

## RISCO DE REJEIÇÃO DE CONCRETOS DEVIDO À NÃO CONFORMIDADE COM OS PARÂMETROS NORMALIZADOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE

Risk of rejection of concrete due to the nonconformity to standard parameters related to elastic modulus

Luís Alberto Borin(1); Roberto José Falcão Bauer(2); Antonio Domingues de Figueiredo(3)

(1) Eng.º Civil – L.A. Falcão Bauer; (2) Eng.º Civil, Diretor Técnico da L.A. Falcão Bauer; (3) Eng.º Civil, Prof. Dr. da Escola Politécnica da USP

### RESUMO

O valor do módulo de elasticidade do concreto está relacionado ao comportamento mecânico do material em termos de sua rigidez. Esta propriedade é normalmente especificada por projetistas que utilizam de equações empíricas propostas em norma. No entanto, nem sempre estes valores estimados são confirmados pelo controle de campo, o que gera uma situação problemática nas obras. Uma das razões é o fato de engenheiros tomarem o parâmetro estimado como um valor absoluto. O mesmo deve ser considerado como uma variável aleatória, como acontece para a resistência à compressão. Por esta razão, foi feito um levantamento dos valores de módulo de elasticidade determinados no controle corriqueiro de obras na região da Grande São Paulo e litoral sul do estado. Escolheu-se a classe de resistência característica de 30 MPa como referência na análise comparativa que foi realizada entre os resultados experimentais e os valores previstos pela norma NBR 6118. Conclui-se que a probabilidade de rejeição do concreto por não atender ao requisito de norma não é baixa e é ainda maior na região do litoral paulista do que na região da capital. Além disso, há uma tendência clara de aumento da resistência do concreto nos últimos anos, de modo a se minimizar o risco de rejeição do material. Estes fatos devem então ser levados em consideração no momento da especificação do material

como também no controle de campo.

Palavras Chaves: Módulo de elasticidade, resistência à compressão, probabilidade de rejeição

### ABSTRACT

The value of the elastic modulus of concrete is related to the mechanical behavior of the material in terms of its rigidity. This property is typically specified by designers using empirical equations proposed in the Standards. However, neither these estimated values are always confirmed by field control, which creates a problematic situation at the job sites. One reason for that is the fact that some engineers take the estimated parameter as an absolute value. This parameter should be considered as a random variable, as it happens for the compressive strength. For this reason, an investigation was made focusing the values of elastic modulus determined during the ordinary control of work in the metropolitan region of São Paulo and the southern coast of the state. The class of characteristic strength chosen for the analysis was 30 MPa. A comparative analysis between the experimental and the predicted values by ABNT NBR 6118 was made. This analysis shows that the probability of rejection of concrete for not meeting the standard requirement is considerable, and is even greater in the region on the coast than in the capital region. Moreover, there is a clear tendency of increase the average concrete strength in recent years in order to minimize the risk of material's rejection. These facts must be taken into consideration when specifying the material as well as in field control.

**Key words:** Elastic modulus, compressive strength, risk or rejection

## INTRODUÇÃO

Ao contrário do que ocorre com o aço, o concreto não apresenta um comportamento elástico claro para os menores níveis de tensão sendo seguido por um comportamento plástico ou não-elástico. Na verdade, para o concreto não existe uma fronteira clara para os dois tipos diferentes de comportamento sob aplicação de tensões, como ocorre para o aço. Pode-se até afirmar que o comportamento elástico puro não existe para o concreto, como ocorre para o aço. A parametrização do comportamento elástico dos materiais se dá pela medida de seu módulo de elasticidade, o que na verdade é uma medida da rigidez do material. Ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade do material, tanto maior será a sua rigidez. Assim, o módulo de elasticidade do aço é fixo, pois depende da energia de ligação do ferro metálico (Callister, 2007), sendo que seu valor gira em torno dos 210 GPa, independentemente da resistência do aço. Já para o concreto, que possui um comportamento atípico em relação ao aço, não apresentando comportamento elástico puro, tem o valor de seu módulo de elasticidade dependente do nível de tensão aplicado ao material, bem como da resistência do mesmo. Por isso, é comum a utilização do termo módulo de deformação ao invés de módulo de elasticidade para o concreto como ocorre, inclusive, nas normas brasileiras (ABNT NBR 8522, 2008).

Esta resposta não perfeitamente linear do concreto aos incrementos de tensão pode ser explicada por acomodações internas de sua complexa micro-estrutura. O fato é que com o acréscimo de tensões, surgem danos internos que são tão mais intensos quanto maior for o nível de tensão aplicada. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o nível de dano é maior para maiores tensões o que reduz a rigidez do material progressivamente. Ou seja, quanto maior o nível de tensão aplicado ao concreto, maiores os danos como o aumento das micro-fissuras, e menor será o seu módulo de deformação. Este comportamento não linear do concreto pode ser visualizado pelo gráfico apresentado na Figura 1. Nesta Figura 1 podem ser distinguidos os seguintes estágios:

- Estágio 1 – É a região em que o concreto apresenta comportamento mais próximo do elástico

perfeito sendo que as micro-fissuras existentes entre os agregados e a zona de transição permanecem inalteradas.

- Estágio 2 – Com o aumento do nível de tensão há, naturalmente, um aumento da fissuração que ocorrerá prioritariamente na zona de transição devido à sua maior fragilidade, no entanto, esta fissuração pode ser considerada como desprezível.

- Estágio 3 – Neste estágio as micro-fissuras começam se propagar com maior intensidade e surgem fissuras na matriz reduzindo a rigidez do material.

- Estágio 4 – Neste estágio final, ocorre uma maior propagação das fissuras, o que ocorreria de forma espontânea mesmo sob tensão mantida, ou seja, o concreto viria à ruptura sem acréscimo de tensão, apenas com o passar do tempo. Neste estágio o material acaba desenvolvendo deformações e danos muito grandes que levam o material ao colapso.

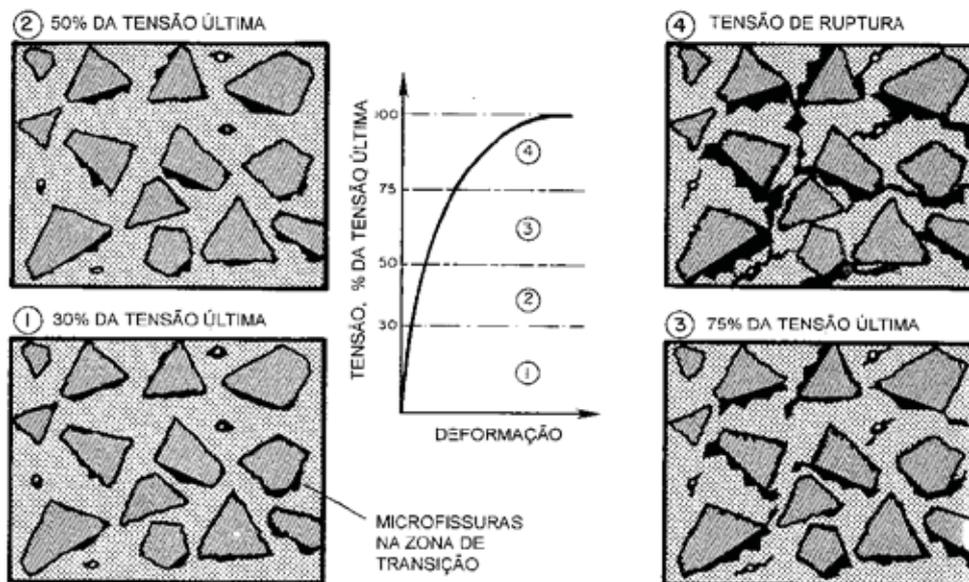


Figura 1 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial. (MEHTA, MONTEIRO, 2008)

Como foi bem apresentado por Montija (2007), a determinação do módulo estático de deformação do concreto ocorre através da realização de um ensaio que permita a construção de uma curva 'tensão VS deformação específica' com um mínimo de dois pontos. A relação obtida entre as diferenças de tensão e correspondentes diferenças de deformação compreendidas entre esses dois pontos fornece o módulo de deformação, conforme mostrado na Figura 2. Geralmente, a escolha dos pontos é orientada para a seleção de um ponto fixo de baixa tensão ( $\sigma_a$ ), em geral 0,5 MPa, que garanta uma deformação mínima de compressão no concreto, e uma tensão próxima de seu limite elástico ( $\sigma_b$ ), que normalmente adotada entre 30% e 50% da resistência do material pelo fato de não ultrapassar o estágio 2 comentado anteriormente.

Este conceito foi levado às normas brasileiras, que adotaram limites específicos para a determinação do módulo de deformação do concreto (ABNT NBR 8522, 2008). Com isto, surgiram termos específicos para cada faixa de tensão associada à determinação do módulo de deformação. Na Figura 3 procura-se apresentar os diferentes tipos de módulo estático de

deformação do concreto que podem ser determinados no ensaio de carregamento uniaxial. O primeiro deles é denominado como módulo tangente inicial, o qual é dado pela declividade da reta tangente à curva tensão VS deformação a partir da origem. Já o segundo é denominado como módulo tangente, pois viria a unir dois pontos (A e C) da curva tensão VS deformação, considerando o acréscimo de deformação obtido para maiores níveis de tensão. O valor deste módulo de deformação corresponderia a um valor obtido para o um módulo obtido a partir da tangente que toca a curva tensão VS deformação em um nível de tensão correspondente ao ponto A na Figura 3. Na verdade, como os procedimentos experimentais previstos na norma sempre partem de uma tensão mínima de 0,5 MPa, o que acaba por variar é o nível de tensão máximo na prática. Assim, os módulos de deformação tangente e secantes são, de fato, módulos de deformação secantes associados a um nível de tensão mais baixo e outro maior, respectivamente. Segundo a norma ABNT NBR 8522 (2008), o módulo estático de deformação secante é calculado pela seguinte expressão:

Onde:

$E_{sec,n}$  = módulo de deformação secante correspondente

$$E_{sec,n} = \frac{I_n - I_{nt}}{\epsilon_n - \epsilon_0}$$

à inclinação da reta unindo os pontos do diagrama tensão x deformação relativos às tensões  $\tau_{inf} = 0,5$  MPa e  $\tau_n$ .

$\tau_n$  = tensão considerada para o cálculo do módulo secante.

$\epsilon_n$  = deformação específica correspondente à tensão  $\tau_n$ ;  $n=0,1, 0,7$  ou  $0,8$

$\epsilon_o$  = deformação específica correspondente à leitura  $L_0$ .

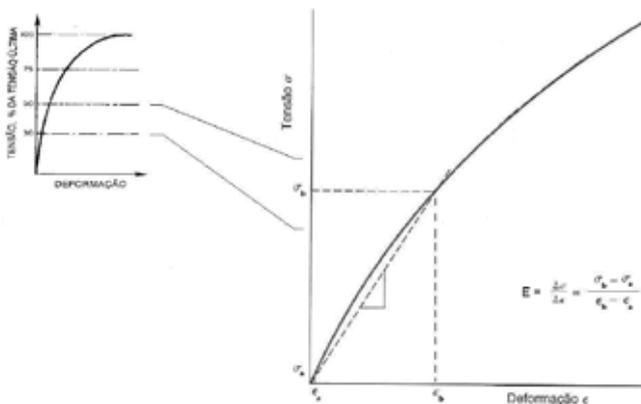


Figura 2 - Curva tensão-deformação específica para a obtenção do módulo de deformação (MONTIJA, 2007)

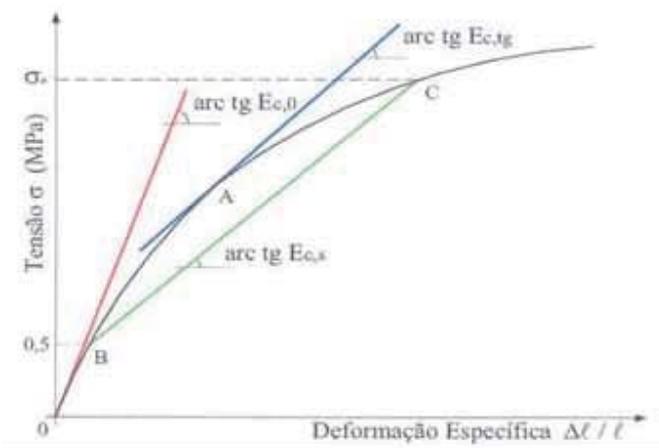


Figura 3 - Representação esquemática dos módulos de elasticidade: tangente ( $E_c$ ).  $T_j$ , tangente inicial ( $E_c, o$ ) e secante ( $E_c, s$ ). Fonte: Adaptada da NBR 8522: 2008

## MODELOS DE PREVISÃO

Existem vários modelos matemáticos que servem como estimadores do módulo de deformação do concreto. Ou seja, são equações matemáticas obtidas a partir de regressões, associando o módulo de deformação ou módulo de elasticidade a outros parâmetros de controle do concreto. Como estas regressões são obtidas, normalmente, por dados experimentais de controle, deduz-se que são modelos empíricos que dependem fortemente da condição tecnológica dos concretos amostrados para a produção da regressão. A maioria dos modelos de previsão do módulo de deformação é baseada na resistência à compressão, como se pode observar pelo apresentado na Tabela 1. No entanto, vários são os parâmetros a afetarem o módulo de elasticidade além da resistência à compressão. Um exemplo disso é o módulo de elasticidade do agregado. Como o agregado graúdo preenche uma grande parte do volume do concreto endurecido, é natural esperar que agregados mais rígidos vão enrijecer o compósito concreto ou, em outras palavras, aumentar o seu módulo de deformação. Como para os concretos plásticos convencionais a ruptura acontece pela pasta ou pela zona de transição pasta/agregado (Mehta e Monteiro, 2008), pode-se ter concretos de mesma constituição de pasta, com mesma relação água/cimento e, conseqüentemente, valores de resistência à compressão muito próximos. No entanto, estes concretos podem ter sido produzidos a partir de agregados distintos, como calcários e granitos, e terem valores de módulo de deformação bem distintos. Ou seja, a parametrização exclusiva pela resistência, como ocorre com a norma brasileira, é uma alternativa empírica e simplista de parametrização do material. Algumas sugestões já foram feitas no sentido de se diminuir o caráter simplista destes modelos, como a incorporação de fatores de correção que levem em conta a influência da origem dos agregados, conforme está apresentado na Tabela 2. No entanto, estas sugestões ainda não foram implementadas na normalização nacional até o momento.

Tabela 1 – Modelos de previsão do módulo de elasticidade

NORMA	MODELOS DE PREVISÃO
NB 1 da ABNT de 1978	$E_{cl} = 6600 \cdot f_c^{0,5}$ em MPa, sendo $f_c = f_{ck} + 3,5$ MPa
Proposto para NB 1 da ABNT de 1997	$E_c = 4700 \cdot f_{ck}^{0,5}$ em MPa, sendo $E_c = 0,9 \cdot E_{cl}$
ACI 318 de 1995	$E_c = 4733 \cdot f_{ck}^{0,5}$ em MPa,
CEB / FIP Model Code 90 de 1993	$E_{cl} = \alpha_1 \cdot 21500 \cdot [(f_{ck} + 8)/10]^{1/3}$
Helene 1998 proposto para ABNT	$E_{cl} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot 21500 \cdot [(f_{ck} + 8)/10]^{1/3}$
Proposto para NB 1 da ABNT de 2000	$E_{cl} = 5,6 \cdot (f_c)^{1/2}$ em GPa.
ABNT NBR 6118 (2003)	$E_c = 4,8 \cdot (f_c)^{1/2}$ em GPa.

\*onde  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  podem ser obtidos pela Tabela 2

Tabela 2 – Proposta de índices de correção do módulo básico.

NATUREZA DO AGREGADO GRAÚDO	$\alpha_1$	CONSISTÊNCIA DO CONCRETO FRESCO	$\alpha_2$
Basalto e diabásio	1,1	Fluida	0,9
Granito e gnaiss	1,0	Plástica	1,0
Calcário, arenito e metasedimento	0,9	Seca	1,1

Nota-se que os modelos expostos não têm capacidade para determinar com precisão o valor do módulo de elasticidade do concreto e nem mesmo têm esta função. Na verdade, como foi dito, são modelos de previsão e, por isso, devem ser utilizados como previsões de comportamento da estrutura quando não se tem dados precisos do valor do módulo já pré-determinado em estudo experimental específico. Ou seja, quando não se sabe a origem do concreto, pode-se estimar o módulo de elasticidade a partir destas equações. Por outro lado, quando o fornecedor do concreto da obra é conhecido, devem-se utilizar os dados experimentais de controle disponíveis. Sendo assim, é ideal um estudo preliminar do concreto em laboratório para a determinação precisa do módulo.

No caso de não se dispor de dados experimentais e não se conhecer o fornecedor, a utilização dos estimadores deve ser feita com o devido cuidado. Ou seja, deve estar claro para o usuário do estimador que há um erro embutido neste processo de estimativa e o concreto pode apresentar valores distintos do previsto. Deve-se chamar a atenção para o fato destas equações tomarem como valor de entrada um parâmetro, a

resistência característica do concreto, que sabidamente possui uma distribuição de probabilidades, ou seja, é um parâmetro estatístico. No entanto, é freqüente tomar o módulo de elasticidade como um parâmetro determinístico, como ocorre no controle corriqueiro das obras. Em outras palavras, para controlar a resistência característica do concreto deve-se retirar uma amostra, que é caracterizada por média e desvio padrão, e utilizar um estimador que defina o valor de resistência em que apenas 5% dos casos estarão abaixo do mesmo. Já o módulo que é estimado a partir desta variável estatística é tomado como valor absoluto, pois são feitas poucas determinações e não se controla a distribuição da mesma (média e desvio padrão). Como existe o hábito de especificar o valor mínimo de módulo de elasticidade a partir destes estimadores, ocorrem frequentemente os casos de rejeição do concreto pelo fato dele apresentar valores inferiores aos estimados. Isto tem estimulado pesquisas no tema, como as desenvolvidas por Nunes (2005) e Pacheco (2006) e este trabalho procura agregar mais uma contribuição neste sentido. Para tornar mais clara esta situação, foi desenvolvido um estudo baseado na análise de resultados experimentais

---

de controle de obra onde se procura determinar qual é o risco de rejeição do concreto quando da utilização destes estimadores na região da grande São Paulo e litoral sul do estado.

## ROTINA DE PRODUÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados nesta análise foram obtidos a partir do controle corriqueiro do módulo de deformação de obras reais de diversos tipos, onde se incluem edificações, obras de infraestrutura, saneamento básico e outras cuja resistência característica ( $f_{ck}$ ) era de 30 MPa. Foram analisados resultados de módulo de deformação secante, determinados conforme a norma ABNT NBR 8522 (2008), obtidos nos anos de 2006 a 2008. Os concretos considerados nesta análise são provenientes da região da Grande São Paulo e litoral sul do estado, correspondendo aos municípios de Santos, Guarujá e Bertioga. O único parâmetro correlacionável com o módulo de deformação que foi considerado neste estudo foi a resistência característica especificada para o concreto, dado que o modelo de previsão adotado pela norma ABNT NBR 6118 (2007) adota apenas este parâmetro como referência. No entanto, foram analisadas outras variáveis intervenientes, como o abatimento especificado, a região de produção do concreto e também o ano de produção do mesmo.

Os corpos-de-prova foram moldados conforme ABNT NBR 5738 (2008) na própria obra e transportados para o laboratório onde, após 48 (quarenta e oito) horas desde a moldagem dos mesmos, houve a sua desmoldagem e identificação gerando um número de relatório. Após a identificação, os corpos-de-prova foram encaminhados para câmara úmida com temperatura de  $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade superior a 95%, onde permaneceram até a data do ensaio.

Anteriormente à realização do ensaio de determinação do módulo de deformação secante, os corpos-de-prova foram capeados segundo a norma ABNT NBR 5738 (2008). A descrição mais detalhada da realização do ensaio de determinação do módulo de deformação do concreto se encontra apresentada no próximo item.

Os ensaios de módulo de deformação geraram relatórios

de ensaios onde constam todas as informações do concreto analisado como, peça concretada, resistência característica, abatimento, tipo de cimento, tipo de brita, horário de carregamento do concreto, horário de descarga e idade de ensaio.

Para seleção dos relatórios foram considerados resultados que atendem aos requisitos especificados na norma ABNT NBR 8522 (2008), e também respeitados os seguintes critérios:

- Foram utilizados os resultados que possuíam a série completa de cinco corpos-de-prova, dos quais dois são destinados ao ensaio de determinação da resistência à compressão de referência ( $f_c$ ) a ser utilizada para a determinação do módulo de deformação e outros três corpos-de-prova destinados à determinação do módulo de deformação secante ( $E_{sec}$ ) propriamente dito e
- Foram descartados os resultados de determinação do módulo de deformação cujo valor de resistência efetiva ( $f_{cef}$ ) – determinada ao final do ensaio de módulo de deformação – apresentou variação superior a 20% em torno da média.

## ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para a realização do ensaio de determinação do módulo estático de deformação são necessários cinco corpos-de-prova cilíndricos que atendam às condições de relação altura/diâmetro maior ou igual a dois e diâmetro maior que quatro vezes o tamanho máximo do agregado graúdo. Dois destes corpos-de-prova são utilizados para a determinação da resistência à compressão, de acordo com o procedimento estabelecido pela norma ABNT NBR 5739 (2007). Uma vez que a determinação do módulo de deformação do concreto utiliza como referência a resistência variável da própria amostra, faz-se necessária a determinação deste valor para determinar o nível de carregamento a ser aplicado no ensaio de módulo. No entanto, é freqüente haver variação também entre estas determinações, ou seja, o corpo-de-prova ensaiado para a determinação da resistência pode apresentar valores maiores ou menores

do que o obtido para o corpo-de-prova utilizado no ensaio de módulo. Assim, se o corpo-de-prova ensaiado para a determinação do módulo for menos resistente que o de referência ensaiado anteriormente, haverá um carregamento maior que os 30% teóricos e, com isto, o resultado do módulo será subestimado. Por outro lado, este resultado poderá ser superestimado na situação inversa.

Os corpos-de-prova devem ser centralizados nos pratos da prensa e os medidores de deformação devem ser fixados de forma que os pontos de medição fiquem equidistantes dos extremos do corpo-de-prova. A base de medida das deformações deve ser no mínimo igual a 2/3 do diâmetro do corpo-de-prova e no máximo igual a esse diâmetro.

Uma vez ajustado o corpo-de-prova à máquina de ensaio, deve-se aplicar um carregamento crescente à velocidade de (0,45  $\square$  0,15) MPa/s, efetuando-se pausas de 60 segundos às tensões seguintes, após as quais devem-se obter as correspondentes leituras médias de deformações em tempos máximos de 60 segundos, conforme a seguinte seqüência:

- a) Leitura L0 , à tensão  $\square$ A = 0,5 MPa;
- b) Leitura L2 , à tensão de 0,2 fc;
- c) Leitura L3 , à tensão de 0,3 fc;
- d) Leitura L4 , à tensão de 0,4 fc;
- e) Leitura L5 , à tensão de 0,5 fc;
- f) Leitura L6 , à tensão de 0,6 fc;
- g) Leitura L7 , à tensão de 0,7 fc;
- h) Leitura L8 , à tensão de 0,8 fc;
- i) Leituras LN , a tensões iguais a (N/10) fc, até que se produza a ruptura do corpo-de-prova, anotando-se então a tensão de ruptura efetiva do mesmo (fcef).

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Variabilidade do módulo de deformação secante

O histograma que está apresentado na Figura 4 apresenta a distribuição de freqüências encontrada em relação os valores obtidos para o módulo de deformação secante, que apresentou os valores de 16,5 GPa a 47,7 GPa, como mínimo e máximo respectivamente. O valor obtido para o desvio-padrão foi de 4,25 GPa, variação esta que é devida a uma série de fatores ligados à produção e ao próprio controle do material, ou seja, o valor do módulo de deformação, tal qual o valor da resistência característica, possui uma distribuição normal, facilmente visualizada pelo histograma da Figura 4 e não é uma variável determinística. Ou seja, quando se especifica um valor de módulo de deformação a partir do modelo previsto pela norma ABNT NBR 6118 (2007) há uma probabilidade de o mesmo não ser atendido, da mesma forma como ocorre para a resistência característica, onde esta probabilidade é fixada em 5%. Ao utilizar-se o modelo de previsão proposto por esta norma (Tabela 1) obtém-se o valor de módulo estático de deformação secante de 26,07 GPa, correspondente a um valor de resistência característica de 30 MPa como é o caso de todos os concretos considerados nesta distribuição. A partir da análise do histograma é então possível verificar qual é a probabilidade de um valor de módulo estático de deformação secante estar abaixo do previsto pela norma. Assim, isto foi determinado (LAPPONI, 2005) e a probabilidade de ocorrência de resultados inferiores ao valor de 26,07 GPa especificado pela ABNT NBR 6118 (2007) é de 20%, ou seja, caso não se realize ensaio de módulo de elasticidade em laboratório e considere-se como premissa para especificação de projeto o valor especificado pela norma, há 20% de probabilidade de o concreto da estrutura se apresentar menos rígido do que o previsto. Vale ressaltar que estas constatações são válidas para o universo amostral analisado, ou seja, que compreende a região da Grande São Paulo e litoral sul do estado, para resistências características de 30 MPa e para concretos produzidos nos anos de 2006 a 2008.

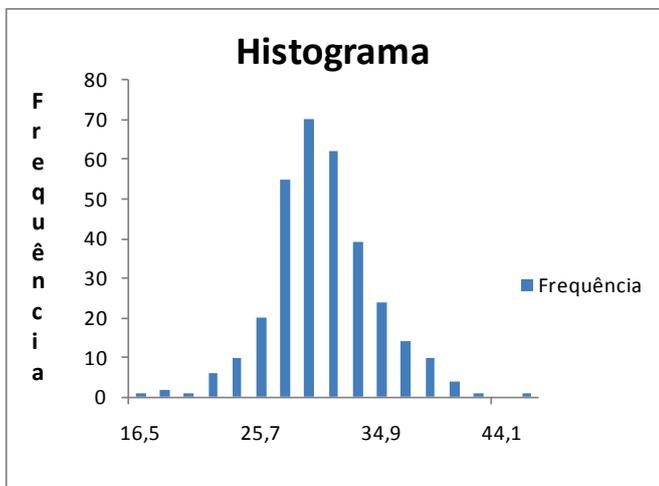


Figura 4 – Histograma de distribuição de probabilidade de ocorrência dos valores de módulo de deformação

## RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E A RESISTÊNCIA MÉDIA

A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que a variação, tanto de resistência quanto de módulo de deformação foi muito elevada. Os valores máximos e mínimos obtidos para a resistência foram, respectivamente 19,0 MPa e 53,3 MPa. Apesar disso, tentou-se verificar se havia uma correlação, ou linha de tendência geral para a correlação, entre resistência e módulo de deformação. Assim, foi produzido o gráfico apresentado na Figura 5, onde se percebe uma ligeira tendência de elevação do módulo com o aumento da resistência, conforme se esperava. A tendência apresenta baixo nível de correlação devido à elevada variabilidade da amostragem. No entanto, pode-se então prever que, a medida que aumenta a resistência, há uma diminuição da probabilidade de rejeição do concreto com relação ao módulo de deformação especificado segundo os critérios de norma. Esta tendência é percebida pelo mercado, o que faz com que algumas usinas tendam a aumentar a faixa de resistência de trabalho do concreto com o objetivo do mesmo atender aos requisitos especificados por norma para o módulo de deformação. Esta tendência fica mais clara quando

se analisa a evolução do módulo em função do ano de fabricação, conforme se pode observar no item 3.5.

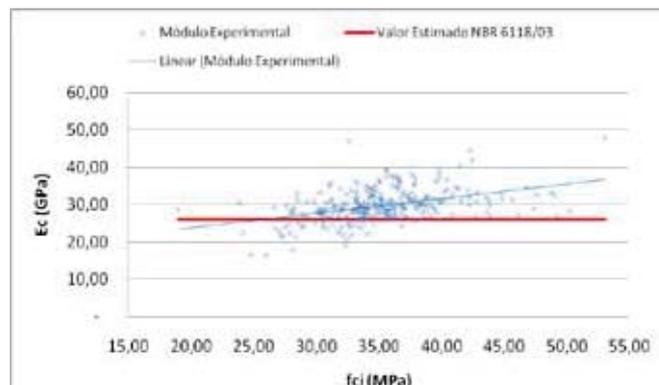


Figura 5 – Correlação entre o módulo de deformação e a resistência média do concreto.

## RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E O ABATIMENTO ESPECIFICADO PARA O CONCRETO

A Tabela 3 mostra os valores máximos, médios e mínimos obtidos para o módulo de deformação do concreto em função do abatimento especificado para o concreto da obra. Com o objetivo de melhor analisar a interferência do abatimento nos resultados de módulo de deformação foi produzido o gráfico da Figura 6. Observa-se claramente que o valor médio do módulo de deformação permanece praticamente inalterado em relação ao abatimento especificado no concreto. O que é alterado de maneira substancial são os limites de variação desta propriedade. Ou seja, para uma média constante, há fortes variações da dispersão do resultado. Isto pode ser explicado em boa medida pelo fato de a maior dispersão ocorrer para os níveis de abatimento mais usualmente especificados, ou seja, acima de 90 mm. Assim, há uma maior quantidade de dados para esta faixa de abatimento, o que acaba por incorporar outras variáveis importantes de maneira mais intensa, como é o caso dos agregados e da região de produção do concreto, conforme está detalhado nos próximos itens. No entanto, chama a atenção a simetria dos resultados e o fato da probabilidade de haver maior

rejeição do concreto para abatimentos maiores em função da maior variabilidade.

Tabela 3 – Módulo de deformação em função do abatimento

	Abatimento (mm)				
	60	80	90	100	120
Mínimo	27,57	24,33	16,53	16,50	20,70
Máximo	36,77	40,37	47,00	47,77	41,77
Média	32,17	32,35	31,77	32,13	31,23

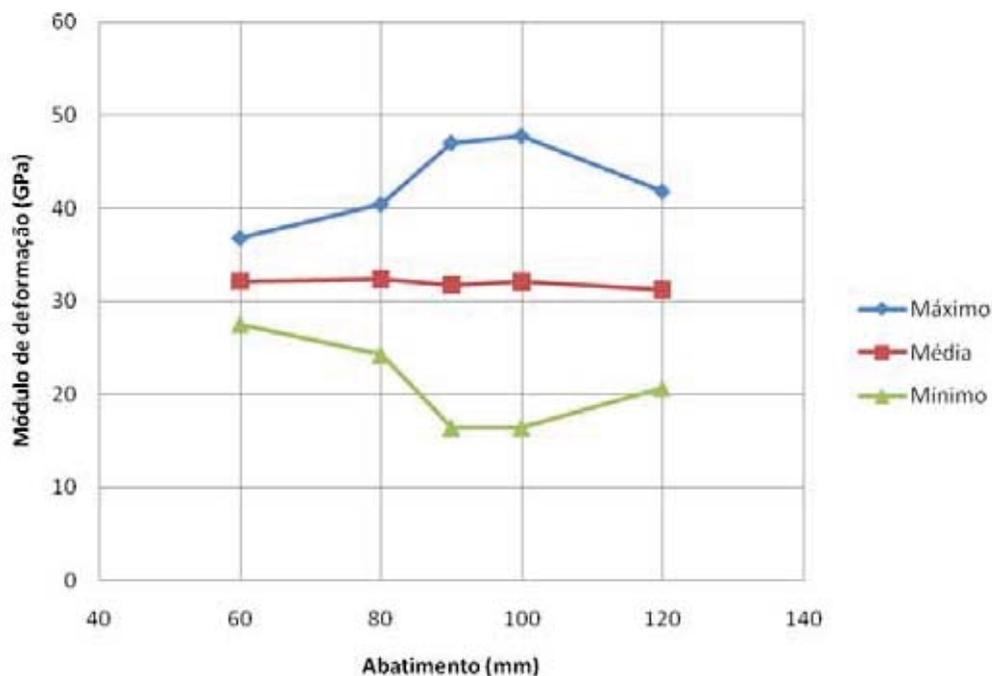


Figura 6 – Correlação entre o módulo de deformação e o abatimento especificado para o concreto.

## RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E A REGIÃO DA OBRA

Inicialmente foram isolados os resultados obtidos na região da Grande São Paulo. Estes resultados apresentaram uma grande dispersão, com valores mínimo de 19,03 GPa, máximo de 47,0 GPa e desvio padrão 4,03 GPa. Para melhor visualização, estes resultados foram distribuídos num gráfico correlacionando com a resistência média, como pode ser visto na Figura 7. A partir da distribuição destes resultados também foi possível determinar a probabilidade de os valores

obtidos nas obras serem inferiores ao estimado pela norma ABNT NBR 6118 (2007), o que resultou em 13,10%. No entanto, observa-se nitidamente que a probabilidade de rejeição é maior quando os valores de resistência são mais baixos. De qualquer forma, apesar da grande variabilidade, a maior parte dos resultados se situa acima do limite especificado por norma.

Da mesma forma que os resultados obtidos para a Grande São Paulo, foram também analisados os resultados relativos à região do litoral sul do estado. Observa-se, como era esperado, uma grande dispersão de resultados, com valores variando de 16,53 GPa a 35,7 GPa, em termos de mínimos e máximos. O desvio padrão obtido foi de 3,92 GPa e, para melhor visualização do problema, foi produzido o gráfico constante da Figura

8. Comparando-se com os resultados apresentados na Figura 7 para a Grande São Paulo, percebe-se claramente que há uma quantidade muito maior de resultados abaixo do valor especificado por norma. Assim, a probabilidade desta região do estado de São Paulo apresentar resultados inferiores ao estimado pela norma ABNT NBR 6118 (2007) é de 41,5%, ou seja, muito maior que a região metropolitana. Isto está, muito provavelmente, associado aos agregados distintos que são utilizados nessas regiões, o que faz com que o concreto do litoral paulista seja bem mais flexível do que o produzido na região próxima à capital.

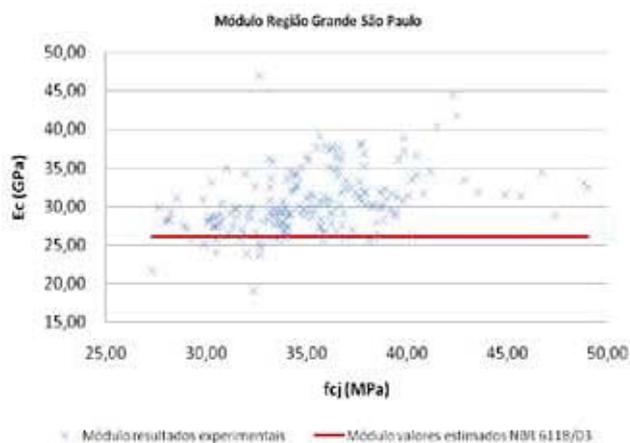


Figura 7 – Correlação entre o módulo de deformação e a resistência média para a região da Grande São Paulo.

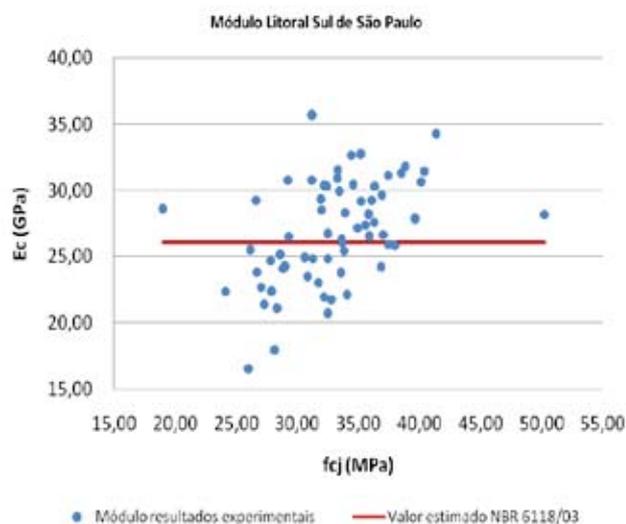


Figura 8 – Correlação entre o módulo de deformação e a resistência média para a região do litoral sul do estado de São Paulo

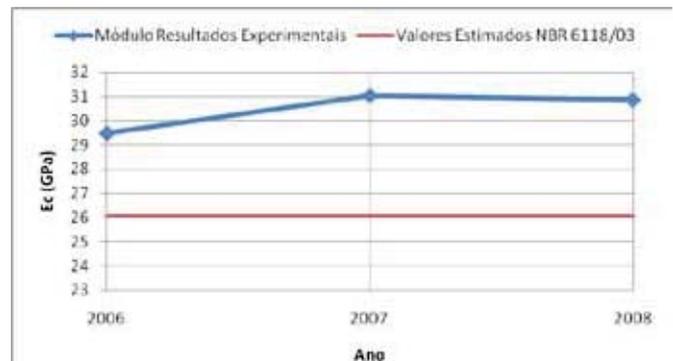


Figura 9 – Evolução do valor médio do módulo de deformação com o ano de produção do concreto.

## CONCLUSÕES

O aspecto mais importante a ser posto em relevo neste trabalho é o fato de que o valor do módulo de deformação do concreto não é uma grandeza determinística, mas sim probabilística. Assim, existe sempre uma probabilidade de o concreto não atender ao valor especificado em projeto, quando se utiliza o modelo empírico que é proposto pela normalização brasileira (ABNT NBR 6118, 2007). Assim, pelos resultados obtidos, verificou-se que uma norma de abrangência nacional pode dar margem a distorções localizadas, como o fato de haver maior probabilidade de rejeição do concreto quando este é produzido na região litorânea do estado de São Paulo, quando se compara com os resultados obtidos na região da Grande São Paulo. Outros fatores analisados, como a própria resistência média do concreto, mostraram o que já era conhecido, ou seja, que a probabilidade de rejeição é menor quando se aumenta a resistência do material, como o próprio modelo da norma prevê. Com isto, percebe-se uma tendência natural do mercado de elevar a resistência média do concreto com o objetivo de se atender ao especificado para o módulo de deformação.

Com estes fatos em mente, conclui-se que há a necessidade de estabelecimento de tolerâncias para

a especificação do módulo de deformação, dado que é uma variável com distribuição de probabilidade de rejeição. No entanto, a amostra analisada é sempre muito pequena em relação à utilizada para se julgar o valor da resistência característica que já embute a verificação de sua variabilidade em seus estimadores previstos em norma. Não se pode atribuir ao valor de módulo secante a característica de uma variável determinística, dado que é função da resistência que é uma variável probabilística.

Desta forma, no futuro devem ser discutidas as possibilidades de mudança de enfoque no controle do módulo, como o controle por valor característico, conforme ocorre para a resistência. Neste caso, não se deve manter o estimador atual da norma e sim obter outro que atribua valores inferiores ao módulo de deformação de modo que a probabilidade de rejeição seja aceitável. Também se pode determinar uma faixa de variação aceitável do valor em torno da média. Pode-se dizer que esta é uma alternativa mais interessante, dado que a responsabilidade estrutural do parâmetro módulo de deformação é menor do que o da resistência à compressão. De qualquer forma, é importante que se valorize o controle corriqueiro do módulo de deformação com a execução de ensaios em laboratórios credenciados, pois isto irá fornecer importantes subsídios para um maior controle de engenharia das estruturas de concreto.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova – NBR 5738. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_ – ABNT. Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto – NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_ – ABNT. Projeto e execução de obras de concreto armado – NBR 6118. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_ – ABNT. Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

CALLISTER, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 2007.

LAPPONI, J. C. Estatística Usando Excel Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. IBRACON, 3a Edição. São Paulo, 2008.

MONTIJA, F. C. Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2007.

NUNES, F.W.G. Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

PACHECO, R. F. R. Análise do Módulo de Elasticidade e Resistência à Compressão de concretos produzidos em centrais na grande Vitória. Experimentos e estatística. 2006. 331 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Espírito Santo, 2006.