

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DE ARGAMASSAS: AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO E FORMATOS DE CORPO-DE-PROVA

Fernanda B. Silva (1); Mércia M. S. B. de Barros (2); Renata Monte (3)

- (1) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: fernanda.belizario@gmail.com
(2) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: mercia.barros@poli.usp.br
(3) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: renata.monte@poli.usp.br

RESUMO

Proposta: o módulo de deformação é a propriedade que traduz a deformabilidade das argamassas, uma característica cujo conhecimento é extremamente importante para a definição dos revestimentos. Entretanto, não há normalização brasileira dedicada à sua avaliação, o que tem levado à adoção dos mais variados métodos de ensaio e formatos de corpo-de-prova. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo que envolveu os métodos de ensaio e formatos de corpo-de-prova usualmente empregados para a determinação desta propriedade, identificando a combinação que permita melhor avaliar esta propriedade. **Método de pesquisa/Abordagens:** caracterização dos materiais e argamassas utilizadas, avaliação da resistência mecânica, avaliação do módulo de deformação com emprego de diferentes métodos estáticos (à compressão, à tração na flexão) e dinâmicos (ultrassom e frequência de ressonância), análise comparativa dos resultados e de sua variabilidade. **Resultados:** os ensaios dinâmicos resultaram em dados mais confiáveis e com menor variabilidade, sendo que o ultrassom é de mais fácil manuseio e tem menor custo que o ensaio pela frequência de ressonância. O ensaio estático à compressão é o mais apropriado para traçar a curva tensão-deformação, no entanto, sua execução é trabalhosa e exige equipamentos de mais alto custo. O formato de corpo-de-prova cilíndrico apresentou os melhores resultados, seguido pelo prisma. **Contribuições/Originalidade:** Minimização das divergências em relação à determinação do módulo de deformação em argamassas e fornecimento de subsídios para a normalização.

Palavras-chave: módulo de deformação; argamassa; método de ensaio.

ABSTRACT

Purpose: the elastic modulus is the physical property that gives the mortars' deformability, a characteristic of great importance to define coverings. However, there is no Brazilian standardization about this theme, what leads to the usage of various methods and specimen shapes. The aim of this work is to present a study, which involved the test methods and the specimen shapes usually used to determine this property, identifying the best combination. **Methods:** characterisation of materials and mortars used, mechanical strength tests, elastic modulus determination through static (compression, tensile through flexure) and dynamic tests (ultrasound and resonance frequency), comparative analysis of the results and their variability. **Findings:** the dynamic test methods of modulus of elasticity gave better results with low variability, with the ultrasonic method having lower costs than the resonance frequency method. The compressive test method is the most suitable to determine the stress-strain curve, though its execution is difficult and requires equipments of higher costs. The cylinder-shaped specimen had the best results, followed by the prism. **Originality/value:** minimizing the disagreement about the determination of the elasticity modulus of mortars and giving subsidies to standardization.

Keywords: modulus of elasticity; mortar; test method.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O conceito de módulo de deformação e sua importância para as argamassas

É muito importante avaliar a capacidade de deformação de argamassas, sejam elas destinadas a revestimento ou assentamento de componentes de alvenaria. Em todos os casos, a argamassa não se deforma livremente, estando sujeita à restrição devido às tensões decorrentes da aderência à base em que se encontra aplicada. Caso sua capacidade de deformação não seja compatível este nível de tensões gerado, a argamassa na forma de revestimento ou junta de assentamento será rompida, podendo ocorrer prejuízos à sua funcionalidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O módulo de deformação “E” é a propriedade que mede a capacidade de deformação de um material, relacionando a tensão “ σ ” aplicada com a consequente deformação “ ϵ ” (eq. 1).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{eq. 1})$$

Em materiais elásticos, esta deformação ocorre sem que se desenvolvam fissuras e, cessada a solitação, o material volta às suas dimensões originais. Entretanto, a argamassa se comporta elasticamente apenas para tensões muito baixas: em tensões maiores, seu mecanismo de deformação inclui microfissuras, que sozinhas não devem comprometer a estanqueidade ou durabilidade do componente do qual a argamassa faz parte (SABBATINI et al., 1989). Portanto, considera-se que o termo “módulo de deformação” seja mais adequado às argamassas do que o comumente utilizado “módulo de elasticidade”.

Embora a importância do módulo de deformação na caracterização das argamassas seja reconhecida, as publicações científicas sobre o assunto ainda são poucas e muito dispersas quanto aos métodos de avaliação utilizados, uma vez que não há uma norma brasileira que o aborde. Há diversos métodos de ensaio para sua determinação, usualmente baseados em normas e publicações internacionais e mais relacionados ao concreto. São diversos também os formatos de corpo-de-prova empregados nesta avaliação. A falta de consenso sobre qual combinação “método de ensaio/formato de corpo-de-prova” utilizar leva a grandes discrepâncias entre resultados obtidos por pesquisadores e laboratórios diferentes. Isto dificulta tanto a caracterização de produtos comerciais, quanto a comparação entre estudos acadêmicos distintos.

1.2 Métodos para determinação do módulo de deformação

Os ensaios para determinação do módulo de deformação podem ser divididos em estáticos e dinâmicos. Os estáticos baseiam-se na aplicação de carga, com concomitante medição da deformação, traçando-se assim a curva tensão-deformação. A deformação pode ser medida com relógios comparadores, extensômetros elétricos (acoplados por meio de elásticos ou mesmo colados ao corpo-de-prova) ou medidores de deslocamento (tipo LVDT). Para se calcular o módulo a partir da curva tensão-deformação, convencionou-se os três métodos apresentados no Gráfico 1 (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os ensaios estáticos são destrutivos, ou seja, os corpos-de-prova não podem ser reutilizados depois de submetidos a estes ensaios.

Os ensaios dinâmicos, por sua vez, baseiam-se em princípios de propagação de ondas e são não-destrutivos. Eles não permitem traçar a curva tensão-deformação, e o resultado que fornecem equivale ao módulo tangente inicial à compressão. Os principais métodos de ensaio utilizados para determinação do módulo de deformação são aqui sintetizados.

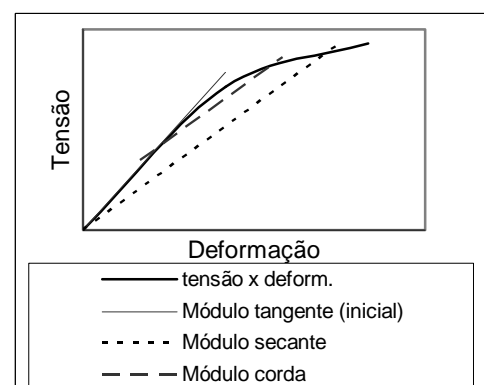


Gráfico 1 - Métodos de cálculo do módulo através da curva tensão-deformação.

1.2.1 Módulo de deformação estático à compressão

Grande parte dos resultados de módulo de deformação no Brasil, inclusive para argamassas de revestimento (comumente sujeitas à tração), são provenientes deste ensaio (BASTOS, 2003), ilustrado pela Figura 1. O ensaio de módulo de deformação à tração direta é raramente empregado, porque os materiais cimentícios têm baixa resistência à tração, o que exige equipamentos de elevada precisão para medir as deformações mínimas que ocorrem antes da ruptura. Este ensaio não será abordado no presente artigo.

As principais normas que abordam o ensaio de módulo à compressão não são para argamassas: NBR 7190, para madeira (ABNT, 1997), NBR 8522, para concreto (ABNT, 2003) e BS 1881: Part 121, para concreto (BSI, 1983).

O procedimento mais adotado no Brasil é o emprego da NBR 8522 (ABNT, 2003), com variadas adaptações relativas aos ciclos de carga e descarga.

1.2.2 Módulo de deformação à tração na flexão



Figura 2 - Ensaio de módulo à tração na flexão, com medidor de deslocamentos do tipo LVDT.

Este ensaio, cuja montagem é ilustrada pela Figura 2, não conta com normalização brasileira e raramente é empregado no país. Bastos (2001) desenvolveu estudos adotando este ensaio e, a partir de adaptação do método ISO/DIS 679¹, apresenta a equação (eq. 2) que relaciona o módulo de deformação com o deslocamento medido na seção média do corpo-de-prova (flecha).

$$E = \frac{P.L^3}{4.\delta.b.h^3} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde: “E”: módulo de elasticidade; “P”: carga aplicada; “L”: distância entre os apoios; “δ”: flecha na seção média do corpo-de-prova; “b”: largura do corpo-de-prova; “h”: espessura do corpo-de-prova.

1.2.3 Módulo de deformação dinâmico pelo ultrassom

Pulsos de ondas de choque elásticas longitudinais são gerados e recebidos por transdutores acoplados às extremidades do corpo-de-prova. Este acoplamento se dá por pressão manual dos transdutores contra o corpo-de-prova, utilizando-se vaselina ou gel próprio para ultrassom (Figura 3). O aparelho de leitura fornece o tempo que a onda leva em sua travessia (Figura 3). Com o tempo definido e o comprimento do corpo-de-prova, calcula-se a velocidade de propagação da onda, à qual se associa o módulo de deformação, segundo o princípio de propagação de ondas explícito na eq. 4 (JONES, 1967).

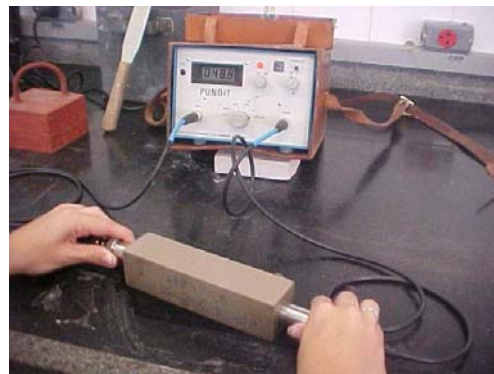


Figura 3 - Ensaio de módulo pelo ultrassom.

¹ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Methods of testing cements – Determination of strength – ISO 679 (1989).

$$E = \rho.v^2.\frac{(1+\mu).(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (\text{eq.4})$$

Onde: “ ρ ”: densidade do corpo-de-prova; “ v ”: velocidade de propagação da onda ultrassônica; “ μ ”: coeficiente de Poisson (admite-se 0,2 para argamassas).

As normas que o abordam são a BS EN 12504 (BSI, 2004) e NBR 8802 (ABNT, 1984). Ambas referem-se a corpos de prova de concreto, sendo que a norma brasileira é sobre o cálculo da velocidade de propagação da onda, não fornecendo a equação para o cálculo do módulo em si.

1.2.4 Módulo de deformação dinâmico pela frequência de ressonância

Neste ensaio, um aparelho específico emite, por vibração, ondas mecânicas que atravessam longitudinalmente o corpo-de-prova (Figura 4). Variando-se a frequência, é possível determinar, por meio de um osciloscópio, a frequência mais baixa de ressonância. Esta frequência é denominada “frequência de ressonância longitudinal fundamental” e, a partir desse dado, encontra-se o módulo de deformação do material conforme a equação eq. 5 (JONES, 1967).

$$E = 4.(nl)_1^2.l^2.\rho \quad (\text{eq. 5})$$

Onde: “ $(nl)_1$ ”: frequência de ressonância longitudinal fundamental”; “ l ”: comprimento do corpo-de-prova”; “ ρ ”: densidade do corpo-de-prova.



(a)

(b)

Figura 4 – (a) ensaio de módulo pela frequência de ressonância; (b) osciloscópio.

As normas que dizem respeito a este método são a NF B 10-511 (AFNOR, 1975), sobre pedras calcárias; e a BS 1881: Part 209 (BSI, 1990), sobre concreto.

1.3 Formatos de corpo-de-prova

São vários os formatos de corpo-de-prova utilizados para determinação do módulo de deformação. Os mais comuns são relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 - Formatos de corpo-de-prova usualmente empregados na determinação do módulo de deformação.

| Formato | Dimensões (cm) |
|----------|------------------|
| Barra | 2,5 x 2,5 x 28,5 |
| Cilindro | Ø5 x 10 |
| Cubo | 10 x 10 x 10 |
| Placa | 2,5 x 7,5 x 20 |
| Prisma | 4 x 4 x 16 |

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar os principais métodos de determinação do módulo de deformação de argamassas, bem como diversos formatos de corpo-de-prova empregados atualmente, de modo a se identificar a combinação “método de ensaio/formato de corpo-de-prova” mais adequada à determinação desta propriedade.

3 METODOLOGIA

Este trabalho baseia-se em uma pesquisa de iniciação científica realizada no Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, da Escola Politécnica da USP. Os dados e resultados apresentados a seguir encontram-se detalhados nos relatórios².

3.1 Apresentação e caracterização dos materiais utilizados

As características dos materiais empregados nas argamassas avaliadas encontram-se na Tabela 2 e na Figura 5.

Tabela 2 - Principais características dos materiais empregados no programa experimental.

| Material | Massa unitária (g/cm ³) NBR 7251 (ABNT, 1982) | Massa específica (g/cm ³) Picnômetro de gás Hélio ³ | Sílica e resíduo insolúvel NBR 6473 (ABNT, 2003) | Coefficiente de inchamento NBR 6467 (ABNT, 2006) |
|----------------------------------|--|---|---|---|
| Cimento CII-E-32 | 1,26 | 2,99 | - | - |
| Cal hidratada CH-I | 0,52 | 2,23 | 1,33% em massa | - |
| Areia quartzosa de rio (seca) | 1,21 | 2,62 | - | 1,38 |

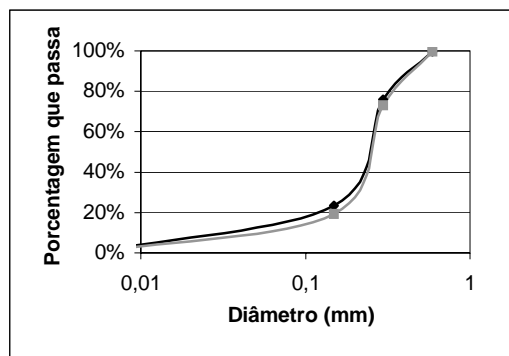


Figura 5 - Curvas granulométricas da areia, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2 Características das argamassas

Para analisar a capacidade dos ensaios diferenciarem argamassas distintas, foram estabelecidas duas dosagens de cimento, cal e areia: T1 – 1:0,5:4,5, de elevado teor de aglomerantes; e T2 – 1:2:9, de moderado teor de aglomerantes para revestimento. Os traços, definidos em volume úmido de areia, por ser uma situação comum em obras, foram convertidos para traços em massa de areia seca, de modo a tornar a dosagem precisa (Tabela 3). Também na Tabela 3, são apresentadas as quantidades utilizadas para a produção de 24 litros de argamassa - volume utilizado na produção de uma série de corpos-de-prova. A produção foi feita em misturador de eixo horizontal, sendo que o teor de água foi determinado experimentalmente, de acordo com a BS 4551 (BSI, 1990), que recomenda que argamassas de revestimento tenham um índice de penetração pelo “*dropping-ball*” (ensaio descrito pela mesma norma) de 10±1mm.

Tabela 3 - Traços e proporção dos materiais necessários a uma moldagem.

| Material | T1 | | | | T2 | | | |
|--------------------------------------|---------|--------|--------|------|---------|--------|--------|------|
| | cimento | cal | areia | água | cimento | cal | areia | água |
| Traço em volume úmido | 1,0 | 0,5 | 4,5 | - | 1,0 | 2,0 | 9,0 | - |
| Traço em massa seca | 1,0 | 0,2 | 3,8 | - | 1,0 | 0,8 | 7,6 | - |
| Quantidade necessária a uma moldagem | 9,2kg | 1,93kg | 35,0kg | 8,5L | 4,6kg | 3,78kg | 35,0kg | |

² Disponíveis em <http://geocities.yahoo.com.br/fernanda.belizario/principal.html>

³ Procedimento de laboratório disponível em SILVA e BARROS (2007).

Os resultados da caracterização da argamassa no estado fresco encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização das argamassas no estado fresco.

| Traço | Densidade de massa aparente (g/cm ³) | Índice de penetração pelo “dropping-ball” (mm) |
|-------|---|---|
| | NBR 13278 (ABNT, 2005) | BS 4551 (BSI, 1990) |
| T1 | 2,11 | 10,8 |
| T2 | 2,00 | 9,0 |

3.3 Caracterização no estado endurecido

Os ensaios empregados na caracterização no estado endurecido das argamassas avaliadas apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaios de caracterização no estado endurecido e quantidade de corpos-de-prova.

| Ensaio | Referência | número de corpos-de-prova (T1/T2) | | | | |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|----------|-------|-------|--------|
| | | Barra | Cilindro | Cubo | Placa | Prisma |
| Densidade de massa aparente | NBR 13280 (ABNT, 2005) | 20/3 | 20/20 | 23/18 | 8/8 | 21/21 |
| Resistência à compressão | BS EN 1015-11 (BSI, 1999) | - | - | - | - | 4/5 |
| | adaptação da BS EN 1015-11 (BSI, 1999) | - | 4/4 | 3/5 | - | - |
| Módulo à compressão | adaptação da BS EN 1015-11 (BSI, 1999) e NBR 8522 (ABNT, 2003) | - | 10/10 | 10/10 | - | 12/11 |
| Resistência à tração na flexão | BS EN 1015-11 (BSI, 1999) | - | - | - | - | 8/8 |
| | Bastos (2001) | - | - | - | 3/3 | - |
| Módulo à tração na flexão | Bastos (2001) | - | - | - | 5/5 | - |
| Módulo pelo ultrassom | Silva e Barros (2007) | 20/3 | 20/20 | 23/18 | 8/8 | 21/21 |
| Módulo pela frequência de ressonância | NF B 10-511 (AFNOR, 1975) | 20/3 | - | - | - | - |

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas tabelas 5, 6 e 7, apresentam-se os resultados da caracterização no estado endurecido das argamassas. Os gráficos 1 e 2 servem de base para a análise comparativa referente aos resultados de módulo de deformação.

Tabela 6 - Resultados de densidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

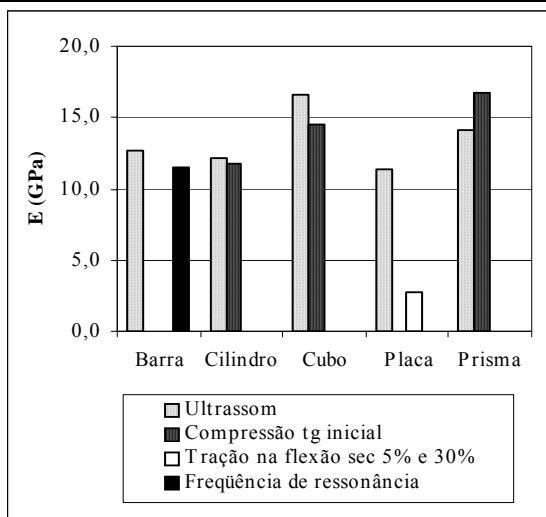
| Formato de corpo-de-prova | Densidade (g/cm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | | Resist. à tração na flexão (MPa) | |
|---------------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|----------------------------------|------|
| | T1 | T2 | T1 | T2 | T1 | T2 |
| Barra | 1,89 | 1,81 | - | - | - | - |
| Cilindro | 1,90 | 1,79 | 11,19 | 3,11 | - | - |
| Cubo | 1,92 | 1,74 | 16,14 | 2,39 | - | - |
| Placa | 1,86 | 1,78 | - | - | 2,11 | 0,78 |
| Prisma | 1,89 | 1,78 | 11,79 | 2,92 | 2,73 | 0,92 |

Tabela 7 - Resultados de módulo de deformação, para o traço T1, para diferentes métodos de ensaios e geometria dos corpos de prova.

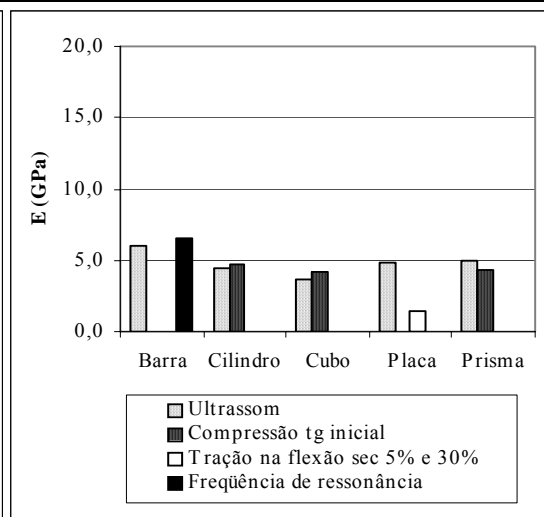
| Formato de corpo-de-prova | Ultrassom | | Compressão tangente inicial | | Tração na flexão | | Frequência de ressonância | |
|---------------------------|-----------|-------|-----------------------------|-------|------------------|-------|---------------------------|-------|
| | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. |
| Barra | 12,7 | 5,8% | - | - | - | - | 11,5 | 5,5% |
| Cilindro | 12,2 | 3,2% | 11,7 | 7,5% | - | - | - | - |
| Cubo | 16,6 | 1,9% | 14,6 | 26,4% | - | - | - | - |
| Placa | 11,3 | 2,1% | - | - | 2,8 | 32,4% | - | - |
| Prisma | 14,1 | 5,3% | 16,7 | 24,8% | - | - | - | - |

Tabela 8 - Resultados de módulo de deformação, para o traço T2, para diferentes métodos de ensaios e geometria dos corpos de prova.

| Formato de corpo-de-prova | Ultrassom | | Compressão tangente inicial | | Tração na flexão | | Frequência de ressonância | |
|---------------------------|-----------|-------|-----------------------------|-------|------------------|-------|---------------------------|-------|
| | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. |
| Barra | 6,0 | 5,5% | - | - | - | - | 6,5 | 5,1% |
| Cilindro | 4,4 | 3,3% | 4,8 | 9,1% | - | - | - | - |
| Cubo | 3,7 | 4,9% | 4,1 | 24,4% | - | - | - | - |
| Placa | 4,9 | 6,4% | - | - | 1,4 | 10,3% | - | - |
| Prisma | 5,0 | 5,0% | 4,3 | 18,2% | - | - | - | - |

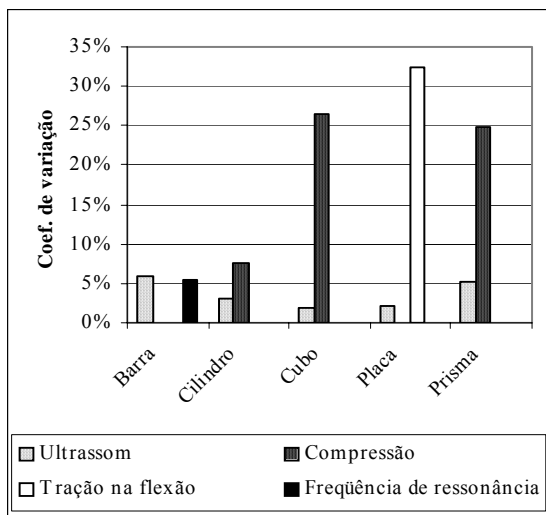


(a)

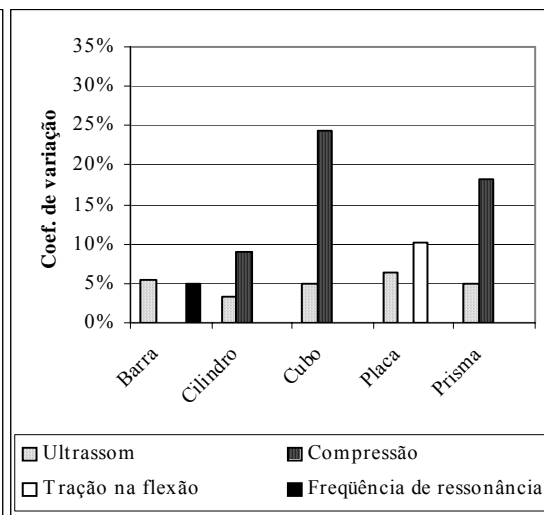


(b)

Gráfico 2 - Resultados de módulo de deformação: (a) para o traço T1; (b) para o traço T2.



(a)



(b)

Gráfico 3 - Dados de variabilidade do módulo de deformação: (a) para o traço T1; (b) para o traço T2.

Um dos principais pontos a ser observado é a coincidência, em termos práticos, entre os módulos dinâmicos entre si e entre os módulos dinâmicos e o módulo tangente inicial à compressão para ambos os traços. Isso indica que os ensaios dinâmicos são capazes de caracterizar corretamente as argamassas, ao menos no trecho elástico. Além disso, outro aspecto a ser observado é a baixa variabilidade de seus resultados em relação aos obtidos pelos ensaios estáticos. Isto evidencia que a variabilidade inerente aos resultados estáticos deve ser atribuída aos métodos de ensaio e não à natureza do material, caso em que as variações seriam apontadas pelos ensaios dinâmicos. Os fatores que contribuem para a alta variabilidade dos ensaios estáticos serão relacionados adiante, quando forem abordados os aspectos executivos relativos a cada método.

O módulo de deformação obtido pelo ensaio à tração na flexão é muito menor do que os outros tipos de módulo, dada a natureza distinta do esforço envolvido neste ensaio. A grande variabilidade observada pelo ensaio de módulo à tração na flexão para o traço T1 também ocorreu nos estudos de BASTOS (2001). Este autor empregou uma argamassa 1:1:6 (traço próximo ao T1) e obteve módulo igual a 4,7GPa, com coeficiente de variação de 34%. Todos os ensaios foram capazes de distinguir argamassas de composições diferentes.

No que concerne os formatos de corpo-de-prova, percebe-se que o cubo e o prisma apresentaram comportamentos distintos dos outros formatos, o que é demonstrado pelos valores superiores de módulo pelo ultrassom. Se considerados os resultados de ensaio à compressão, percebe-se que o cubo e o prisma apresentaram resistência, módulo e coeficientes de variação maiores do que os resultados obtidos com o cilindro, sendo esta diferença mais nítida para o traço T1. Dada a grande variabilidade e o módulo pelo ultrassom distinto dos outros formatos, é possível afirmar que o cubo e o prisma não representem exatamente o comportamento mecânico das argamassas estudadas.

Para verificar a coerência dos valores de módulo de deformação obtidos, além da comparação do resultado de módulo à tração na flexão com BASTOS (2001), os dados foram confrontados com os obtidos por MONTE et al. (2005). O traço forte adotado por estes autores é igual ao traço T1, já o traço fraco é 1:3:12, menos resistente que o T2 (1:2:9). O formato de corpo-de-prova adotado é o prismático.

Tabela 9 - Comparação entre resultados de módulo desta pesquisa e os obtidos por MONTE et al. (2005).

| Traço | Esta pesquisa | | | | Monte et al. (2005) | | | |
|--------------|---------------|-------|-----------------------------|-------|---------------------|-------|-----------------------------|-------|
| | Ultrassom | | Compressão tangente inicial | | Ultrassom | | Compressão tangente inicial | |
| | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. | E (GPa) | C. V. |
| Prisma forte | 14,1 | 5,3% | 16,7 | 24,8% | 13,9 | 8% | 12,8 | 19% |
| Prisma fraco | 5,0 | 5,0% | 4,3 | 18,2% | 4,36 | 9% | 3,43 | 5% |

Nota-se que os valores obtidos são muito próximos, exceto pela compressão do traço T1, em que o resultado da presente pesquisa se apresentou um pouco maior do que o obtido por MONTE et al. (2005). Além disso, a tendência dos ensaios estáticos apresentarem maior variabilidade observou-se para o traço T1, e não para o mais fraco. Isso se justifica, provavelmente, pela ruptura precoce e em níveis de tensão muito próximos dos corpos-de-prova de traço mais fraco, o que se reflete no ensaio estático de módulo à compressão, diminuindo assim os níveis de variação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações apresentadas na sequência levam em conta os resultados apresentados, bem como as características práticas inerentes a cada ensaio.

5.1 A respeito dos métodos de ensaio

Tanto o ensaio pelo ultrassom quanto o de frequência de ressonância são de fácil e rápida execução: tempos de ensaio, respectivamente, de cerca de 2 e 5 min por corpo-de-prova. Além disso, apresentam a vantagem de serem não-destrutivos. O equipamento do ensaio de ultrassom tem custo menor que o de frequência de ressonância e é de mais fácil obtenção. Ambos são ensaios adotados internacionalmente, mas ainda pouco difundidos no Brasil. Entretanto, ambos fornecem somente o módulo tangente inicial, o que restringe a avaliação do comportamento das argamassas ao seu trecho elástico.

Entre os métodos estáticos, o ensaio de módulo de deformação à compressão é o mais frequentemente adotado no Brasil. Apresenta a vantagem de fornecer a curva tensão-deformação, o que permite analisar o comportamento do material fora do seu trecho elástico. Entretanto, é necessário pessoal especializado para sua execução, pois exige um posicionamento criterioso do instrumento de medida (os extensômetros devem ficar na vertical e corretamente afixados, de modo a evitar escorregamentos). Além disso, o tempo de ensaio é longo (aproximadamente 20 min por corpo-de-prova, para o traço mais forte), o equipamento é caro e o esforço aplicado não representa o mais comum em argamassas

de revestimento. Apesar do grande número de publicações brasileiras baseadas neste ensaio, é difícil compará-las e estabelecer o verdadeiro significado dos seus dados, pois não há um padrão para a sua realização. Com isso, há uma grande variação dos parâmetros que interferem nos resultados do ensaio à compressão, tais quais: tipo de prensa, equipamentos de medição de carga e deformação, forma de aplicação do carregamento e método para cálculo do módulo de deformação.

O ensaio de avaliação do módulo pela tração na flexão, além de também fornecer a curva tensão-deformação, apresenta uma vantagem adicional, pois representa uma situação de esforços mais próxima das argamassas de revestimento. Pelas mesmas razões do ensaio de compressão, este método também exige pessoal especializado, além de ser necessário um lixamento cuidadoso da face de moldagem dos corpos-de-prova em forma de placa. O tempo de ensaio também é longo (cerca de 15 min por corpo-de-prova, para o traço T1) e o equipamento é de alto custo. É um ensaio ainda pouco estudado no Brasil, embora apresente potencial (devido à sua representatividade) para que seja analisado mais profundamente.

5.2 A respeito dos formatos de corpo-de-prova

O cilindro foi o formato que apresentou os melhores resultados, com o menor nível de variabilidade. Com um consumo baixo de argamassa por corpo-de-prova (0,20L) e uso muito difundido no Brasil, sua principal desvantagem é que necessita de capeamento com enxofre para os ensaios estáticos de resistência e módulo à compressão. O prisma também apresentou bons resultados, ainda que com níveis de variabilidade significativamente maiores. Este formato também apresenta algumas vantagens: é o formato previsto na norma brasileira NBR 13279 (ABNT, 2005) e em outras normas internacionais, sendo, portanto de uso difundido. Uma desvantagem deste formato é que não se sabe até que ponto o ensaio de tração na flexão, cuja realização previamente ao de resistência ou módulo à compressão é necessária, influencia nos resultados destes últimos.

O cubo, por sua vez, apresentou resultados muito variáveis. Além de consumir 1L de argamassa para cada corpo-de-prova, uma desvantagem adicional é que este formato requer prensas com alta capacidade de carga para rompê-lo, principalmente para as argamassas mais fortes.

Tanto a placa como a barra são de uso menos difundido no Brasil para determinação do módulo de deformação. A placa apresenta a vantagem de ter dimensões mais próximas de um revestimento de argamassa. A moldagem dos corpos-de-prova em forma de barra foi difícil, devido à reduzida seção transversal deste formato. Seu grande comprimento provocou um alto nível de retração, com grande perda de corpos-de-prova do traço T2 por fissuração (17 em 20). Além disso, resultou em corpos-de-prova muito sensíveis ao manuseio. Este formato não pode ser submetido a nenhum ensaio estático.

Sendo assim, conclui-se que a melhor combinação “método de ensaio/formato de corpo-de-prova” é “módulo de deformação pelo ultrassom/cilindro”. Quando for necessária uma caracterização mais detalhada da deformabilidade da argamassa, recomenda-se o emprego do ensaio de módulo estático à compressão, também com o corpo-de-prova cilíndrico. Apesar do melhor desempenho do corpo-de-prova cilíndrico, o formato atualmente previsto pela norma brasileira (NBR 13279 (ABNT, 2005)) para argamassas é o prisma. Isto justifica o emprego deste último formato, mas também sugere que discussões sejam feitas acerca deste parâmetro da norma atual, até para que normalizações posteriores sejam elaboradas segundo o formato de corpo-de-prova mais representativo.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da composição granulométrica – NBR NM 248**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Agregados – determinação do inchamento de agregado miúdo – método de ensaio – NBR 6467**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Cal virgem e cal hidratada – análise química – NBR 6473**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Projeto de estruturas de madeira – NBR 7190**. Rio de Janeiro, 1997.

- _____. **Agregados em estado solto – determinação da massa unitária – NBR 7251.** Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação – NBR 8522.** Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica – NBR 8802.** Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado – NBR 13278.** Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – NBR 13279.** Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido – NBR 13280.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION – **NF B 10-511 – Produits de carrières pierres calcaires – mesure du module d’élasticité dynamique.** Paris, AFNOR, 1975.
- BASTOS, P. K. X. **Módulo de deformação de argamassas – conceitos e métodos de determinação.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBTA, 2003. p. 27-40.
- BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.** 2001. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Methods of testing mortars, screeds and plasters – BS 4551.** Londres, 1980.
- _____. **Methods of test mortar for masonry – Determination of flexure and compressive strength of hardened mortar – BS EN 1015-11.** Londres, 1999.
- _____. **Testing concrete – Method for determination of static modulus of elasticity in compression – BS 1881: Part 121.** Londres, 1983.
- _____. **Testing concrete – Recommendations for measurement of dynamic modulus of elasticity – BS 1881: Part 209.** Londres, 1990.
- _____. **Testing concrete – Determination of ultrasonic pulse velocity – BS EN 12504-4.** Londres, 2004.
- JONES, R. **Les essais non destructifs des bétons.** Paris: Éditions Eryolles, 1967. 165p.
- MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MONTE et al. **Relatório interlaboratorial – módulo de elasticidade dinâmico.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Novembro, 2005 (Relatório interno).
- SABBATINI, F. H; et al. **Conceitos básicos sobre a execução de revestimentos argamassados.** 1989.
- SILVA, F. B.; BARROS, M. M. S. B. **Relatórios de iniciação científica** disponíveis em <http://geocities.yahoo.com.br/fernanda.belizario/principal.html>, em 29/01/2008.

7 AGRADecIMENTOS

À FAPESP, pela bolsa de iniciação científica concedida. Ao Consórcio Setorial para Inovação em Tecnologia de Revestimentos de Argamassa (CONSITRA), pelo apoio dado ao desenvolvimento deste trabalho. Às empresas Votorantim, Cobrascal e Engemix, pelas doações de material que viabilizaram a execução do programa experimental.