutibilidade — ensaios feitos em laboratórios diferentes (Cupertino *et al.*, 2009).

Esses autores informam que os resultados corrigidos do ensaio de módulo de elasticidade do 15º Programa Interlaboratorial de Ensaio em Concreto Endurecido, executado conforme o novo texto da ABNT NBR 8522 por 21 laboratórios, em 2008, apresentaram um coeficiente

de variação igual ou abaixo de 10%.

Pragmaticamente, devido à complexidade e dificuldade do ensaio que acarreta variabilidades grandes nos resultados, o presidente do IBRACON, Prof. Paulo Helene, defende que resultados de ensaio, dentro de uma margem de mais ou menos 20% do valor especificado no projeto estrutural, devem ser aceitos como normais e conformes. “Essa é também a posição dos americanos conforme consta no texto da norma ACI 318”, argumenta o Paulo Helene.

Os limites de 2008 foram mantidos na norma de ensaio estático de elasticidade de 2021, que apresentou, pela primeira vez, outro ensaio para calcular o módulo de elasticidade — o ensaio dinâmico (ABNT NBR 8522-2). Este consiste em obter frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica do corpo de prova ao impacto de um pulsador. “Este ensaio é não destrutivo, possibilita o uso de corpos de prova de menor dimensão e apresenta baixa dispersão dos resultados”, avalia Pedro Bilesky, que realizou mestrado no tema no IPT.

Como as tensões e deformações obtidas por meio do ensaio são muito baixas, o módulo de elasticidade dinâmico representa o “comportamento elástico” do concreto e seu valor se aproxima do módulo tangente inicial estático. A própria ABNT NBR 8522-1, em seu anexo, estabelece uma correlação teórica entre o módulo dinâmico e o módulo de elasticidade estático no regime elástico.

A expectativa é que sua disseminação e uso restrinja ainda mais a dispersão dos resultados do módulo de elasticidade relativos a um mesmo concreto.

POLÊMICA QUANTO À ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

O conhecimento do módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios padronizados é essencial para prever razoavelmente o comportamento da estrutura, possibilitando seu dimensionamento para resistir às diversas solicitações a que estará sujeita, com margem adequada de segurança.

Nas palavras do diretor-adjunto da ABECE, Gustavo Fortes: “Os ensaios realizados ao longo de mais de um século

de utilização do concreto demonstraram quais deformações são aceitáveis e quais podem provocar problemas de ruptura ou fissuras excessivas, a depender do elemento e sua posição na estrutura”.

No entanto, quando o projetista não dispõe dos resultados de ensaios do módulo de deformação do concreto a ser utilizado na estrutura, a norma brasileira ABNT NBR 6118 faculta a estimativa do módulo a partir da resistência característica à compressão do concreto.

“O ideal é ter resultados confiáveis, realizados por laboratório idôneo e capacitado no ensaio, para poder avaliar de forma mais confiável o valor do módulo de elasticidade, como prevê a ABNT NBR 6118 em seu item 8.2.8”, esclareceu Inês Battagin.

Isto porque, como vimos, os fatores determinantes do módulo de deformação do concreto são variados, complexos e inter-relacionados, influenciando também a resistência à compressão do concreto, mas com graus diferenciados (Mehta e Monteiro, 2014).

Tanto que existem diferentes equações matemáticas para estimar o módulo a partir da resistência à compressão do concreto. Algumas levam em conta, além da resistência à compressão, a massa específica do concreto, o tipo de agregado do concreto, a existência de adições e “até e muito importante a consistência do concreto fresco”, informa o Prof. Paulo Helene.

A ABNT NBR 6118:2014 traz duas equações para estimar o módulo de deformação do concreto: uma é função de raiz quadrada da resistência característica à compressão, sendo aplicada aos concretos de classes de resistência de até 50 MPa (Grupo I); a outra é função de raiz cúbica da resistência característica à compressão, sendo associada aos concretos de classe de resistência de 55 MPa a 100 MPa (Grupo II).

Como o módulo varia com o tipo de agregado, a norma brasileira vigente possibilita corrigir os valores estimados por coeficientes relacionados a esses tipos.

“Para estabelecer essas correlações foram consultadas normas técnicas similares de outros países e considerada a base de dados e estudos realizados com materiais nacionais”, informa Battagin.

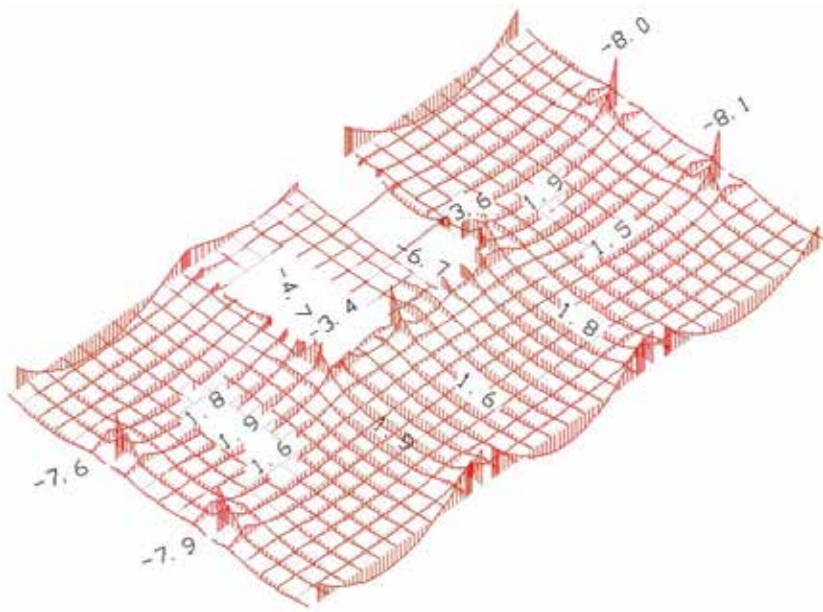


FIGURA 7
MOMENTOS FLETORES NO PISO DE UMA EDIFICAÇÃO

Mas, como o concreto é um compósito com grande variabilidade de suas características ao longo do tempo e anisotrópico, isto é, que reage diferentemente segundo o fenômeno ao qual é submetido, nem sempre as estimativas podem ser aplicadas a situações reais (Andrade; Possan, 2017).

Programa experimental que comparou o valor medido do módulo de deformação de concretos coletados em diversas obras nas cidades da Grande Campinas, Grande São Paulo e Baixada Santista, de junho de 1999 a fevereiro de 2003, com o valor estimado do módulo, indicou que os valores dos módulos de deformação dos concretos da Baixada Santista ficaram abaixo do recomendado pelo ABNT NBR 6118, de 2001, quando a norma ainda não continha os fatores de correção em função do tipo dos agregados (Massucato *et. al.*, 2003).

Na avaliação de Massucato, “devido à grande variedade de rochas encontradas no território brasileiro, o conhecimento de dados precisos sobre o concreto a ser utilizado é de fundamental importância para o cálculo das estruturas”.

Em estudo apresentado no 43º Congresso Brasileiro do Concreto, em 2001, Djanikian e Trindade já alertavam que,

com a revisão da norma ABNT NBR 6118, o módulo de elasticidade estimado do concreto com resistência característica à compressão de 18 MPa, de uso comum na época, passou a ficar abaixo de 30 GPa. “Tal fato tem ocasionado ocorrências de fissuras em alvenaria de enchimento em estruturas de concreto com idades de 1 a 2 anos e de fissuras ocorrendo cerca de 7 anos devido à deformação lenta do concreto” (Djanikian e Trindade, 2001).

Esses autores recomendaram em seu trabalho técnico-científico que construtoras e projetistas elevassem o valor de f_{ck} do concreto para 40 MPa, o que levaria o módulo de elasticidade para níveis de 30 GPa. O trabalho trouxe um estudo de caso que apontou que essa medida poderia representar economia de até 15% no custo do metro cúbico de concreto na estrutura, devido a novas concepções estruturais, com pilares mais espaçados e lajes mais espessas (Djanikian e Trindade, 2001).

Por sua vez, dados experimentais da EPUSP (1998) e da COPPE indicaram que a expressão da ABNT NBR 6118, de 2003, continuava com problemas: subavaliava o módulo de elasticidade tangente inicial para os concretos de menor resistência e

superestimava os módulos dos concretos ensaiados na COPPE (Shehata, 2005).

Novamente, os resultados do controle corriqueiro de módulo de deformação do concreto de obras reais nos anos de 2006 a 2008 indicaram que a resistência característica à compressão desses concretos girava em torno de 30 MPa, enquanto os valores de módulo apresentaram uma distribuição normal entre 16,5 GPa e 47,7 GPa. Com isso, a probabilidade de ocorrência de resultados inferiores ao valor especificado na ABNT NBR 6118:2007 (26,07 GPa) era de 20% (Borin *et al.*, 2010).

Segundo esses autores, a probabilidade de rejeição dos concretos com base no valor estimado de módulo foi de 9,33% na Grande São Paulo e de 41,5% no litoral de São Paulo.

A norma ABNT NBR 6118 de 2014 mudou novamente a fórmula para estimar o módulo e trouxe a possibilidade de sua correção por meio de coeficientes em função dos tipos de agregados.

Porém, estudo realizado por Bilesky *et al.* (2018) mostrou que o calcário comercial usado no programa experimental era, na realidade, um mármore e que o granito, devido à sua gênese, tinha fragilidade na sua microestrutura. Desse modo, os resultados de módulo de elasticidade “nos concretos estudados com agregado graúdo de calcário não foram nunca inferiores aos resultados de todos os ensaios realizados com agregado graúdo de granito, ao contrário das previsões dos modelos simplificados adotados pela ABNT NBR 6118 (2014)”. Os autores concluíram que os calculistas tenham sempre conhecimento prévio do potencial dos materiais disponíveis na região onde a obra será construída.

O Eng. Paulo Fernando, diretor da Concremat, vai além e generaliza que “os valores obtidos por meio da NBR 6118 vigente são superiores aos valores obtidos nos ensaios realizados pelos principais laboratórios acreditados pelo Inmetro”. Com ele concorda o diretor da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC), Eng. Álvaro Barbosa Júnior.

Paulo Fernando recomenda que se adote no curto prazo um fator de redução dos valores estimados de módulo de deformação do concreto de 10% a 15%, para se chegar a valores mais realistas.

“No longo prazo, é preciso ter uma equação mais realista”, defende.

Segundo Pacheco *et al.* (2014), por desconhecimento da natural e elevada variabilidade dos resultados do módulo de elasticidade, “tem havido discussões e desgastes desnecessários entre fornecedores, construtores e projetistas”.

Isto porque a dispersão de valores entre as estimativas e os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, se dentro de uma faixa aceitável, não compromete a segurança da estrutura nem sua estabilidade global, pois resultam em diferenças insignificantes de deformações, segundo Laranjeira e Quintela.

Essa constatação não afasta a necessidade de aperfeiçoamentos nas expressões que estimam o módulo de elasticidade nem na forma de contratação vigente no mercado da construção.

Segundo Álvaro Júnior, devem haver reuniões prévias ao orçamento da obra entre contratante, projetista e concreteiras para se ter soluções técnicas e operacionais. “Todos os projetos devem exigir ensaios, pois há a necessidade de entender a realidade dos agregados em todas as regiões do país”, argumenta.

Em certas situações, os ensaios podem ser dispensados, pois as concreteiras têm conhecimento dos módulos de elasticidade

de do concreto nas regiões onde atuam. “Os projetistas devem consultar as concreteiras antes de especificar o módulo de elasticidade”, recomenda.

O ponto aqui é que a negociação para aquisição do concreto não seja iniciada após o projeto estar pronto. Quanto antes o estudo do traço e do agregado for feito, melhor! Assim, essas informações podem ser incorporadas nas fases iniciais do projeto.

Quando uma construtora encontra um módulo de elasticidade do concreto menor do que o estimado segundo a ABNT NBR 6118:2014, ela pode tomar quatro medidas: aumentar a resistência característica à compressão, substituir parte dos agregados graúdos por rochas mais rígidas, refazer o ensaio de módulo de elasticidade aos 90 dias ou não fazer nada.

As duas primeiras medidas podem aumentar o custo do concreto. A depender do projeto estrutural, o concreto de maior classe de resistência eleva o custo por não diminuir o volume. Já, a troca do agregado pode demandar maior valor de frete e impactar negativamente o ambiente com mais emissões de carbono.

A construtora pode ainda consultar o projetista para que ele avalie a necessidade de alguma ação corretiva quando o módulo não é atingido, “à semelhança do que é feito com a não conformidade

do concreto”, complementa Fortes.

Quanto à mudança na fórmula da ABNT NBR 6118 para estimar o módulo de deformação, antes é preciso um grande esforço do setor para ampliar e consolidar os dados empíricos de módulo de elasticidade para concretos de diferentes regiões do país, para que o modelo matemático reflita a realidade dos agregados regionalmente.

Na avaliação da vice-presidente da Associação Brasileira das Empresas de Tecnologia da Construção Civil (ABRATEC), Eng^a. Paula Baillot, “a revisão das equações para estimar o módulo de elasticidade deve ser baseada em dados mais recentes e levar em consideração os novos materiais e técnicas disponíveis atualmente”. Segundo ela, no laboratório central da Alphageos, uma das associadas da ABRATEC, os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, tanto tangente como secante, estão em sua maioria em conformidade com as especificações de projeto.

“Certamente, a partir de mais ensaios, pode-se ter uma base de dados maior e talvez encontrar equações que gerem valores mais próximos da realidade”, concorda Battagin, para adicionar que “o desenvolvimento das normas técnicas é um processo estabelecido por consenso e aberto a todos os interessados em território nacional”. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E. “Propriedades físicas e mecânicas dos materiais”. ISAIA, G. C. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: IBRACON, 2017.
- [2] BILESKY, P.; HELENE, P.; SBRIGHI NETO, C.; CASTRO, A. L. de. “Influência da natureza petrográfica do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto”. Foz do Iguaçu: IBRACON, 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018
- [3] BORIN, L. A.; BAUER, R. J. F.; FONSECA, L. P. T.; DE MARCHI, R. D.; SILVA, R. M. da; FIGUEIREDO, A. D. de. “Risco de rejeição de concretos devido à não conformidade com os parâmetros normalizados para o módulo de elasticidade”. Fortaleza: IBRACON, 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010.
- [4] CUPERTINO, M. A. L.; INÁCIO, J. J.; PEREIRA, A. de C.; ANDRADE, M. A. S. de; BATTAGIN, I. L. da S. “Análise da influência das alterações da norma ABNT NBR 8522:2008 no resultado do módulo estático de elasticidade”. Curitiba: IBRACON, 51º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009
- [5] DJANIKIAN, J. G.; TRINDADE, O. A. “Medida do módulo de elasticidade do concreto *in situ*”. Foz do Iguaçu: IBRACON, 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2001
- [6] MASSUCATO, C. J.; BASSANI, Fabrício; PAULON, V. A. “Contribuição experimental sobre o módulo de elasticidade secante para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço. Vitória: IBRACON, 45º Congresso Brasileiro do Concreto
- [7] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2ª edição, 2014.
- [8] PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. “Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto”. Natal: IBRACON, 56º Congresso Brasileiro do Concreto, 2014
- [9] RODRIGUES, G. S. S.; FIGUEIREDO, E. P. “Estudo dos fatores influentes sobre os resultados de módulo de deformação estático do concreto”. Olinda: IBRACON, 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005
- [10] SHEHATA, L. D. “Deformações Instantâneas do Concreto”. ISAIA, G. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005
- [11] VASCONCELOS, A.; GIAMUSSO, S. “O misterioso módulo de elasticidade”. Rio de Janeiro: IBRACON, 40º Congresso Brasileiro do Concreto, 1998.