

Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia

Correlation between modulus of elasticity dynamic and mechanical strengths of cement mortars and sand with lime addition

Narciso Gonçalves da Silva
Vicente Coney Campiteli

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 de britagem. Com as argamassas produzidas, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm, prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm e revestidos painéis de 80 cm x 100 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 de britagem possuem maior módulo de elasticidade do que aquelas produzidas com areia natural, resultando em um maior número de fissuras no revestimento. À medida que aumentam as relações entre areia/aglomerante e cal/cimento, diminuem as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade. Deformação. Argamassa. Revestimento.

Abstract

The quality and the durability of a mortar covering are directly related its capacity to absorb deformations, which are measured by the modulus of elasticity (Young's modulus). This work investigated the influence of the cement, lime, and sand on the mechanical strengths and modulus of elasticity of rendering mortars, the latter calculated by the dynamic method using the PUNDIT. The effects of a natural and artificial (crushed rock) sand were also evaluated. Cement CP II Z 32 and ground lime were used to prepare 18 mortars (9 with natural sand and 9 with crushed rock sand). Cylindrical 5 cm x 10 cm and prismatic 4 cm x 4 cm x 16 cm specimens were cast for the tests. Masonry panels 80 cm x 100 cm were built and covered by a 2cm thick layer of each mortar for pull-out tests and cracks observations. The results showed that the mortars with crushed rock sand have higher modulus of elasticity than the mortars produced with natural sand, resulting in more cracks in the renderings. It was verified that the higher the sand/agglomerate and lime/cement ratios, the lower the mechanical strengths and the modulus of elasticity.

Keywords: Modulus of elasticity. Deformation. Mortar. Covering.

Narciso Gonçalves da Silva
Universidade Tecnológica
Federal do Paraná
Avenida Sete de Setembro,
3165
Curitiba - PR - Brasil
CEP 80230-901
Tel.: (41) 3310-4649
E-mail: ngsilva@utfpr.edu.br

Vicente Coney Campiteli
Programa de Pós-Graduação em
Construção Civil
Universidade Federal do Paraná
Avenida General Carlos
Cavalcanti, 4748
Ponta Grossa - PR - Brasil
CEP 94010-330
Tel.: (42) 3220-3077
E-mail: vicente@uepg.br

Recebido em 17/04/06

Aceito em 12/12/08

Introdução

As deformações no concreto, que freqüentemente levam à fissuração, ocorrem como um resultado da resposta do material à carga externa e ao meio ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Um material é considerado perfeitamente elástico se surgem e desaparecem deformações imediatamente após a aplicação ou retirada de tensões (NEVILLE, 1997). Em certos materiais, quando submetidos a uma tensão de tração em níveis relativamente baixos, a tensão (σ) e a deformação (ϵ) são proporcionais entre si, de acordo com a relação $\sigma = E \cdot \epsilon$, conhecida por Lei de Hooke, onde E é o módulo de elasticidade, considerado como sendo uma rigidez ou uma resistência do material à deformação elástica (CALLISTER, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A norma NBR 8522:1984 especifica um método para a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do concreto em corpos-de-prova cilíndricos. Em setembro de 2008, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou a NBR 15630, que prescreve os procedimentos de ensaios para determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Alguns autores nacionais adaptaram a norma NBR 8522:1984 para a determinação do módulo estático de elasticidade de argamassas, correlacionando-o com o módulo de elasticidade dinâmico (BASTOS, 2003; KUDO; MARTINS NETO, 2001).

A passagem de uma onda ultra-sônica por um sólido baseia-se no princípio da propagação das ondas elásticas, segundo a qual a velocidade de propagação (v) depende das propriedades elásticas do meio e está relacionada com o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) segundo a relação $E_d = v^2 \cdot \rho$, onde ρ representa a densidade de massa aparente do sólido (TIPLER, 1985).

A propagação de ondas ultra-sônicas é muito utilizada para avaliar o estado da estrutura de concretos, como pontes, barragens, túneis, etc., devido ao fato de ser uma técnica não destrutiva, que já vem sendo utilizada há mais de 40 anos nas investigações de materiais à base de cimento (MATUSINOVIC *et al.*, 2004; YE *et al.*, 2004). Diversos pesquisadores, entre eles Ling e Wu (2002), Matusinovic *et al.* (2004), Popovics *et al.* (1990) e Voigt *et al.* (2006), correlacionaram resistência de compressão para composições diferentes de concreto com velocidade da onda ultra-sônica, encontrando diferentes curvas de calibração. Lydon e Iacovou (1995) utilizaram a velocidade da onda ultra-sônica para avaliar a homogeneidade de concretos quanto aos tipos de agregados através do módulo de elasticidade. Han e Kim (2004), mediante um estudo

experimental, analisaram os efeitos do tipo de cimento, temperatura de cura, idade e fator água/cimento entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico e, também, entre o módulo dinâmico e a resistência à compressão do concreto. Komlos *et al.* (1996) fizeram avaliações críticas de normas que utilizam técnica de ultra-som de diversos países e concluíram que podem ser utilizadas no controle de qualidade da produção de misturas de novos compostos e no controle da produção de concretos. A técnica com utilização de ondas ultra-sônicas é utilizada, também, para avaliar o desenvolvimento da hidratação do cimento (CHOTARD *et al.*, 2001; SMITH *et al.*, 2002; VALIC, 2000; YE *et al.*, 2004).

A argamassa aplicada em fachada possui uma relação entre área e volume muito grande e, em função disso, sofre ação intensa do meio ambiente e do substrato, ações estas transformadas em estado de tensão praticamente permanente (se levado em conta que raramente as condições de exposição são estáveis por muito tempo). Fatores de diferentes naturezas, como agregados (teor na mistura, composição granulométrica, formato e natureza dos grãos), pastas (tipos de aglomerantes e teor de água) e espessura da camada da argamassa, afetam o desenvolvimento das propriedades mecânicas do revestimento (BASTOS, 2001).

O objetivo deste trabalho foi constatar por meio 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.

Metodologia

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 mediante britagem de rocha calcária calcítica, proveniente de pedreira do município de Rio Branco do Sul, PR, produzida por moinho de bola. A areia natural foi preparada por peneiramento para obter uma granulometria aproximada da areia de britagem. As Tabelas 1 e 2 apresentam as análises granulométricas e as caracterizações físicas das areias, e as Tabelas 3 e 4 apresentam as análises químicas do cimento e da cal virgem moída.

Abertura da peneira	Areia de britagem		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 1 - Análise granulométrica da areia de britagem e natural (NBR 7217:83)

Ensaio realizado	Unidade	Norma	Resultado médio	
			Areia de britagem	Areia natural
Módulo de finura	-	NBR 7217:83	2,17	2,36
Dimensão máxima característica	(mm)	NBR 7217:83	2,4	2,4
Classificação	-	NBR 7211:83	fina - zona 2	fina - zona 2
Massa unitária - estado solto	(g/cm ³)	NBR 7251:82	1,592	1,492
Massa específica	(g/cm ³)	NBR 9776:87	2,778	2,632
Teor de argila em torrões	(%)	NBR 7218:87	isento	isento
Absorção de água	(%)	NBR 9777:87	0,735	0,809
Teor de material pulverulento	(%)	NBR 7219:87	5,95	2,10

Tabela 2 - Caracterizações físicas da areia de britagem e natural

Ensaio	Resultados (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	22,91
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	7,25
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,18
Óxido de cálcio (CaO)	52,29
Óxido de magnésio (MgO)	5,56
Óxido de potássio (K ₂ O)	1,04
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,18
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,82
Anidrido carbônico (CO ₂)	4,23
Resíduo insolúvel	12,91
Perda ao fogo	4,97

Tabela 3 - Caracterização química do cimento CII Z 32

Ensaio	Resultados (%)
Óxido de cálcio (CaO)	51,0
Óxido de magnésio (MgO)	35,6
Óxidos totais	91,4
Água combinada	1,7
Carbonato residual	4,6
Anidrido carbônico (CO ₂)	3,6
Resíduo insolúvel	6,3
Perda ao fogo	5,3

Tabela 4 - Caracterização química da cal virgem moída CV-C

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

Tabela 5 - Caracterização física do cimento CPlI Z 32 e da cal hidratada em pó

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 30 dias, painéis de 80 cm de largura por 100 cm de altura e espessura de 2 cm foram revestidos. Os resultados dos ensaios de caracterização dos blocos cerâmicos estão apresentados na Tabela 6. Após o lançamento da argamassa, fez-se o sarrafeamento e esperaram-se 15 minutos para a execução do desempenho, conforme mostra a Figura 1.

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 4cm x 4cm x 16cm, 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 24 h de idade e mantidos em ambiente de laboratório até o momento do ensaio. No revestimento, realizou-se o ensaio para determinação da resistência de aderência à tração na idade de 84 dias, seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 13528:1995, utilizando no mínimo 6 arrancamentos. Foram utilizados 6

corpos-de-prova para cada ensaio de resistência mecânica e 3 corpos-de-prova para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi determinado utilizando-se a Equação 1, de acordo com a norma BS-1881 Part 203:1986, que prescreve o ensaio de forma similar à norma NBR 15630:2008.

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

onde:

ρ = densidade de massa no estado endurecido (em kg/m³);

v = velocidade que a onda ultra-sônica leva para percorrer o corpo-de-prova no sentido longitudinal (em km/s); e

ν = 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. De acordo com Carneiro (1999), para argamassas varia de 0,10 a 0,20, sendo tanto menor quanto menor for a capacidade de deformação da argamassa. Foi adotado para esta pesquisa o valor de 0,20.

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

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

onde:

d = altura do corpo-de-prova (em km); e

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 2.

Resultados e discussões

As Tabelas 7 e 8 apresentam as caracterizações das argamassas no estado fresco, produzidas com areia natural e com areia de britagem respectivamente.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados médios e os coeficientes de variação da densidade de massa no estado endurecido aos 371 dias de idade, do tempo de propagação da onda ultra-sônica, da resistência à compressão aos 56 dias de idade, da resistência à tração na flexão aos 84 dias de idade, da resistência de aderência à tração aos 84 dias de idade e do módulo de elasticidade aos 371 dias de idade para as argamassas produzidas

com areia natural e com areia de britagem respectivamente.

Os resultados do módulo de elasticidade das Tabelas 9 e 10 apresentaram coeficiente de variação (CV) relativamente baixo quando comparados com os resultados de Casali (2008). A autora utilizou a NBR 8522:1984 para determinar o módulo estático de elasticidade de argamassas de assentamento de blocos de concreto, utilizando corpos-de-prova de 5 cm x 10 cm, com coeficiente de variação oscilando de 4,8% a 27,1%.

Utilizando os resultados individuais das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade dinâmico, verificou-se a normalidade e a existência de valores espúrios. Em seguida, realizou-se uma análise de variância, com 95% de confiabilidade, utilizando-se três fatores: relação cal/cimento (1:1, 2:1 e 3:1, em volume), relação areia/aglomerante (2:1, 3:1 e 4:1, em volume) e tipo de areia (natural e de britagem). Os resultados estão apresentados nas Tabelas 11 a 14.

Característica determinada	Método	Nº de CPs	Resultado médio	Coeficiente de variação (%)
Absorção total de água	NBR 12118:91	12	22,3%	4,7
Absorção de água inicial (IRS)	RILEM LUM A 5 (1988)	12	15,3 g/200 cm ² /min	19,5
Resistência à compressão	NBR 7184:92	12	2,2 MPa	30,2
Dimensões	Medidas individuais	12	a = 187,4 mm	0,7
			b = 91,4 mm	1,1
			c = 139,6 mm	0,7

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização dos blocos cerâmicos



Figura 1 - Etapas do revestimento de painéis: (a) Lançamento; (b) sarrafeamento; (c) desempeno



Figura 2 - Determinação do tempo que a onda ultra-sônica percorre o corpo-de-prova de 5 cm x 10 cm

Proporções (cimento : cal : areia seca)		Relações em massa (kg/kg)				IC (mm)
volume	massa	água/ cimento	água/ mat. secos	cal/ cimento	areia/ 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 7 - Caracterização das argamassas com areia natural

Proporções (cimento : cal : areia seca)		Relações em massa (kg/kg)				IC (mm)
volume	massa	água/ cimento	água/ mat. secos	cal/ cimento	areia/ 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 : 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

Tabela 8 - Caracterização das argamassas com areia de britagem

Argamassa	Densidade de massa no estado endurecido (kg/m³)		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)	
	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)
1 : 1 : 4 NAT	1789	0,1	44,7	2,2	6,46	1,7	1,64	32,7	0,28	26,5	8,05	4,6
1 : 1 : 6 NAT	1775	1,2	61,0	3,1	2,87	13,2	0,78	12,3	0,27	17,2	4,11	7,0
1 : 1 : 8 NAT	1764	0,3	71,4	1,1	1,64	7,8	0,44	15,0	0,18	14,6	3,09	1,5
1 : 2 : 6 NAT	1649	0,3	80,3	4,4	1,79	2,6	0,61	11,5	0,20	10,3	2,29	8,6
1 : 2 : 9 NAT	1670	0,8	99,4	1,6	0,91	4,8	0,32	13,4	0,18	10,5	1,49	6,2
1 : 2 : 12 NAT	1657	0,5	123,0	4,1	0,42	6,3	0,15	11,3	0,12	11,2	0,98	6,9
1 : 3 : 8 NAT	1579	0,9	103,6	3,9	0,78	9,1	0,31	21,5	0,13	6,8	1,31	5,9
1 : 3 : 12 NAT	1610	1,1	136,2	1,2	0,39	6,0	0,17	11,3	0,09	11,7	0,77	1,7
1 : 3 : 16 NAT	1604	0,4	146,2	1,7	0,25	14,6	0,14	56,3	0,10	14,2	0,67	0,9

Tabela 9 - Resultados médios dos ensaios nas argamassas produzidas com areia natural

Argamassa	Densidade de massa no estado endurecido (kg/m³)		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)	
	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)	Vlr	CV (%)
1 : 1 : 4 BR	1899	1,4	42,0	4,7	7,73	4,2	2,32	22,3	0,29	15,0	9,81	10,4
1 : 1 : 6 BR	1827	0,3	63,1	3,7	2,82	4,3	1,07	11,0	0,25	6,2	4,23	8,0
1 : 1 : 8 BR	1850	0,3	70,4	2,3	2,10	3,9	0,75	16,6	0,20	10,6	3,39	3,0
1 : 2 : 6 BR	1710	0,2	79,9	4,5	1,92	5,9	0,74	14,9	0,22	13,0	2,41	7,9
1 : 2 : 9 BR	1751	0,4	94,9	0,6	1,12	9,1	0,50	11,8	0,19	4,1	1,78	2,6
1 : 2 : 12 BR	1781	0,4	104,7	3,1	0,74	13,1	0,27	15,4	0,16	5,9	1,46	4,1
1 : 3 : 8 BR	1671	0,9	94,6	2,1	0,99	3,6	0,42	17,5	0,16	7,4	1,66	4,0
1 : 3 : 12 BR	1689	0,7	108,4	1,6	0,57	4,1	0,23	11,4	0,12	13,5	1,28	2,7
1 : 3 : 16 BR	1728	0,8	119,9	1,9	0,38	4,8	0,19	32,3	0,11	9,5	1,08	3,2

Tabela 10 - Resultados médios dos ensaios nas argamassas produzidas com areia de britagem

Fonte	SQ ¹	GDL ²	MQ ³	F ⁴	F crítico ⁵	Resultado
Tipo de areia	2,291	1	2,291	78,53	4,11	significativo
Areia/aglomerante	93,218	2	46,609	1597,47	3,26	significativo
Cal/cimento	199,746	2	99,873	3423,05	3,26	significativo
Tipo de areia x areia/aglom.	0,780	2	0,390	13,37	3,26	significativo
Areia/aglomerante x cal/cimento	72,346	4	18,087	619,90	2,63	significativo
Tipo de areia x cal/cimento	0,577	2	0,289	9,89	3,26	significativo
Tipo de areia x areia/aglom. x cal/cimento	1,699	4	0,425	14,55	2,63	significativo
Resíduo	1,050	36	0,029			
Total	371,708	53				

Tabela 11 - Análise de variância para os resultados individuais da resistência à compressão, com 95% de confiança

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F crítico	Resultado
Tipo de areia	1,060	1	1,060	15,21	4,11	significativo
Areia/aglomerante	7,794	2	3,897	55,94	3,26	significativo
Cal/cimento	13,699	2	6,849	98,33	3,26	significativo
Tipo de areia x areia/aglom.	0,107	2	0,054	0,77	3,26	não significativo
Areia/aglomerante x cal/cimento	4,406	4	1,102	15,82	2,63	significativo
Tipo de areia x cal/cimento	0,476	2	0,238	3,42	3,26	significativo
Tipo de areia x areia/aglom. x cal/cimento	0,153	4	0,038	0,55	2,63	não significativo
Resíduo	2,508	36	0,070			
Total	30,202	53				

Tabela 12 - Análise de variância para os resultados individuais da resistência à tração na flexão, com 95% de confiança

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F crítico	Resultado
Tipo de areia	0,005	1	0,005	4,35	4,11	significativo
Areia/aglomerante	0,081	2	0,040	33,30	3,26	significativo
Cal/cimento	0,231	2	0,116	95,02	3,26	significativo
Tipo de areia x areia/aglom.	0,002	2	0,001	0,74	3,26	não significativo
Areia/aglomerante x cal/cimento	0,016	4	0,004	3,28	2,63	significativo
Tipo de areia x cal/cimento	0,004	2	0,002	1,53	3,26	não significativo
Tipo de areia x areia/aglom. x cal/cimento	0,004	4	0,001	0,82	2,63	não significativo
Resíduo	0,044	36	0,001			
Total	0,387	53				

Tabela 13 - Análise de variância para os resultados individuais da resistência de aderência à tração, com 95% de confiança

¹ Soma dos quadrados.

² Graus de liberdade.

³ Médias quadradas.

⁴ F calculado da distribuição de Fisher-Snedecor.

⁵ F tabelado da distribuição de Fisher-Snedecor.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F crítico	Resultado
Tipo de areia	2,942	1	2,942	34,87	4,11	significativo
Areia/aglomerante	62,104	2	31,052	367,97	3,26	significativo
Cal/cimento	198,992	2	99,496	1179,05	3,26	significativo
Tipo de areia x areia/aglom.	0,737	2	0,369	4,37	3,26	significativo
Areia/aglomerante x cal/cimento	56,317	4	14,079	166,84	2,63	significativo
Tipo de areia x cal/cimento	0,304	2	0,152	1,80	3,26	não significativo
Tipo de areia x areia/aglom. x cal/cimento	2,835	4	0,709	8,40	2,63	significativo
Resíduo	3,038	36	0,084			
Total	327,270	53				

Tabela 14 - Análise de variância para os resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico, com 95% de confiança

O tipo de areia mostrou-se significativo, com 95% de confiança, tanto para as resistências mecânicas quanto para o módulo de elasticidade, ou seja, há influência do tipo de areia nos resultados dos ensaios. Logo, há diferença significativa entre as médias das resistências mecânicas e entre as médias do módulo de elasticidade. Observou-se, também, que o tipo de areia apresentou maior influência na resistência à compressão e no módulo de elasticidade que nas demais resistências mecânicas. As relações cal/cimento e areia/aglomerante mostraram-se significativas em todos os resultados, tendo a relação cal/cimento apresentado influência expressivamente maior na resistência à compressão e no módulo de elasticidade. A interação de segunda ordem, tipo de areia x areia/aglomerante, não se mostrou significativa na resistência à tração na flexão e na resistência de aderência à tração, e a interação tipo de areia x cal/cimento não influenciou nos resultados da resistência de aderência e no módulo de elasticidade. A interação de terceira ordem influenciou apenas nos resultados da resistência à compressão e no módulo de elasticidade.

Através da análise de variância é possível concluir que, com 95% de confiabilidade, o proporcionamento dos materiais é mais significativo que o tipo de areia, sendo o tipo de areia e o teor de cimento fatores preponderantes nos resultados da resistência à compressão e do módulo de elasticidade.

A equação de Abrams é muito utilizada como função entre a resistência à compressão e a relação água/cimento em concretos. Neste estudo experimental constatou-se que, para argamassas de

cimento, cal e areia, há também uma correlação exponencial entre a relação água/cimento e a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão, conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 3.

O estudo experimental desenvolvido por Selmo (1989) constatou que a relação água/cimento, em massa, das argamassas no estado fresco pode ser tomada como variável determinante na resistência de aderência à tração, e esse fato pode ser constatado pelos resultados apresentados na Figura 4.

Segundo Silva (2006), o fato de o módulo de elasticidade ser maior para as argamassas com areia de britagem 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 de britagem foi menor e isso também pode ter favorecido para aumentar o módulo de elasticidade nas argamassas produzidas com esse agregado, já que as resistências mecânicas são inversamente proporcionais à relação água/cimento (Figuras 3 e 4).

Carasek (1996) detectou a influência da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão na resistência de aderência à tração, a qual atribuiu às variações nos teores de cimento das argamassas. Conforme mostra a Figura 5, há uma correlação exponencial entre a resistência de aderência à tração e a resistência à compressão, e, também, entre a resistência de aderência à tração e a resistência à tração na flexão das argamassas produzidas.

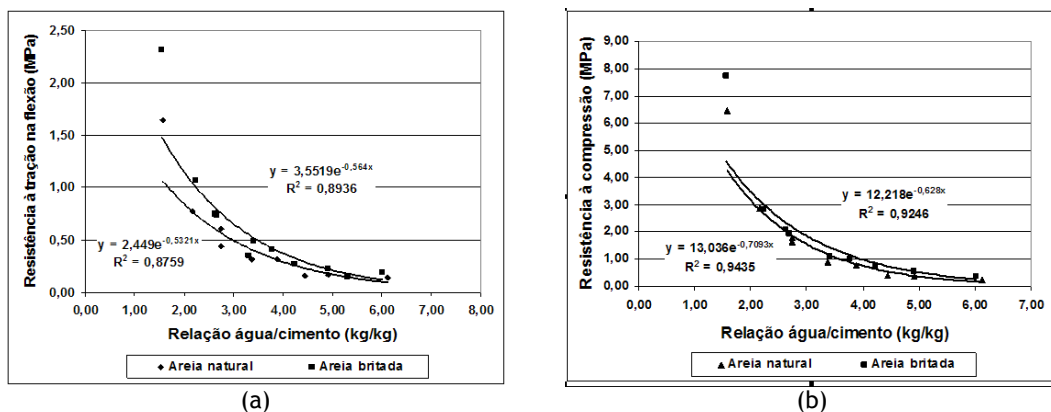


Figura 3 - Correlação exponencial entre relação água/cimento e (a) resistência à tração na flexão na idade de 84 dias; e (b) resistência à compressão na idade de 56 dias para argamassa com areia natural e areia britada

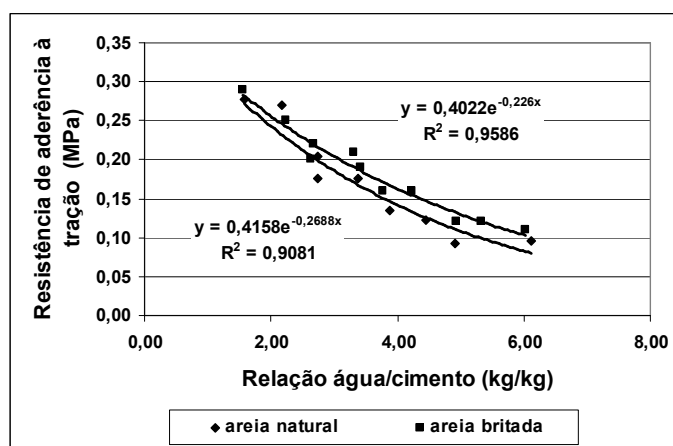


Figura 4 - Correlação da relação água/cimento com a resistência de aderência à tração, com areia natural e areia de britagem

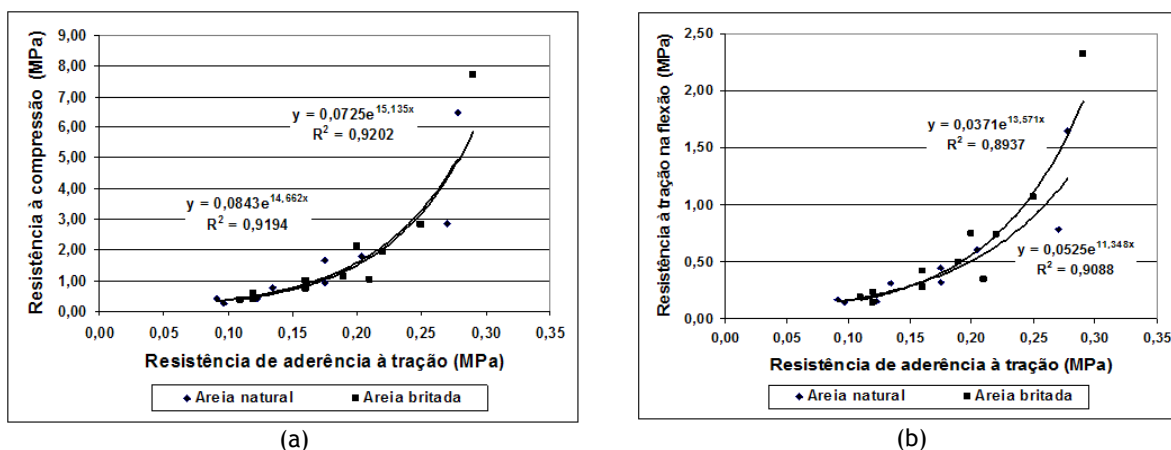


Figura 5 - Correlação da resistência de aderência à tração com (a) resistência à compressão aos 56 dias de idade e (b) resistência à tração na flexão aos 84 dias de idade

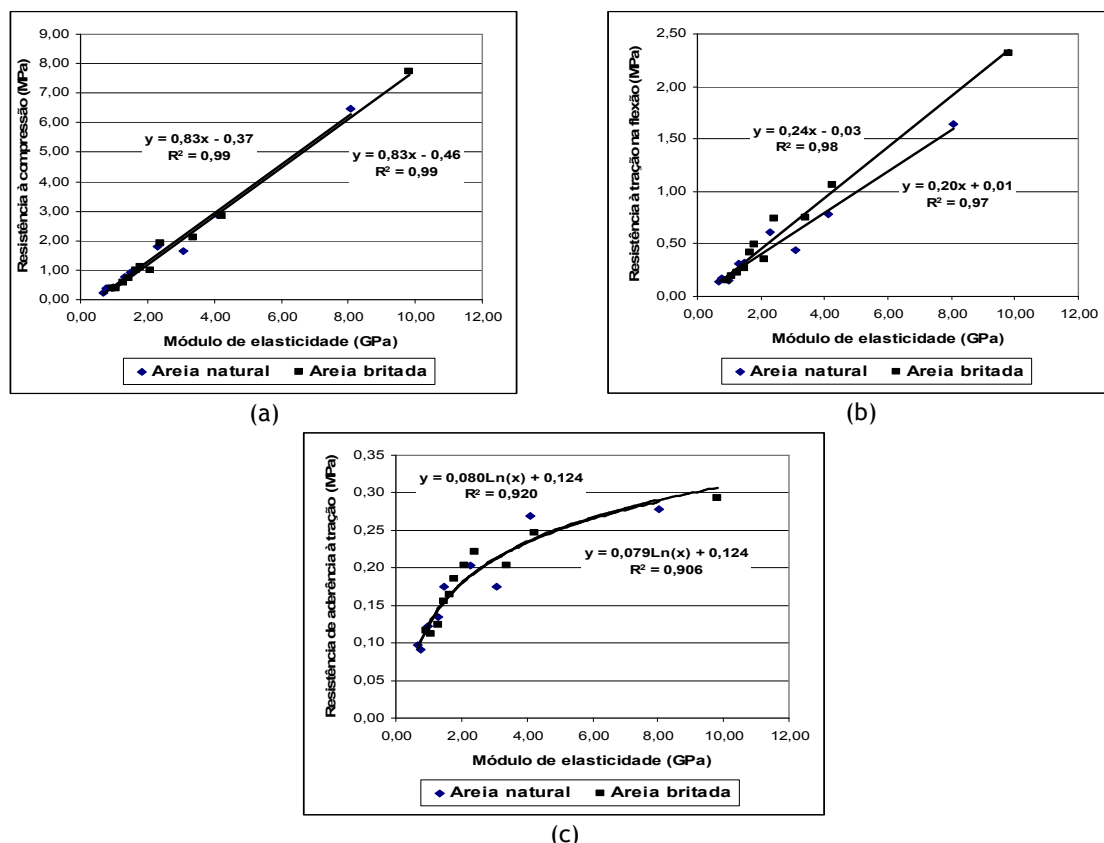


Figura 6 - Correlação entre módulo de elasticidade aos 371 dias de idade e (a) resistência à compressão aos 56 dias de idade; (b) resistência à tração na flexão aos 84 dias de idade; e (c) resistência de aderência à tração aos 84 dias de idade

Os resultados das Tabelas 9 e 10 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 areia/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 a mesma relação areia/aglomerante. Com isso, constata-se que o teor de cimento é variável determinante nos resultados das resistências mecânicas, conforme já foi constatado na análise de variância. As resistências mecânicas influenciam no resultado do módulo de elasticidade, pois, como mostra a Figura 6, existem correlações entre módulo de elasticidade e resistências mecânicas, com expressivos coeficientes de determinação.

O tempo de propagação da onda ultra-sônica é diretamente proporcional às relações cal/cimento e areia/aglomerante, conforme pode ser constatado pelos resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10. Com o aumento da compactidade do conjunto aglomerante e areia, 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.

Gomes (1997) desenvolveu uma pesquisa em que utilizou o tempo de propagação de onda ultra-sônica para avaliar as condições de revestimentos de argamassas de cimento, cal e areia com relação às resistências mecânicas. Ensaio realizado pelo autor, em diversos tipos de revestimentos e em corpos-de-prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm, constataram que o tempo de propagação da onda em revestimentos com mau estado de conservação é maior do que naqueles em bom estado de conservação.

A Figura 7 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 de britagem, obtidas a partir dos dados das Tabelas 9 e 10. É possível, então, a partir do tempo de propagação da onda ultra-sônica, estimar valores para as resistências mecânicas de uma argamassa, dentro de certo índice de confiabilidade, desde que conhecidos o proporcionamento e os materiais constituintes.

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 15.

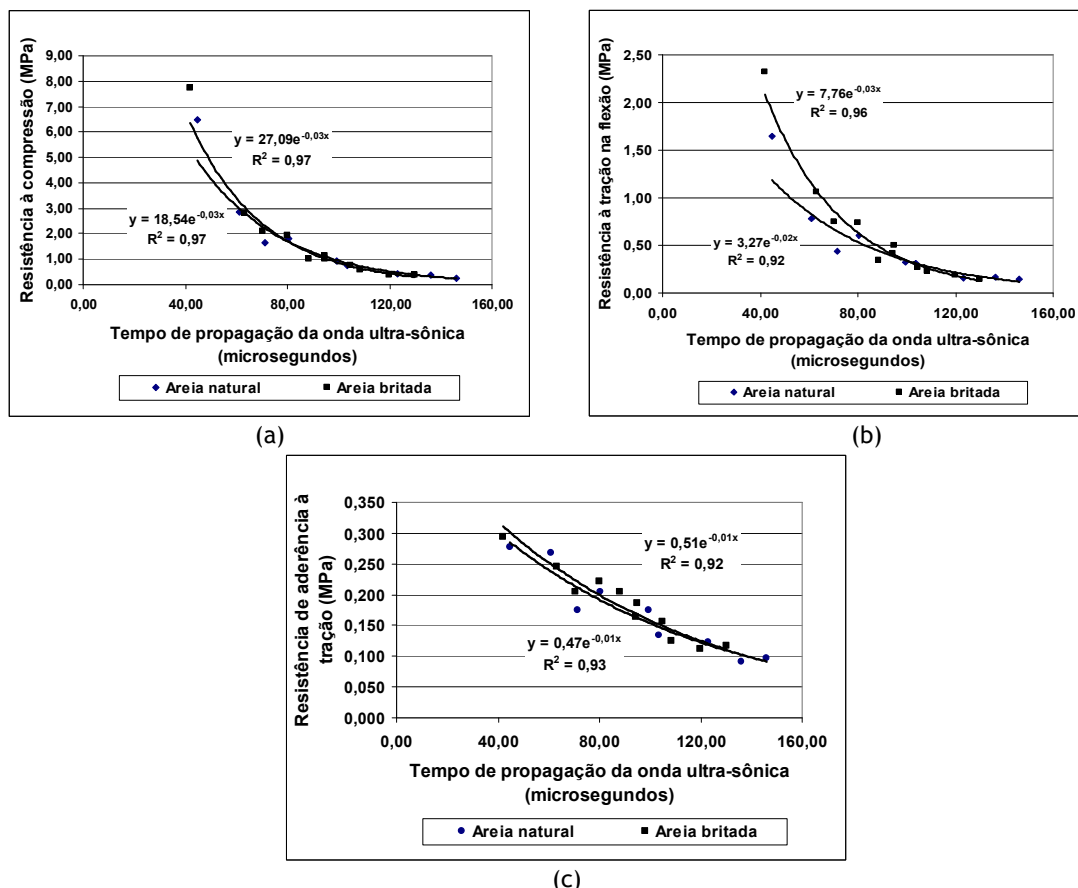


Figura 7 - Correlação entre tempo de propagação da onda ultra-sônica com (a) resistência à compressão; (b) resistência à tração na flexão; e (c) resistência de aderência à tração

Arg	Areia natural		Areia de britagem	
	quantidade	cm/m ²	quantidade	cm/m ²
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

Tabela 15 - Resultados da contagem e medida do comprimento linear total (em cm) por área (em m²) das fissuras visíveis nos revestimentos na idade de 84 dias

Os resultados da Tabela 11 mostram que nos traços com mesma relação cal/cimento, à medida que aumenta a relação areia/aglomerante, diminui a incidência de fissuras visíveis para as argamassas produzidas com areia natural e com areia britada, pois, com a diminuição do teor de cimento, diminui também o módulo de elasticidade. O aumento do teor de cal nas argamassas com areia de britagem provocou um aumento de fissuração nos revestimentos, apesar da diminuição do módulo de elasticidade.

As argamassas produzidas com areia de britagem possuem maiores módulos de elasticidade e resistência de aderência à tração que as argamassas com areia natural, conforme mostram as Tabelas 9 e 10. O aumento da resistência de aderência à tração resulta em maior restrição à movimentação da argamassa de revestimento, aumentando os níveis de tensões entre a interface revestimento/substrato. Esses fatos podem ser a causa do maior número de fissuras nos revestimentos de areia de britagem com relação aos revestimentos de areia natural que possuem o mesmo proporcionamento de materiais.

Considerações finais

O módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez da argamassa no estado endurecido que é proporcionado pelo cimento hidratado e pela imbricação entre as partículas dos agregados, devido à forma e rugosidades dos grãos, entre outros fatores. Por meio das análises dos resultados deste estudo experimental é possível concluir que:

- (a) assim como no concreto, em argamassas de revestimentos a quantidade de água utilizada no preparo da mistura é fator determinante nas resistências à compressão, de tração na flexão e de aderência à tração;
- (b) a resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassas é diretamente proporcional à resistência à compressão e à resistência de tração na flexão;
- (c) a fissuração nos revestimentos de argamassas é acentuada com o aumento das resistências mecânicas, que, por sua vez, é proporcional ao consumo de cimento; e
- (d) a capacidade de deformação do revestimento de argamassa, que pode ser avaliada através do módulo de elasticidade, está associada às resistências à compressão, de tração na flexão e de aderência à tração.

O módulo de elasticidade bem como o tempo 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 à fissuração. Além disso, o ensaio para determinação do módulo de elasticidade pelo método dinâmico, utilizando aparelhos de medição de ondas ultra-sônicas, além de rápido, de simples realização, não destrutivo, pode ser realizado no próprio canteiro de obra.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7184**: Blocos vazados de concreto para alvenaria – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. **NBR 7215**: Cimento portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Determinação de composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro. 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregados em estado solto – determinação de massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9777**: Determinação de absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto para alvenaria – determinação da absorção da água, do teor de umidade e da área líquida. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia da Construção Civil e Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BASTOS, P. K. X. Módulo de deformação de argamassas – conceito e métodos de determinação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 27–40.

BRITISH STANDARD ASSOCIATION. **BS 1881 Part 203**: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. 1986.

CALLISTER, W. D. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

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. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia da Construção Civil e Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. 203 p. Tese (Doutorado em Engenharia da Construção Civil e Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASALI, J. M. **Estudo da interação entre a argamassa de assentamento e o bloco de concreto para alvenaria estrutural: transporte de água e aderência**. 2008. 304 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHOTARD, T.; GIMET-BREART, N.; SMITH, A.; FARGEOT, D.; BONNET, J. P. GAULT, C. Application of ultrasonic testing to describe the hydrations of calcium aluminate cement at the early age. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 405–412, 2001.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 1015 Part 11**: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar (FOREIGN STANDARD). Berlin, 1999.

GOMES, A. M. A utilização da ultrasonografia na avaliação das propriedades mecânicas dos revestimentos de paredes através de ensaios “in situ”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997. p. 445–456.

HAN, S. H.; KIM, J. K. Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1219–1227, 2004.

KOMLOS, K.; POPOVICS, S.; NURNBERGEROVÁ, T.; BABÁL, B.; POPOVICS, J. S. Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 357–364, 1996.

KUDO, E. K.; MARTINS NETO, M. L. Estudo dos métodos de determinação do módulo de deformação estático e dinâmico. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV., 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2001. p. 345–354.

LING, M. T.; WU, J. T. Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1763–1769, 2002.

LYDON, F. D.; IACOVU, M. Some factors affecting the dynamic modulus of elasticity of high strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 6, p. 1246–1256, 1995.

MATUSINOVIC, T.; KURAJICA, S.; SIPUSIC, J. The correlation between compressive strength and ultrasonic parameters of calcium aluminate cement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1451–1457, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

POPOVICS, S.; ROSE, J. L.; POPOVICS, J. S. The behaviour of ultrasonic pulses in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 259–270, 1990.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil e Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, N. G. **Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. 180 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SMITH, A.; CHOTARD, T.; GIMET-BREART, N.; FARGEOT, D. Correlation between hydration mechanism and ultrasonic measurements in an aluminous cement: effect of setting time and temperature on the early hydration. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 22, p. 1947–1958, 2002.

TIPLER, P. A. **Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1985.

VALIC, M. I. Hydration of cementitious materials by pulse echo USER-method, apparatus and application examples. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1633–1640, 2000.

VOIGT, T.; SUN, Z.; SHAH, S. P. Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 307–316, 2006.

YE, G.; LURA, P.; BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L. A. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 491–497, 2004.