



## MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Narciso Gonçalves da Silva (UTFPR) [ngsilva@cefetpr.br](mailto:ngsilva@cefetpr.br)  
Vicente Coney Campiteli (UEPG) [vicente@uepg.br](mailto:vicente@uepg.br)

### Resumo

*A qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão diretamente ligadas à capacidade de absorver deformações, que são medidas através do módulo de elasticidade. Este trabalho teve por objetivo verificar a influência das resistências mecânicas, bem como o proporcionamento de cimento, cal e areia, no módulo de elasticidade calculado pelo método dinâmico, utilizando o PUNDIT. Avaliou, também, a influência de dois tipos de areia. Foram utilizados cimento CP II Z 32 e cal virgem moída. Para o estudo experimental foram produzidas 18 argamassas, 9 com areia natural e 9 com areia britada. Com as argamassas produzidas, foram moldados corpos de provas cilíndricos de 5x10 cm, prismáticos de 4x4x16 cm e revestidos painéis de 80x100 cm, com 2 cm de espessura, para ensaio de resistência de aderência à tração e observação do surgimento de fissuras. Os resultados mostraram que as argamassas produzidas com areia britada possuem maior módulo de elasticidade do que aquelas com areia natural, provocando, assim, maior número de fissuras no revestimento. À medida que aumentam as relações agregado/aglomerante e cal/cimento, diminuem as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade.*

**Palavras-chave:** módulo de elasticidade, deformação, argamassa, revestimento.

### 1. Introdução

Elasticidade é a capacidade de deformação que as argamassas apresentam sem que ocorra ruptura, retornando às suas dimensões iniciais quando cessam as solicitações que lhes são impostas (CINCOTTO et al., 1995). Então, a ocorrência de fissuras num revestimento de argamassa decorre da elasticidade e resistências à tração inadequadas diante das tensões de tração resultantes da retração de secagem, retração térmica ou ações externas ao revestimento.

O módulo de elasticidade está relacionado ao comportamento elástico do revestimento e pode fornecer informações a respeito da deformabilidade e da rigidez de um revestimento de argamassa. Esta propriedade mecânica é de grande interesse, pois está ligada aos fenômenos patológicos dos revestimentos de argamassa, em especial, as fissuras.

## 2. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi constatar através de um estudo experimental que os fatores que interferem na resistência de compressão, na resistência à tração na flexão e na resistência de aderência à tração, influenciam, também, no resultado do módulo de elasticidade e que o tempo de propagação da onda ultra-sônica, através de um revestimento, pode ser utilizado para caracterizar as propriedades mecânicas da argamassa no estado endurecido.

## 3. Formatação de ilustrações, diagramas, tabelas e quadros

### 3.1. Materiais

Para a produção das argamassas foram empregados os seguintes materiais: cimento Portland CP II Z 32, cal virgem moída CV-C, areia proveniente da bacia do Rio Iguaçu da cidade de Curitiba-PR (areia natural) e areia obtida através da britagem de rocha calcária calcítica, proveniente de pedreira do município de Rio Branco do Sul-PR, produzida através de moinho de bola. A areia natural foi preparada por peneiramento para obter uma granulometria aproximada da areia britada. As Tabelas 1 e 2 apresentam as análises granulométricas e as caracterizações físicas das areias.

Tabela 1 – Análise granulométrica da areia britada e natural (NBR 7217/83)

Abertura da peneira	Areia britada		Areia natural	
	% retida individual	% retida acumulada	% retida individual	% retida acumulada
4,8	0,27	0,27	0,22	0,22
2,4	4,10	4,37	3,20	3,42
1,2	13,10	17,47	10,72	14,14
0,6	19,97	37,44	31,22	45,36
0,3	27,71	65,15	32,46	77,82
0,15	27,07	92,22	17,21	95,03
< 0,15	7,78	100,00	4,97	100,00
Total	100,00	-	100,00	-

Tabela 2 – Caracterizações físicas da areia britada e natural

Ensaio realizado	Unidade	Norma	Resultado médio	
			Areia britada	Areia natural
Módulo de finura	-	NBR 7217/83	2,17	2,36
Classificação	-	NBR 7211/83	fina-zona 2	fina-zona 2
Massa unitária – estado solto	(g/cm <sup>3</sup> )	NBR 7251/82	1,592	1,492
Massa específica	(g/cm <sup>3</sup> )	NBR 9776/87	2,778	2,632
Absorção de água	(%)	NBR 9777/87	0,735	0,809
Teor de material pulverulento	(%)	NBR 7219/87	5,95	2,10

### 3.2. Confeção das argamassas

Na preparação das argamassas foi utilizada pasta de cal, confeccionada a partir da hidratação da cal virgem moída, a qual ficou em processo de maturação por aproximadamente 30 dias em recipiente fechado e vedado com lona plástica. Após a maturação, amostras de pasta de cal foram colocadas em estufa à 105°C, por aproximadamente 96 horas, para desidratação e determinação do teor de água (75,44%). Destorrou-se a cal hidratada seca das amostras e com o pó, após peneiramento (malha 0,6 mm), determinou-se a massa unitária e a massa específica, cujos resultados médios estão apresentados na Tabela 3. As proporções dos materiais, em massa, foram definidas a partir da determinação da massa unitária do cimento, da cal hidratada em pó<sup>1</sup> e das areias. As argamassas foram preparadas fazendo a mistura em massa de cimento, pasta de cal e areia em betoneira de eixo inclinado de capacidade de 120 litros, através de procedimentos padronizados. Foi adicionada água na mistura para se obter um índice de consistência (I.C.) na mesa (NBR 7215/1996) de 270 mm ± 10 mm para todas as argamassas.

Tabela 3 - Caracterização física do cimento CII Z 32 e da cal hidratada em pó

Ensaio	Método	Cimento	Cal
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 7251/82	1,197	0,689
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 6474 /84	2,946	2,393

### 3.3. Revestimento dos painéis

Foram construídas três paredes de alvenaria de 400 cm de largura por 240 cm de altura, utilizando blocos cerâmicos de 6 furos, chapiscadas com argamassa de cimento e areia no traço 1 : 3, em volume. Decorridos trinta dias, foram revestidos painéis de 80 cm de largura por 100 cm de altura e espessura de 2 cm. Após o lançamento da argamassa, fez-se o sarrafeamento e esperou-se 15 minutos para execução do desempenho.

### 3.4. Ensaio realizados

Com as argamassas produzidas, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm para determinar a densidade de massa no estado endurecido (NBR 13280/1995) aos 371 dias de idade, resistência à compressão (NBR 13279/1995) aos 56 dias de idade e módulo de elasticidade dinâmico (BS-1881 Part 203/1986) aos 371 dias de idade. Moldaram-se, também, corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm, para determinar a resistência à tração na flexão aos 84 dias de idade, utilizando a norma DIN EN 1015 – Part 11 (1999). Os corpos de prova foram desmoldados com 1 dia de idade e mantidos em ambiente de laboratório até o momento do ensaio. No revestimento, realizou-se o ensaio para determinação da resistência de

---

<sup>1</sup> Massa de cal hidratada em pó é igual a massa de pasta de cal menos 75,44% de água contida na pasta. Por exemplo: o traço 1 : 1 : 4 (cimento : cal hidratada em pó : areia britada seca), em volume, transformado para massa (utilizando as massas unitárias) corresponde a 1 : 0,58 : 5,32. Então, 0,58 gramas de cal hidratada em pó corresponde a 1,02 gramas de pasta de cal, sendo 0,44 gramas (75,44% de 0,58) a quantidade de água contida na pasta.

aderência à tração na idade de 84 dias, seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 13528/1995.

#### 4. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) foi determinado utilizando a Equação 1, de acordo com a norma BS-1881 Part 203.

$$E_d = \gamma \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (1)$$

Onde:

$\gamma$  = densidade de massa no estado endurecido (em  $\text{kg/m}^3$ );

$v$  = velocidade com que a onda ultra-sônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal (em  $\text{km/s}$ );

$\nu$  = coeficiente de Poisson que, segundo CALLISTER (2002), é a razão entre a deformação transversal e longitudinal quando, um corpo de prova é submetido a uma carga de compressão axial. Segundo CARNEIRO (1999), para argamassas o coeficiente varia de 0,10 a 0,20, sendo tanto menor quanto menor for a capacidade de deformação da argamassa. Foi adotado o valor de 0,20.

A velocidade da onda ultra-sônica foi obtida utilizando a Equação 2.

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Onde:

$d$  = altura do corpo de prova (em  $\text{km}$ );

$t$  = tempo (em segundos) que a onda ultra-sônica leva para percorrer a distância  $d$  obtido através do equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Determinação do tempo que a onda ultra-sônica percorre o corpo de prova 5x10 cm



## 5. Resultados e discussões

As Tabelas 4 e 5 apresentam as caracterizações das argamassas no estado fresco, produzidas com areia natural e com areia britada, respectivamente.

Tabela 4 – Caracterização das argamassas com areia natural

Proporções (cimento : cal : areia seca)		Relações em massa (kg/kg)				I.C. (mm)
volume	massa	água/ cimento	água/ mat.secos	cal/ cimento	agregr./ aglomer.	
1 : 1 : 4	1 : 0,58 : 4,99	1,58	0,2405	0,58	3,16	260
1 : 1 : 6	1 : 0,58 : 7,48	2,16	0,2389	0,58	4,75	270
1 : 1 : 8	1 : 0,58 : 9,97	2,74	0,2377	0,58	6,33	265
1 : 2 : 6	1 : 1,15 : 7,48	2,74	0,2845	1,15	3,48	265
1 : 2 : 9	1 : 1,15 : 11,22	3,38	0,2526	1,15	5,21	270
1 : 2 : 12	1 : 1,15 : 14,96	4,45	0,2599	1,15	6,95	280
1 : 3 : 8	1 : 1,73 : 9,97	3,88	0,3055	1,73	3,66	270
1 : 3 : 12	1 : 1,73 : 14,96	4,92	0,2781	1,73	5,49	265
1 : 3 : 16	1 : 1,73 : 19,94	6,12	0,2701	1,73	7,31	260

Tabela 5 – Caracterização das argamassas com areia britada

Proporções (cimento : cal : areia seca)		Relações em massa (kg/kg)				I.C. (mm)
volume	massa	água/ cimento	água/ mat.secos	cal/ cimento	agregr./ aglomer.	
1 : 1 : 4	1 : 0,58 : 5,32	1,56	0,2258	0,58	3,37	260
1 : 1 : 6	1 : 0,58 : 7,98	2,23	0,2334	0,58	5,06	270
1 : 1 : 8	1 : 0,58 : 10,64	2,63	0,2157	0,58	6,75	265
1 : 2 : 6	1 : 1,15 : 7,98	2,68	0,2642	1,15	3,71	265
1 : 2 : 9	1 : 1,15 : 11,97	3,42	0,2419	1,15	5,56	270
1 : 2 : 12	1 : 1,15 : 15,96	4,23	0,2336	1,15	7,42	280
1 : 3 : 8	1 : 1,73 : 10,64	3,78	0,2828	1,73	3,90	270
1 : 3 : 12	1 : 1,73 : 15,96	4,92	0,2634	1,73	5,85	265
1 : 3 : 16	1 : 1,73 : 19,94	6,02	0,2508	1,73	7,80	260

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados médios da densidade de massa no estado endurecido aos 371 dias de idade, tempo de propagação da onda ultra-sônica, resistência à compressão aos 56 dias de idade, resistência à tração na flexão aos 84 dias de idade, resistência de aderência à tração aos 84 dias de idade e o módulo de elasticidade aos 371 dias de idade para as argamassas produzidas com areia natural e com areia britada, respectivamente.

Tabela 6 – Resultados médios dos ensaios nas argamassas produzidas com areia natural

Argamassa	Resultados médios					
	Densidade de massa no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de propagação da onda ultra-sônica (μs)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência de aderência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
1 : 1 : 4 NAT	1789	44,7	6,46	1,64	0,28	8,05
1 : 1 : 6 NAT	1775	61,0	2,87	0,78	0,27	4,11
1 : 1 : 8 NAT	1764	71,4	1,64	0,44	0,18	3,09
1 : 2 : 6 NAT	1649	80,3	1,79	0,61	0,20	2,29
1 : 2 : 9 NAT	1670	99,4	0,91	0,32	0,18	1,49
1 : 2 : 12 NAT	1657	123,0	0,42	0,15	0,12	0,98
1 : 3 : 8 NAT	1579	103,6	0,78	0,31	0,13	1,31
1 : 3 : 12 NAT	1610	136,2	0,39	0,17	0,09	0,77
1 : 3 : 16 NAT	1604	146,2	0,25	0,14	0,10	0,67

Tabela 7 - Resultados médios dos ensaios nas argamassas produzidas com areia britada

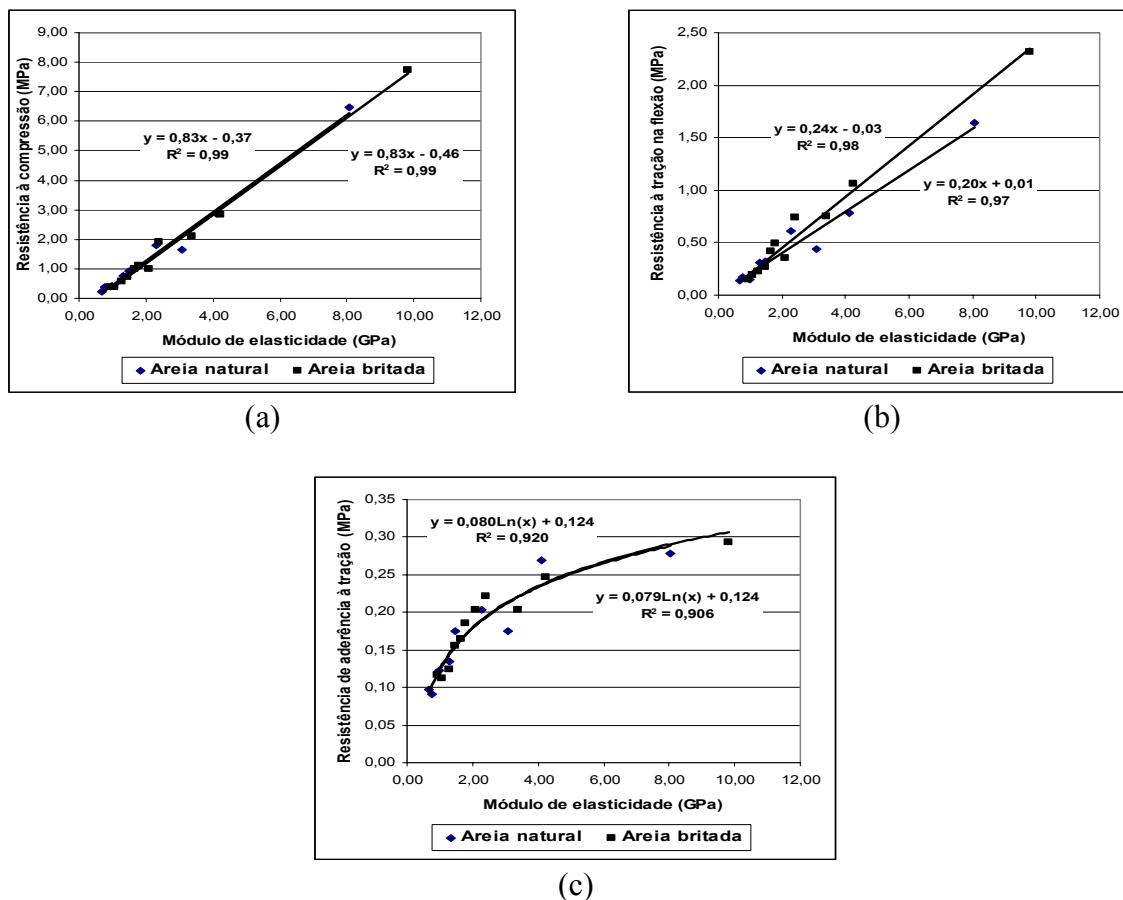
Argamassa	Resultados médios					
	Densidade de massa no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	Tempo de propagação da onda ultra-sônica (μs)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência de aderência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
1 : 1 : 4 BR	1899	42,0	7,73	2,32	0,29	9,81
1 : 1 : 6 BR	1827	63,1	2,82	1,07	0,25	4,23
1 : 1 : 8 BR	1850	70,4	2,10	0,75	0,20	3,39
1 : 2 : 6 BR	1710	79,9	1,92	0,74	0,22	2,41
1 : 2 : 9 BR	1751	94,9	1,12	0,50	0,19	1,78
1 : 2 : 12 BR	1781	104,7	0,74	0,27	0,16	1,46
1 : 3 : 8 BR	1671	94,6	0,99	0,42	0,16	1,66
1 : 3 : 12 BR	1689	108,4	0,57	0,23	0,12	1,28
1 : 3 : 16 BR	1728	119,9	0,38	0,19	0,11	1,08

Segundo SILVA (2006), o fato de o módulo de elasticidade ser maior para as argamassas com areia britada possivelmente é devido ao maior teor de material pulverulento, com isso, apresenta um grau de empacotamento maior e, conseqüentemente, maior densidade de massa. O consumo de água nas argamassas com areia britada foi menor e isso também pode ter favorecido para aumentar o módulo de elasticidade nas argamassas produzidas com este agregado, já que as resistências mecânicas são inversamente proporcionais à relação água/cimento.

Os resultados das Tabela 6 e 7 mostram que as resistências à compressão, à tração na flexão, de aderência à tração e, também, o módulo de elasticidade diminuem com o aumento da relação agregado/aglomerante, para as argamassas com mesma relação cal/cimento,

independentemente do tipo de areia. Com o aumento da relação cal/cimento, as resistências e o módulo de elasticidade apresentam uma redução mais acentuada, nas argamassas com mesma relação agregado/aglomerante. Com isso, constata-se que o teor de cimento é variável determinante nos resultados das resistências mecânicas. As resistências mecânicas influenciam no resultado do módulo de elasticidade, pois, como mostra a Figura 2, existem correlações entre módulo de elasticidade e resistências mecânicas, com expressivos coeficientes de determinação.

Figura 2 – Correlação entre módulo de elasticidade aos 371 dias de idade e: (a) resistência à compressão aos 56 dias de idade; (b) resistência à tração na flexão aos 84 dias de idade; (c) resistência de aderência à tração aos 84 dias de idade

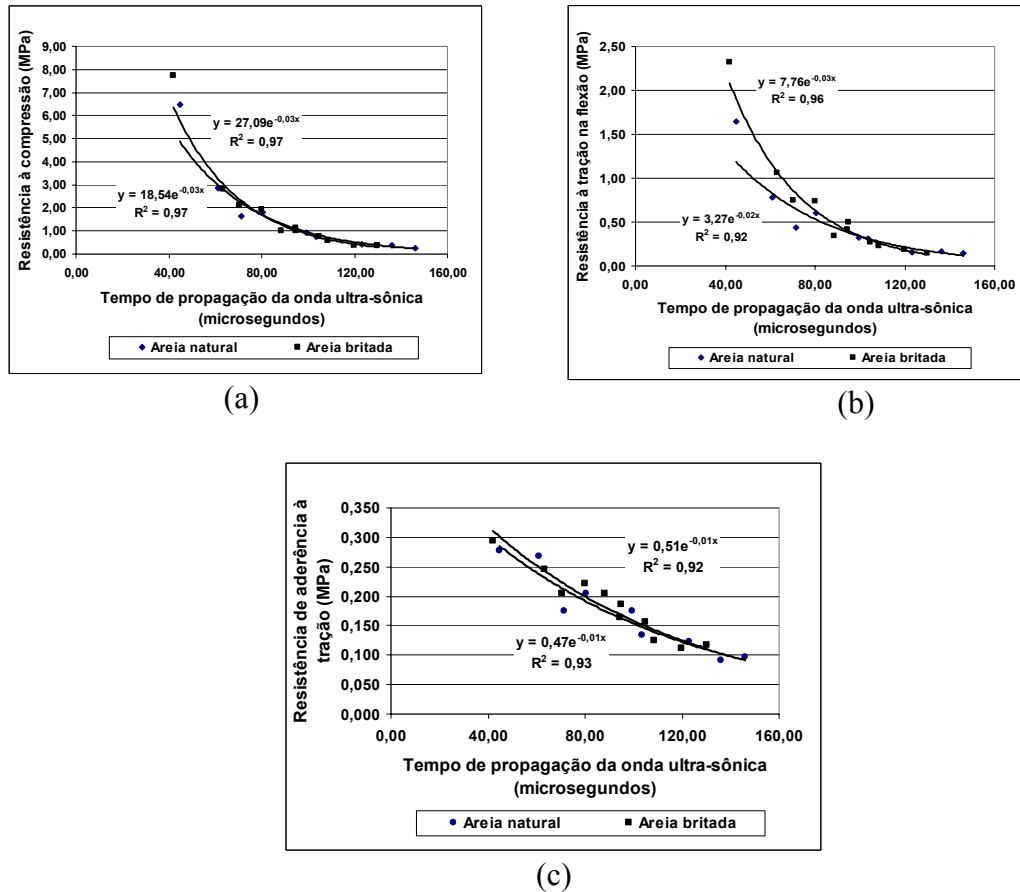


O tempo de propagação da onda ultra-sônica é diretamente proporcional às relações cal/cimento e agregado/aglomerante, conforme pode ser constatado pelos resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7. Com o aumento da compactidade do conjunto aglomerante e agregado, aumenta a densidade de massa, devido, principalmente, ao aumento do teor de material pulverulento e diminuição do teor de água. Com isso, a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é maior e, conseqüentemente, o tempo de propagação da onda é menor, aumentando, assim, o módulo de elasticidade.

A Figura 3 apresenta as correlações exponenciais entre o tempo de propagação da onda ultra-sônica e as resistências mecânicas para as argamassas de areia natural e areia britada, obtidas a partir dos dados das Tabelas 6 e 7. É possível, então, a partir do tempo de propagação da onda ultra-sônica, estimar valores para as resistências mecânicas de uma

argamassa, dentro de um certo índice de confiabilidade, desde que conhecidos o proporcionamento e os materiais constituintes.

Figura 3 – Correlação entre tempo de propagação da onda ultra-sônica com: (a) resistência à compressão; (b) resistência à tração na flexão e (c) resistência de aderência à tração



Na idade de 84 dias antes da execução do ensaio de resistência de aderência à tração foi contado o número de fissuras visíveis em cada revestimento de argamassa. Utilizando barbante, foi determinado o comprimento linear total das fissuras e dividido pela área do painel. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da contagem e medida do comprimento linear total (em cm) por área (em m<sup>2</sup>) das fissuras visíveis nos revestimentos na idade de 84 dias

Arg	Areia natural		Areia britada	
	quantidade	cm/m <sup>2</sup>	quantidade	cm/m <sup>2</sup>
1 : 1 : 4	25	287,5	70	1005,0
1 : 1 : 6	1	32,5	15	177,5
1 : 1 : 8	0	-	1	15,0
1 : 2 : 6	20	237,5	83	1140,0
1 : 2 : 9	0	-	27	262,5
1 : 2 : 12	0	-	7	65,0
1 : 3 : 8	43	493,8	107	1437,5
1 : 3 : 12	1	6,3	20	170,0
1 : 3 : 16	0	-	11	100,0



As argamassas produzidas com areia britada possuem maiores módulos de elasticidade que as argamassas com areia natural, conforme mostram as Tabelas 6 e 7. Este fato explica o maior número de fissuras nos revestimentos de areia britada, com relação aos revestimentos de areia natural que possuem o mesmo proporcionamento de materiais.

## 6. Considerações finais

O módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez da argamassa no estado endurecido que é proporcionado pelo cimento hidratado, pelo embricamento entre as partículas dos agregados, devido à forma e rugosidades dos grãos, e pelo teor de material pulverulento. O consumo de água e o teor de cimento são variáveis determinantes nas resistências à compressão, à tração na flexão e de aderência à tração, que influenciam diretamente no módulo de elasticidade.

A diminuição da fissuração nos revestimentos de argamassas com areia britada ocorreu devido, principalmente, à diminuição do teor de cimento. Com isso há uma redução das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade, bem como o tempo (ou velocidade) de propagação da onda ultra-sônica, são variáveis importantes que podem ser utilizadas para monitorar o desempenho de um revestimento de argamassa quanto às resistências mecânicas e quanto ao surgimento de fissuras. Além disso, o ensaio para determinação do módulo de elasticidade pelo método dinâmico, utilizando aparelhos de medição de ondas ultra-sônicas, além de rápido, é de fácil execução e não destrutível.

## Referências

- CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim técnico n. 68.
- BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. São Paulo, 2001. 172 p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- CALLISTER, W. D. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 589 p.
- CARASEK, H. **Aderência de argamassa à base de cimento portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. 203 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. São Paulo, 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SILVA, N. G. **Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Curitiba, 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.