

Influência do Tipo de Medição, do Tipo de Concreto e da Dimensão do Corpo de Prova Cilíndrico na Determinação do Módulo Estático de Elasticidade do Concreto

*Suélio da Silva Araújo¹
Gilson Natal Guimarães²
André Luiz Bortolacci Geyer³*

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos em ensaios do módulo estático de elasticidade realizados em corpos de prova cilíndricos de concreto simples. O objetivo é identificar e avaliar a influência de alguns fatores intervenientes nos resultados do ensaio módulo de elasticidade como o tipo de equipamento utilizado para medição de deformações (compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial, extensômetro elétrico de fixação externa e transdutor diferencial de variação linear, também conhecido pela sigla em inglês – LVDT), diferentes classes do concreto (Classe C30 e Classe C60) e tamanho do corpo de prova (100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm). Este ensaio foi executado em dois laboratórios da região de Goiânia, GO, conforme a NBR 8522:2008 que descreve o ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial, caracterizando a deformabilidade do concreto submetido às tensões entre 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura. Foram realizados ensaios em 160 corpos de prova considerando-se os resultados com desempenho estatisticamente satisfatório. Concluiu-se que o tipo de medidor de deformação influenciou significativamente os resultados de módulo de elasticidade. Os corpos de prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram resultados com as maiores dispersões.

Palavras-chave: Concreto. Dimensão. Medidor. Módulo de Elasticidade.

1 Introdução

A utilização do módulo de elasticidade está frequentemente relacionada com o cálculo de deslocamentos e flechas na estrutura de concreto armado ainda na fase de projeto. O projetista estrutural especifica um valor do módulo de elasticidade que é

utilizado nos seus cálculos para satisfazer as condições de segurança e os estados limites de utilização. Este valor do módulo de elasticidade deverá ser verificado posteriormente durante a construção pelo engenheiro responsável técnico da obra ou pela empresa construtora. A verificação equivocada do módulo de elasticidade pode ter graves consequências como, por

- 1 Professor da Universidade Paulista – Campus Brasília – Distrito Federal e Professor do Centro Universitário UNIEURO (Instituto Euro Americano de Educação, Ciência e Tecnologia) – Brasília – Distrito Federal. Pesquisador de Mestrado. Engenheiro Civil e Tecnólogo em Planejamento e Construção de Edifícios. Ex-Professor da Universidade de Brasília. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás, Brasil (2011), Escola de Engenharia Civil, Ex-Bolsista CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. E-mail: suelio.araujo@gmail.com
Endereço: Universidade Federal de Goiás. Rua Maria Senhorinha de Jesus, Quadra 14-A, Lote 10, Setor Oriente Ville, CEP: 74.355-666 – Goiânia, GO – Brasil.
- 2 Professor da Universidade Paulista – Campus Brasília – Distrito Federal e Professor do Centro Universitário UNIEURO (Instituto Euro Americano de Educação, Ciência e Tecnologia) – Brasília – Distrito Federal. Pesquisador de Mestrado. Engenheiro Civil e Tecnólogo em Planejamento e Construção de Edifícios. Ex-Professor da Universidade de Brasília. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás, Brasil (2011), Escola de Engenharia Civil, Ex-Bolsista CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. E-mail: suelio.araujo@gmail.com
- 3 Professor Titular da Universidade Federal de Goiás, Brasil. Doutor em Civil Engineering pela University of Texas at Austin, Estados Unidos (1988). E-mail: gilson@eec.ufg.br
Endereço: Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Laboratório de Estruturas. Av. Universitária, Pça. Universitária, s/n, Setor Universitário, CEP 74640-220, Goiânia, GO.

exemplo, a ocorrência de deformações excessivas não previstas no projeto.

Vários fatores podem interferir no valor do módulo de elasticidade do concreto [8,10,14] como, por exemplo, a resistência à compressão, o processo de moldagem dos corpos de prova, velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, tipo de medidor de deformação, teor de argamassa, dimensão e tipo do agregado graúdo, o operador da máquina de ensaio, a dimensão do corpo de prova. Esta pesquisa teve o objetivo de estudar e avaliar a influência de algumas dessas variáveis no valor do módulo de elasticidade: influência do tipo de medidor de deformação (compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial, extensômetro elétrico de fixação externa e transdutor diferencial de variação linear – LVDT), do tipo de concreto (Classe C30 e Classe C60) e da dimensão do corpo de prova cilíndrico (100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm). Os ensaios foram realizados em dois diferentes laboratórios de concreto localizados na região de Goiânia, Goiás.

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e deformação abaixo de um limite proporcional adotado. Segundo a norma NBR 8522:2008 [3], o módulo de deformação estático para um concreto sob compressão axial é determinado a partir da declividade da curva tensão-deformação obtida em ensaios de corpos de prova cilíndricos. Submete-se o corpo de prova a cargas crescentes e mede-se a deformação específica correspondente a cada incremento de carga. Os tipos de módulo de deformação estático estão relacionados a diferentes estágios de carga, e devem ser escolhidos de acordo com o objetivo do ensaio. A Figura 1 apresenta tipos de representação do módulo estático de elasticidade do concreto sujeito à compressão.

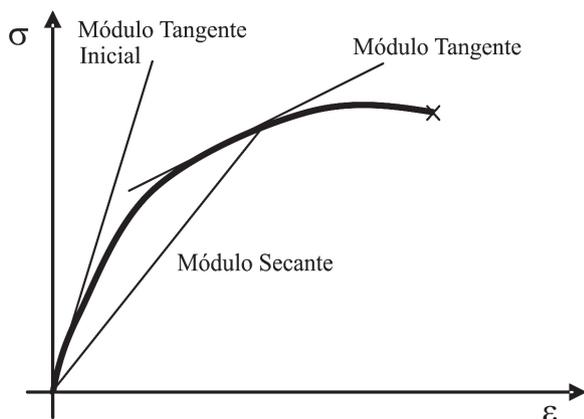


Figura 1 – Diferentes tipos de módulos de elasticidade no gráfico tensão-deformação específica.

De maneira sucinta, esses estágios de carga podem ser:

- módulo tangente inicial: dado pela declividade de uma reta tangente traçada passando pela origem do diagrama tensão-deformação específica. É utilizado quando se requer caracterizar deformações do concreto submetido a tensões muito baixas.
- módulo tangente em um ponto genérico: dado pela declividade de uma reta tangente à curva tensão-deformação em qualquer ponto da mesma. É utilizado quando se deseja simular a estrutura submetida a carregamentos ou descarregamentos em diferentes estágios de carga. Os carregamentos e descarregamentos prévios podem ser aplicáveis, por exemplo, quando há interesse na simulação numérica de uma estrutura cuja carga acidental é grande.
- módulo secante: dado pela declividade de uma reta traçada entre quaisquer dois pontos da curva tensão-deformação. Frequentemente os pontos escolhidos correspondem à tensão de 0,5 MPa e à tensão de 50% da tensão última. Neste caso, simula a estrutura durante seu carregamento inicial, que pode ser o caso quando a carga permanente prevalece. A norma brasileira de Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado NBR 6118:2003 [4] supõe que o valor do módulo de deformação secante é 85% do valor do módulo de deformação tangente inicial. Esse módulo é muito utilizado pelos projetistas estruturais.

Neste trabalho foi executado o ensaio de módulo de deformação tangente inicial. Foi realizado conforme disposto na NBR 8522:2008 [3] que prescreve, para esse caso, deformações específicas no concreto quando submetido às tensões de 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura. A norma prevê a tensão inicial de 0,5 MPa, e não o valor zero, para minimizar os efeitos da presença de imperfeições nos corpos de prova, da variabilidade das máquinas de ensaios e do processo de acomodação dos pratos do topo e base da prensa de ensaio, pois esses fatores podem gerar uma perturbação inicial no traçado das curvas tensão-deformação específica.

O valor do módulo de elasticidade tangente inicial, E_{ci} , é dado por:

$$E_{ci} = (\sigma_b - \sigma_a) / (\varepsilon_b - \varepsilon_a) \quad (\text{Equação 1})$$

onde

σ_b – tensão maior e é igual a 0,3 da tensão de ruptura;

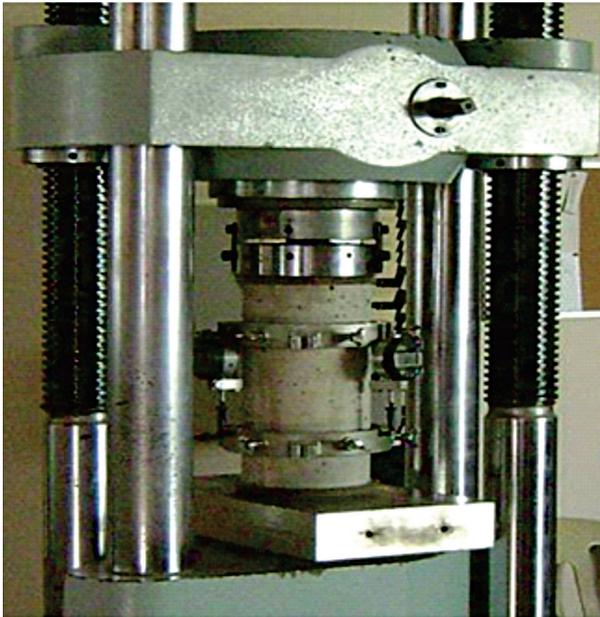
σ_a – tensão básica e é igual a 0,5 MPa;

ε_b – deformação específica média do corpo de prova sob a tensão maior;

ϵ_a – deformação específica média do corpo de prova sob a tensão básica.

Ao contrário das medições de deformação específica realizadas em barras de aço, as medições de deformação específicas no concreto são muito mais difíceis de serem realizadas. No aço, medidores de deformação conhecidos como extensômetros elétricos (“*strain gage*” em inglês) são muito utilizados e fornecem resultados confiáveis e de boa qualidade. Já no concreto o mesmo não ocorre, e diversos pesquisadores

[6,7,8,9] e laboratórios no Brasil e no mundo tem procurado outras alternativas para poder obter leituras de deformação específica confiáveis e com pouca variabilidade estatística. Entre essas alternativas para medição de deformação específica no concreto, esta pesquisa procurou verificar o uso de quatro medidores de deformação [15,16]: compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial (em inglês denominado de “*strain gage*”), extensômetro elétrico de fixação externa (em inglês é denominado de “*clip gage*”) e transdutor diferencial de variação linear.



(a)



(b)



Figura 2 – Compressômetro mecânico (a). Extensômetro elétrico de colagem superficial (b). Extensômetro elétrico de fixação externa (c). LVDT (d).

O compressômetro mecânico tem um funcionamento mecânico onde um pequeno pistão do aparelho se desloca indicando a medição e é muito conhecido também por relógios comparadores digitais. Tanto o extensômetro elétrico de colagem superficial como o de fixação externa possui o mesmo funcionamento baseado na variação da resistência elétrica de um fio durante a deformação do corpo ao qual estão colados. A diferença entre os dois é que um é colado na superfície do concreto e o outro é fixado mecanicamente na superfície do concreto por meio de garras, permitindo o seu reaproveitamento. O extensômetro elétrico de colagem superficial é perdido após o ensaio. O transdutor diferencial de variação linear é mais conhecido pela sigla em inglês LVDT (*“Linear Variable Displacement Transducer”*) e é um transdutor de deslocamento tendo funcionamento eletro-magnético. A Figura 2 mostra fotografias desses quatro tipos de medidores.

Em relação à velocidade de carregamento, a norma NBR 8522:2008 [3] fixa a velocidade de carregamento do ensaio de módulo de elasticidade em $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. A escolha da velocidade de carregamento fica a cargo do laboratório onde está sendo realizado o ensaio. Nesta pesquisa foi utilizada a velocidade de carregamento igual a 0,6 MPa/s nos dois laboratórios.

2 Programa Experimental

Considerando-se as características do programa interlaboratorial foram considerados três variáveis:

- tipo de concreto convencional (classe C30 e classe C60);
- tipo de medidor de deformação (compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT – transdutor diferencial de variação linear);
- dimensões dos corpos de prova cilíndricos: 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm.

Os ensaios utilizando-se compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de colagem superficial foram realizados no Laboratório Carlos Campos, e os ensaios utilizando extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT (transdutor diferencial de variação linear) foram realizados no Laboratório de Furnas Centrais Elétricas. Não foi possível a realização de todos os ensaios em um único laboratório devido a limitações físicas e operacionais (equipamentos, horários de funcionamento, disponibilidade de operador, armazenamento, etc.) dos dois laboratórios envolvidos e a quantidade de corpos de prova a serem ensaiados.

No ensaio de módulo de elasticidade aplicou-se o plano de carga denominado de Metodologia A da NBR 8522:2008 [3]. Realizaram-se, então, ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos. Conforme Figura 3, foram feitas as medições das deformações específicas relativas às tensões de 0,50 MPa e 0,30 da tensão de ruptura (denominada de f_c) e calculado o módulo de elasticidade tangente inicial pela Equação 1.

Foram utilizados concretos convencionais Classe C30 e Classe C60. Esses foram produzidos em betoneira com capacidade máxima de 450 litros utilizando-se

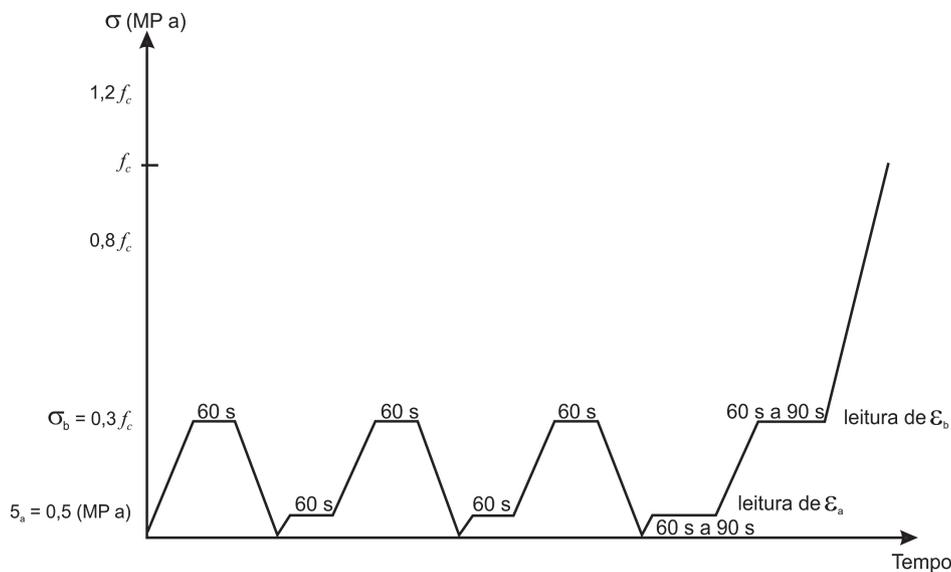


Figura 3 – Histórico do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A (NBR 8522:2008).

Tabela 1 – Propriedades dos aditivos e adição utilizados no concreto.

| Propriedades | | Material | |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Aditivo GLENIUM 51 | Aditivo Sikament PF 171 | Sílica Ativa Silmix | |
| Função Principal: | Superplastificante 3ª geração | Aditivo Polifuncional | Efeito Fíler |
| Base química | Policarboxilatos | Lignosulfonato de sódio | Sílica Amorfa |
| Aspecto: | Líquido viscoso | Líquido | Pó impalpável |
| Cor: | Bege | Castanho escuro | Cinza claro ou escuro |
| Densidade (g/cm ³) | 1,067 a 1,107 | 1,13 a 1,17 | 2,2 |
| pH: | 5 a 7 | 4,0 a 6,0 | 8,0 a 10 |

Tabela 2 – Traço do concreto para $f_c = 30$ MPa.

Proporção dos materiais por m³ de concreto

Proporcionalidade do traço (1 : 3,78 : 4,23)

Fator a/c = 0,73

| Materiais | Concreto convencional vibrado Quantidade por m ³ |
|----------------------------------|--|
| Cimento CP V ARI | 236 kg |
| Areia artificial | 891 kg |
| Brita 1 (19 mm) | 999 kg |
| Água | 172 kg |
| Aditivo polifuncional | 1,65 kg (0,7% da massa do cimento) |
| Aditivo superplastificante | 0,94 kg (0,4% da massa do cimento) |
| Adição de sílica ativa | 18,9 kg (como substituição de 8% da massa do cimento) |
| Propriedades do concreto fresco: | |
| Consistência | 130 mm |
| Ar incorporado | 2% |

Tabela 3 – Traço do concreto para $f_c = 60$ MPa.

Proporção dos materiais por m³ de concreto

Proporcionalidade do traço (1:1,92:2,58)

Fator a/c = 0,42

| Materiais | Concreto convencional vibrado (CCV) Quantidade por m ³ |
|----------------------------------|--|
| Cimento CP V ARI | 398 kg |
| Areia artificial | 765 kg |
| Brita 1 (19 mm) | 1.028 kg |
| Água | 167 kg |
| Aditivo polifuncional | 2,79 kg (0,7% da massa do cimento) |
| Aditivo superplastificante | 1,59 kg (0,4% da massa do cimento) |
| Adição de sílica ativa | 31,87 kg (como substituição de 8% da massa do cimento) |
| Propriedades do concreto fresco: | |
| Consistência | 120 mm |
| Ar incorporado | 1,5% |

cimento a granel tipo Portland CP V ARI (Alta Resistência Inicial) da marca CIMPOR. Usou-se também para composição dos traços: sílica ativa, aditivos poli-funcional e superplastificante. As propriedades dos aditivos e adição (encontradas nas especificações comerciais) utilizados são apresentados na Tabela 1.

Os traços utilizados estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. Todos os corpos de prova foram moldados no Laboratório Carlos Campos.

Foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão para cada tipo de concreto (classes C30 e C60), para cada dimensão de corpo de prova (100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm) e para cada laboratório, totalizado 80 corpos de prova. Esses ensaios foram realizados nos dois laboratórios (40 corpos de prova em cada laboratório) aos 28 dias após a moldagem. O ensaio de resistência à compressão é necessário antes dos ensaios de módulo de elasticidade para poder calcular o valor de 30% da carga de ruptura necessária para o uso no ensaio de módulo de elasticidade e na Equação 1. O valor da tensão de ruptura considerada foi a média da resistência à compressão dos 10 corpos de prova.

Para os ensaios de módulo de elasticidade foram moldados 10 corpos de prova para cada tipo de medidor de deformação (quatro medidores diferentes), para cada tipo de concreto (classes C30 e C60) e dimensão de corpo de prova (100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm) totalizado 160 (10 x 4 x 2 x 2) corpos de prova. Os ensaios utilizando-se os medidores compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de colagem superficial foram realizados no mesmo corpo de prova simultaneamente, e por isso não foram utilizados todos os corpos de prova. Isso foi possível, pois durante o ensaio, a leitura analógica dos valores indicados pelo compressômetro mecânico é realizada manualmente (leitura visual) pelo operador, e, utilizando-se o extensômetro elétrico de colagem superficial, a leitura é digital e computadorizada.

Todos os ensaios foram realizados com o corpo de prova na idade de 28 dias. O ensaio de módulo é não destrutivo e o corpo de prova foi então levado à ruptura para se obter o valor da resistência à compressão. O objetivo de levar o corpo de prova já ensaiado até a ruptura é verificar a homogeneidade do concreto e permitir o controle estatístico. Porém, esses valores da resistência à compressão não foram utilizados na Equação 1, mas sim os valores obtidos nos ensaios de resistência mencionados.

Os corpos de prova foram moldados e armazenados de acordo com instruções da NBR 5738:2008 [1], seguindo as orientações da NBR 5739:2007 [2]. Para reduzir a influência da umidade dos corpos de prova, eles foram desmoldados 24 horas após a concretagem,

identificados e armazenados em tanques de armazenamento por 28 dias. Vencido esse prazo de armazenamento, os corpos de prova foram retirados do tanque de armazenamento e estocados à umidade e temperatura ambiente. Em todos os corpos de prova foi utilizado capeamento com enxofre.

Os corpos de prova foram ensaiados em réplicas (com 10 unidades por situação de estudo) e aleatorizados, antes da execução do ensaio de módulo estático de elasticidade. Essa aleatorização permite minimizar os efeitos de variáveis que não foram ou não puderam ser consideradas no experimento, tais como: processo de moldagem do corpo de prova, distribuição dos agregados no concreto, montagem do instrumento de medição, entre outros. Além disso, caso exista algum mecanismo de dependência entre os resultados de experimentos subsequentes, a aleatorização da execução dos experimentos permite que essa dependência seja diluída entre todas as situações de estudo e, assim, não privilegie uma ou outra situação.

Aplicou-se a técnica de análise estatística de variância (ANOVA), contido no software Statsoft Statistica 7[®], para os resultados das amostras de concreto Classe C30 e de concreto Classe C60, separadamente e em conjunto. A metodologia do teste consiste na aplicação do Teste de Fisher. A análise indicou que os resultados deveriam ser analisados em conjunto para que sejam estatisticamente significativos.

3 Apresentação e Discussão dos Resultados

Primeiramente, para a verificação da homogeneidade do concreto utilizado, foram analisados os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova que foram levados à ruptura após a execução do ensaio de módulo de elasticidade. Esses resultados de resistência à compressão foram analisados por métodos estatísticos, de modo a identificar possíveis variações dos resultados e verificar a distribuição normal (histograma) dos resultados. As Figuras 4 e 5 apresentam os histogramas desses resultados de resistência à compressão para os concretos classes C30 e C60, respectivamente.

O concreto C30 apresentou resistência média de 36,5 MPa com coeficiente de variação de 10% e o concreto C60 apresentou resistência média de 69,3 MPa com coeficiente de variação de 11%. A aderência entre os histogramas e a curva de distribuição normal foi analisada pelos métodos de Kolmogorov-Smirnov e Qui-quadrado. Do ponto de vista estatístico, o valor de 10% é um nível aceitável para variabilidade para um processo de medição.

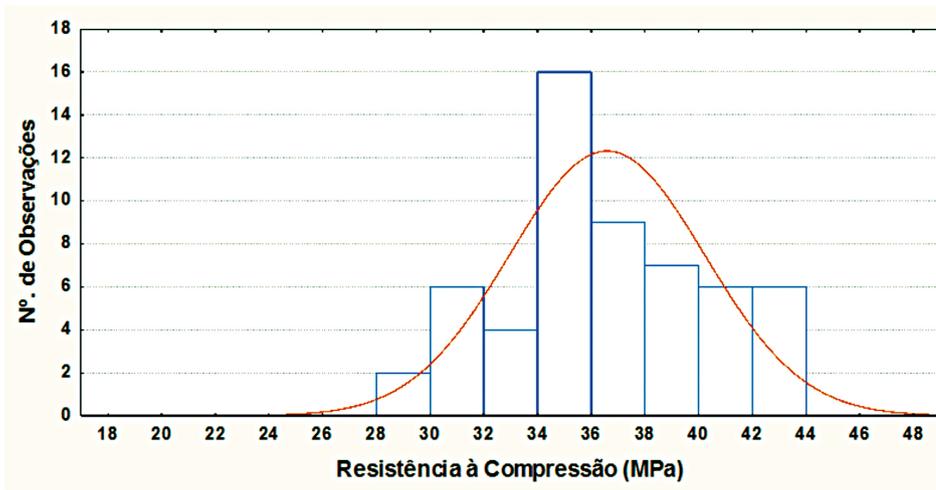


Figura 4 – Histograma dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova do concreto Classe C30.

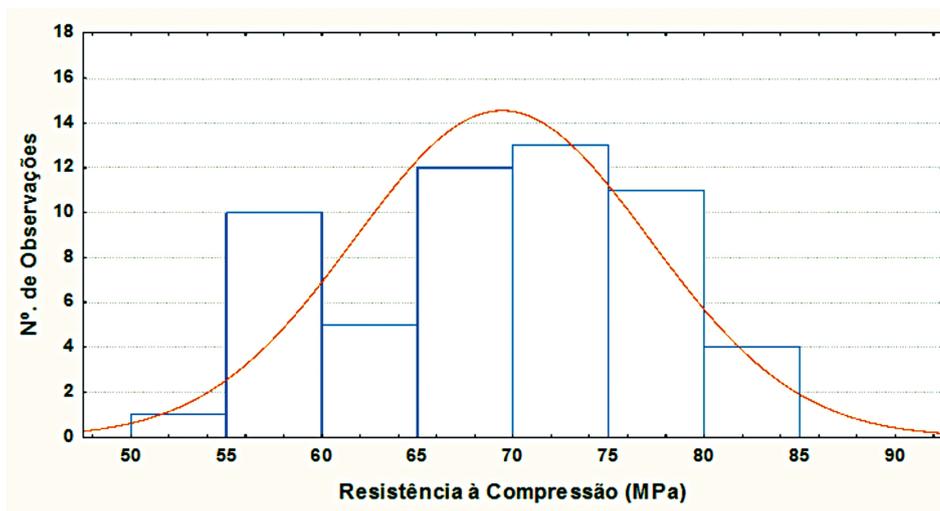


Figura 5 – Histograma dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova do concreto Classe C60.

Na Tabela 4 estão apresentadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados obtidos para todas as situações estudadas com intervalo de 95% de confiança da média para a propriedade módulo de elasticidade.

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados individuais de módulo de elasticidade, para determinar os fatores estatisticamente significativos com nível de confiança de 95%. Alguns valores foram retirados, pois estão fora do intervalo de confiança e os mesmos foram considerados espúrios pelo critério de Chauvenet.

A Tabela 4 mostra que os medidores de deformação que apresentaram as menores dispersões foram os do tipo extensômetro elétrico de colagem superficial e extensômetro elétrico de fixação externa, porque os coeficientes de variação total desses medidores foram de

11,0% e 14,4%, respectivamente, e os coeficientes de variação total dos medidores compressômetro mecânico e LVDT foram de 16,1% e 18,2%, respectivamente.

A Tabela 4 mostra também que os corpos de prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram a maior dispersão de resultado de módulo estático de elasticidade, pois o coeficiente de variação total deste corpo de prova foi de 24,4% e o coeficiente de variação total do corpo de prova de dimensão 150 mm x 300 mm foi 13,1%.

Em decorrência da ANOVA (Tabela 4) ter revelado os efeitos estatisticamente significativos das variáveis dimensão de corpo de prova, medidor de deformação e tipo de concreto, realizou-se o agrupamento das médias homogêneas pelo método de Duncan, de forma a se observar as semelhanças e diferenças dos resultados obtidos.

Nesse método ficou demonstrado que as duas dimensões de corpos de prova estudadas influenciaram os valores do módulo de elasticidade do concreto porque as médias gerais de módulo estático de elasticidade dos corpos de prova 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm foram respectivamente de 24,4 GPa e 26,2 GPa. Ou seja, o corpo de prova 150 mm x 300 mm teve média geral 7% maior que o módulo estático de elasticidade do corpo de prova 100 mm x 200 mm.

Depois de fazer o agrupamento de médias por medidor de deformação pelo método de Duncan, ficou demonstrado que o medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial apresentou resultado semelhante ao medidor de deformação mecânico, pois as suas médias gerais dos módulos de elasticidade foram, respectivamente, de

27,6 GPa e 27,5 GPa, e as médias gerais dos medidores de deformação tipo extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT foram respectivamente de 26,3 GPa e 19,8 GPa.

Quanto aos corpos de prova com dimensão de 100 mm x 200 mm, os resultados de módulo de elasticidade do medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial, exibidos na Figura 6, apresentaram médias de 24,6 GPa e 30,6 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 13,2% e 1,9% para as classes C30 e C60 respectivamente.

No medidor de deformação compressômetro mecânico apresentaram médias dos concretos Classe C30 e Classe 60 de 24,1 GPa e 31,6 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 16,1% e 17,7%. Já, no medidor de deformação extensômetro

Tabela 4 – Análise estatística dos resultados de ensaio – Módulo Estático de Elasticidade.

| Situação de Estudo | | | Nº de Corpos-de-Prova | Módulo Estático de Elasticidade (GPa) | | |
|--------------------|--|------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| Dimensão (mm) | Medidor de Deformação | Tipo de Concreto | | Média (GPa) | Desvio Padrão (GPa) | Coefficiente de Variação (%) |
| — | Compressômetro Mecânico | — | 37 | 27,5 | 4,4 | 16,1 |
| — | Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial | — | 35 | 27,6 | 3,05 | 11,0 |
| — | Extensômetro Elétrico de Fixação Externa | — | 39 | 26,3 | 3,8 | 14,4 |
| — | LVDT | — | 37 | 19,8 | 3,6 | 18,2 |
| 100X200 | — | — | 73 | 24,4 | 5,96 | 24,4 |
| 150X300 | — | — | 75 | 26,2 | 3,4 | 13,1 |
| 100X200 | Compressômetro Mecânico | C30 | 10 | 24,1 | 3,9 | 16,1 |
| | Compressômetro Mecânico | C60 | 9 | 31,6 | 5,6 | 17,7 |
| | Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial | C30 | 10 | 24,6 | 3,2 | 13,2 |
| | Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial | C60 | 6 | 30,6 | 0,58 | 1,9 |
| | Extensômetro Elétrico de Fixação Externa | C30 | 10 | 22,0 | 0,88 | 4,0 |
| | Extensômetro Elétrico de Fixação Externa | C60 | 9 | 29,8 | 0,74 | 2,5 |
| | LVDT | C30 | 9 | 14,9 | 2,004 | 13,5 |
| | LVDT | C60 | 10 | 20,3 | 1,6 | 7,9 |
| 150X300 | Compressômetro Mecânico | C30 | 9 | 26,9 | 1,02 | 3,8 |
| | Compressômetro Mecânico | C60 | 9 | 27,9 | 2,1 | 7,6 |
| | Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial | C30 | 9 | 26,6 | 0,69 | 2,6 |
| | Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial | C60 | 10 | 29,8 | 1,2 | 4,0 |
| | Extensômetro Elétrico de Fixação Externa | C30 | 10 | 23,5 | 0,96 | 4,1 |
| | Extensômetro Elétrico de Fixação Externa | C60 | 10 | 30,1 | 0,46 | 1,5 |
| | LVDT | C30 | 8 | 20,6 | 0,29 | 1,4 |
| | LVDT | C60 | 10 | 23,2 | 2,9 | 12,6 |

OBS.: - Tipos de concretos: concreto Classe C30 para dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm e concreto Classe C60 para dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm.

- Doze dos resultados individuais foram considerados como valores espúrios

elétrico de fixação externa, os resultados de módulo de elasticidade apresentaram médias dos concretos Classe C30 e Classe C60 de 22,0 GPa e 29,8 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 4,0% e 2,5%. No medidor de deformação LVDT apresentaram médias dos concretos Classe C30 e Classe C60 de 14,9 GPa e 20,3 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 13,5% e 7,9%. Quanto à dimensão 100 mm x 200 mm, verificou-se que os medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT apresentaram maiores dispersões.

Quanto aos corpos de prova com dimensão de 150 mm x 300 mm, os resultados de módulo de elasticidade dos concretos Classe C30 e Classe C60 no medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial, exibidos na Figura 6, apresentaram médias de 26,6 GPa e 29,8 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 2,6% e 4,0%. No medidor de deformação compressômetro mecânico apresentaram médias dos concretos Classe C30 e Classe C60 de 26,9 GPa e 27,9 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 3,8% e 7,6%. Já no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa, os resultados de módulo de elasticidade apresentaram médias dos concretos Classe C30 e Classe C60 de 23,5 GPa e 30,8 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 4,1% e 1,5%. No medidor de deformação LVDT apresentaram médias dos concretos Classe C30 e Classe C60 de 20,6 GPa e 23,2 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 1,4%

e 12,6%. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que as maiores dispersões foram obtidas usando compressômetro mecânico e LVDT. Resultados de módulo obtidos usando LVDT foram os menores.

Devido ao fato dos corpos de prova com dimensão 100 mm x 200 mm apresentarem as maiores dispersões de resultados, a variável “dimensão do corpo de prova” foi destacada nas análises subseqüentes, apresentadas pelas Figuras 7 e 8. A Figura 7 mostra o efeito da dimensão do corpo de prova e efeito do tipo de concreto, com o concreto Classe C60 apresentando os resultados de módulo de elasticidade maiores. Os resultados das médias de módulo estático de elasticidade dos concretos Classe C30 e Classe C60, exibidos na Figura 7, foram respectivamente 21,6 GPa e 27,6 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 21,6% e 20,5%.

Os corpos de prova com dimensão 150 mm x 300 mm apresentaram resultados de módulo de elasticidade com médias de 24,5 GPa e 27,7 GPa, e os respectivos coeficientes de variação foram de 10,8% e 12,2%.

A Figura 8 mostra o efeito do medidor de deformação interagido com a dimensão do corpo de prova, apresentando o comportamento explicado anteriormente. Novamente, as maiores dispersões são apresentadas nos resultados de módulo obtidos usando LVDT.

Quanto aos corpos de prova com dimensão 100 mm x 200 mm, os resultados de módulo de elasticidade no medidor de deformação tipo extensômetro

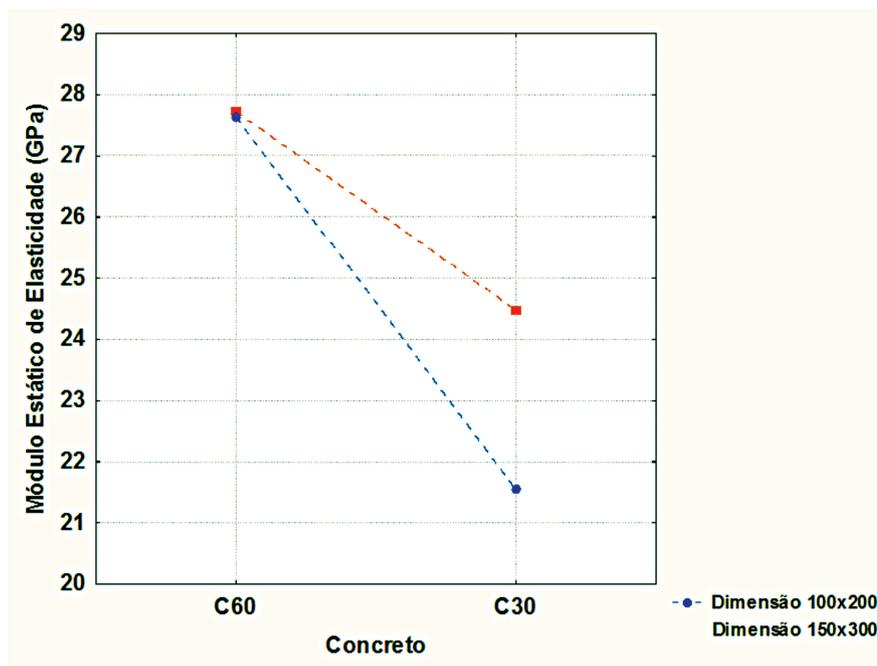


Figura 6 – Módulo estático de elasticidade, por dimensão do corpo de prova, tipo de concreto (concretos Classe C60 e Classe C30) e medidor de deformação.

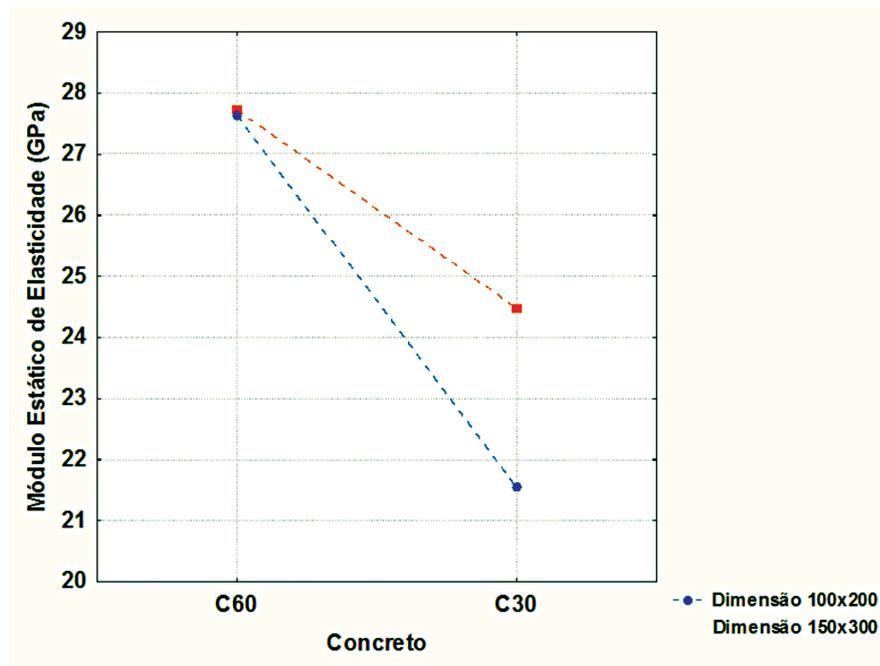


Figura 7 – Módulo de elasticidade versus tipo de concreto e dimensão do corpo de prova (inclui todos os medidores de deformação).

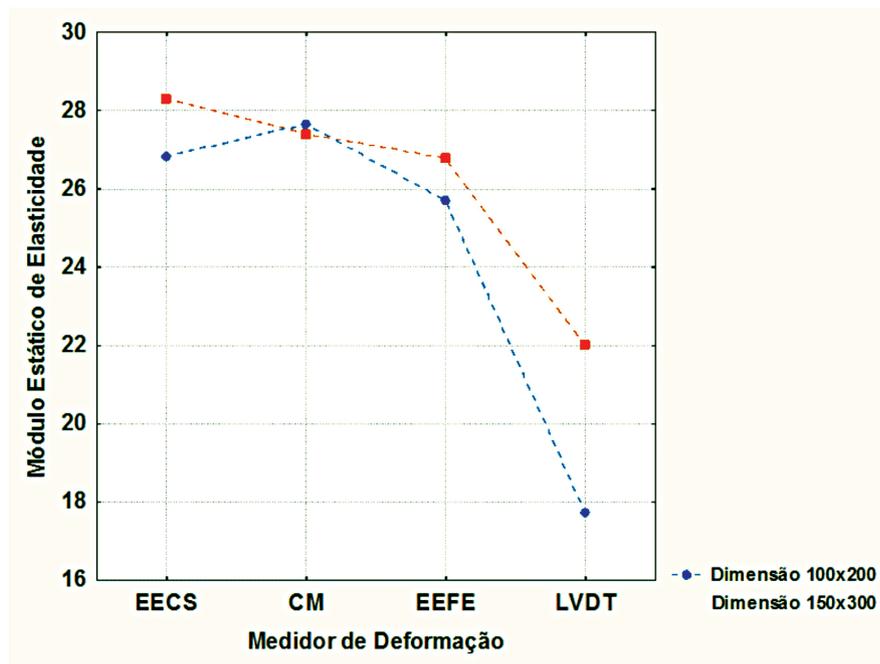


Figura 8 – Módulo de elasticidade versus o tipo de medidor de deformação e dimensão do corpo de prova (EECS – extensômetro elétrico de colagem superficial, CM – compressômetro mecânico, EEFE – extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT).

elétrico de colagem superficial (EECS), exibidos na Figura 8, apresentaram média de 26,8 GPa e o coeficiente de variação foi de 14,7%.

No medidor de deformação compressômetro

mecânico (CM) apresentou média de 27,7 GPa e o coeficiente de variação foi de 21,9%. Já, no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE), os resultados de módulo de elasticidade

apresentaram média de 25,7 GPa e o coeficiente de variação foi de 15,9%. No medidor de deformação LVDT apresentou média de 17,7 GPa e o coeficiente de variação foi de 18,5%. Quanto à dimensão 100 mm x 200 mm, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT.

Quanto aos corpos de prova com dimensão 150 mm x 300 mm, os resultados de módulo de elasticidade no medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), exibidos na Figura 8, apresentaram média de 28,3 GPa e o coeficiente de variação foi de 6,6%. No medidor de deformação compressômetro mecânico (CM) apresentaram média de 27,4 GPa e o coeficiente de variação foi de 6,2%. Já, no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE), os resultados de módulo de elasticidade apresentaram média de 26,8 GPa e o coeficiente de variação foi de 12,9%. No medidor de deformação LVDT apresentaram média de 22,0 GPa e o coeficiente de variação foi de 11,3%. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE) e LVDT.

4 Considerações Finais

As considerações finais retiradas da análise dos resultados expostos anteriormente consideraram a influência do tipo de medidor de deformação, a classe do concreto, a dimensão do corpo de prova. As principais conclusões deste estudo estão numeradas a seguir:

1. As duas dimensões de corpos de prova estudadas influenciaram os valores do módulo de elasticidade do concreto porque as médias gerais de módulo estático de elasticidade dos corpos de prova 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm foram, respectivamente, de 24,4 GPa e 26,2 GPa. Os resultados para o corpo de prova 150 mm x 300 mm foram 7% maiores em média. Porém, o valor do módulo de elasticidade apresentou pequenas variações apuradas dentro dos limites de tolerância estipulados pelo item 8.2 da NBR 8522:2008 [3], que admite variações de resultados que não sejam maiores que 10%.
2. O medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial apresentou resultado semelhante ao medidor de deformação compressômetro mecânico, pois as médias gerais dos medidores de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem

superficial e compressômetro mecânico foram, respectivamente, de 27,6 GPa e 27,5 GPa, e as médias gerais dos medidores de deformação tipo extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT (transdutor diferencial de variação linear) foram respectivamente de 26,3 GPa e 19,8 GPa.

3. Quanto à dimensão 100 mm x 200 mm verificou-se que os resultados apresentaram maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE) e LVDT.
4. Para as duas classes de concreto verificou-se que os corpos de prova com dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão em relação aos corpos de prova com dimensão 150 mm x 300 mm. Os corpos de prova com dimensão 150 mm x 300 mm se comportaram melhor com menor coeficiente de variação no ensaio de módulo de elasticidade.
5. Tanto o compressômetro mecânico como o extensômetro elétrico de colagem superficial forneceram leituras de deformação maiores, quando comparadas ao medidor extensômetro elétrico de fixação externa, e muito maiores que os resultados obtidos usando LVDT.
6. O LVDT indica resultados de módulo de deformação menores que aqueles obtidos com o uso dos outros três tipos de medidores de deformação. De um modo geral, o LVDT foi considerado o menos preciso (maior coeficiente de variação entre os quatro medidores analisados), e o mais difícil de ser utilizado devido à leitura das deformações ser analógica, à necessidade constante de manutenção, à fragilidade do aparelho, à dificuldade de calibração e ao controle manual das leituras pelo operador.
7. Em geral, os dois medidores extensômetros elétricos tiveram leituras mais consistentes e os menores coeficientes de variação, e mostraram vantagens importantes como a menor necessidade de influência externa no decorrer do ensaio e minimização da possibilidade de erros de leitura por parte do operador. No caso do extensômetro elétrico de colagem superficial, na colagem do mesmo na superfície do concreto, vários aspectos devem ser resguardados para

preservar as leituras de deformações, dificultando o uso. Além disso, esse tipo de extensômetro colado deve ser descartado após o ensaio, não servindo para uma segunda colagem, o que aumenta o custo dos ensaios. O extensômetro elétrico de fixação externa tem a vantagem de fornecer medidas de deformação longitudinal e transversal, possui mostrador para leitura digital das deformações e apresenta-se menos susceptível a variações na calibração. O extensômetro elétrico de fixação externa é muito prático, pode ser reutilizado várias vezes e sua montagem junto ao corpo de prova transcorre sem dificuldades e sem necessidade de grande perícia pelo operador do ensaio.

Os ensaios de módulo de elasticidade com uso de diferentes tipos de medidores de deformação demonstraram que, mesmo seguindo os critérios propostos na NBR 8522:2008 [3], as variações nos resultados dos ensaios são relativamente significativas.

5 Agradecimentos

Os autores desejam expressar os sinceros agradecimentos ao Laboratório Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda., ao Laboratório de Furnas Centrais Elétricas, à Realmix Concreto S.A., à Pedreira Anhanguera, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e ao Procad/CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Abstract

This paper presents a comparative analysis of the results obtained in static modulus of elasticity tests of plain concrete specimens. The purpose of this study is to identify and evaluate the influence of several factors involved in the modulus of elasticity tests such as the strain measurement device used (mechanical dial gages, electrical surface bonded strain gages, externally fixed strain gages and linear variation displacement transducer – LVDT), the type of concrete (Class C30 and Class C60) and cylindrical specimen size (100 mm x 200 mm and 150 mm x 300 mm). The modulus tests were done in two different laboratories in the Goiânia, GO region and were performed according to ABNT NBR 8522:2008, which describes the initial tangent modulus test, characterized by strains measured at tension values of 0.5 MPa and 30% of the ultimate

load. One hundred and sixty specimens were tested with statistically satisfactory results. It was concluded that the type of strain measurement greatly influenced the modulus of elasticity results. Tests in specimens 100 mm x 200 mm showed highest dispersion.

Keyword: Concrete. Specimen Size. Measurement. Modulus of Elasticity.

6 Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão e Diagrama Tensão-Deformação – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118:** Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [5] CUPERTINO, M. A.; PEREIRA, A. C.; INÁCIO, J. J.; ANDRADE, M. A. S. **Avaliação de Fatores de Ensaio que Interferem nos Resultados de Módulo de Elasticidade do Concreto.** In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2007, Bento Gonçalves – RS. Anais 49º Congresso Brasileiro do Concreto. 2007. CD-ROM.
- [6] 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 em Goiânia-GO** [manuscrito] / Danilo Gomes Martins. – 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008.
- [7] RODRIGUES, G. S. S. **Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultra-sônico: estudo da correlação e fatores influentes.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. 2003. 234 p.
- [8] ARAÚJO, Suélio da Silva. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto** – 2011. 212 f.: il., figs, tabs. Orientador: Prof. PhD. Gilson Natal Guimarães; Coorientador: Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011.

- [9] FIGUEIREDO, E. J. P.; SOUZA, F. L. S.; DE FIGUEIREDO, A. D. **Medidas de deformação através de *strain gages***. Trabalho da disciplina de tecnologia avançada no estudo do comportamento do concreto. São Paulo, 1989. 57 p.
- [10] METHA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. “**Concreto-Microestrutura, Propriedades e Materiais.**” 1ª Ed. Português, IBRACON, São Paulo, 2008.
- [11] MONTIJA, Fernando Celloto. **Aspectos da Variabilidade Experimental do Ensaio de Módulo de Deformação do Concreto.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [12] SHEHATA, L. D. Deformações Instantâneas do Concreto. In: IBRACON, **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Editor: ISAIA, G. S. IBRACON, São Paulo, 2005. Cap. 21, p. 633-654. ISBN 85-98576-03-4.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8953** – Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 2009.
- [14] BARBOSA, Isa Lorena Silva. **Influência dos agregados graúdos da região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto** – 2009. 133 f.: il., figs, tabs. Orientador: Prof. Dr. André Bortolacci Geyer. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.
- [15] PORTNOI, M. **Extensometria: história, usos e aparelhos.** Disponível em: <http://locksmith.orcishweb.com/academic-files/extensometria.html#_Toc511736064>. Acesso em 15 jun. 2009.
- [16] UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER. Transducers. 1999. Disponível em: <http://civil.colorado.edu/courseware/struct_labs/transducer.html>. Acesso em 15 jun. 2011.