

Método para obtenção de independência entre resistência e elasticidade em estudos de dosagem de argamassas mistas

Method for obtaining the independency between strength and elasticity in proportioning studies of cement and lime mortar

Dario de Araújo Dafico

Resumo

Argamassas mistas de cimento e cal hidratada com diferentes proporções em massa foram dosadas com o objetivo de modificar a resistência à compressão e o módulo de deformação, de modo a obter certa independência entre essas duas variáveis. Foram dosadas 16 diferentes misturas, variando-se as relações em massa de cal hidratada/cimento e de água/aglomerante. Com os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas, corroborou-se a hipótese de que as variações da resistência à compressão e do módulo de deformação não apresentam uma relação direta de dependência. A partir da análise dos resultados obtidos, testou-se um modelo matemático para a resistência à compressão e para o módulo de deformação em função de relações volumétricas entre os componentes das argamassas, obtendo-se elevado grau de correlação. Propõe-se a utilização desse método de proporcionamento e do modelo matemático para a formulação de argamassas mistas de cimento e cal visando atender às especificações definidas em projeto.

Palavras-chave: Argamassa. Dosagem. Resistência. Elasticidade.

Abstract

Cement-and-lime mortars, with different proportions in mass, were produced with the aim of modifying the compressive strength and the modulus of elasticity, in order to obtain some independence among those two variables. Sixteen different mixtures were made, modifying the proportions in mass of hydrated lime/cement and water/cementitious materials. Based on the results of the tests of mechanical properties, the hypothesis that the variations of the compressive strength and of the modulus of elasticity do not present a direct dependence relationship was corroborated. Based on the analysis of the results, a mathematical model was tested for the relationship between compressive strength and the modulus of elasticity, and the volumetric relationship between the mortar components, resulting in a high correlation degree. The use of this proportioning method and of the mathematical model is proposed for the formulation of cement-and-lime mortar in order to meet the design specifications.

Keywords: Mortar. Proportioning. Compressive strength. Elasticity.

Dario de Araújo Dafico
Departamento de Engenharia
Universidade Católica de Goiás
Av. Universitária, 1440, Setor
Universitário
Goiânia - GO - Brasil
CEP 74605-010
Tel.: (62) 3946-1351
E-mail:
dariodafico@ucg.com.br

Recebido em 05/04/07
Aceito em 04/07/07

Introdução

Argamassas mistas de cimento e cal são amplamente utilizadas na construção civil, principalmente na execução de revestimentos-base para acabamentos e na elevação de alvenarias. Seu uso é baseado em receitas empíricas consideradas de desempenho adequado para cada tipo de utilização, receitas essas baseadas em proporções em volume aparente dos materiais componentes.

Muitas pesquisas têm sido realizadas no sentido de se obter maior compreensão dos fenômenos que regem o desempenho desse material nos estados fresco e endurecido. Percebe-se um grande atraso na tecnologia das argamassas quando a comparamos com a tecnologia do concreto, que há muito estabeleceu os parâmetros de utilização do material e possui metodologias consagradas para o estudo de dosagem.

Sabe-se que a proporção entre cimento, cal, areia e água é o principal fator a influenciar as propriedades nos estados fresco e endurecido, e essas, por sua vez, irão determinar seu desempenho ao longo de sua utilização. Porém, não se sabe exatamente como as relações de proporção entre seus componentes controlam essas propriedades. Um fator de complicação é que quase todos os estudos têm sido realizados tentando-se reproduzir as receitas tradicionais, com as proporções medidas em volume aparente, perdendo-se muito de cientificidade. Tratando desse problema, Gomes e Neves (2002) afirmam: “Os traços das argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos vêm sendo definidos em volume, conforme recomendações de diversas normas e procedimentos, quando o mais adequado seria estabelecê-los em massa, permitindo-se, porém, a medição dos materiais em volume”.

Surge outro importante fator de complicação quando comparamos a tecnologia das argamassas com a do concreto convencional. Diferentemente do que ocorre com o concreto convencional, na produção de argamassas mistas são utilizados numa mesma mistura dois aglomerantes de comportamentos bastante diferentes (cimento e cal) e em grandes quantidades. No concreto convencional há muito está estabelecido que a relação entre água e cimento controla a resistência à compressão para um dado conjunto de componentes, e esta correlaciona-se bem com outras propriedades.

Dafico e Prudêncio Jr. (2002), tratando do concreto de alto desempenho, se depararam com um problema parecido: obter um modelo matemático capaz de explicar as variações nas propriedades de um material contendo dois ou mais aglomerantes, no caso cimento e pozolanas. Os autores propuseram o estudo das proporções em volume dos materiais da pasta com o objetivo de utilizar o modelo linear (equação do plano) para a relação entre as variáveis envolvidas. A proposta partiu da observação de que a curva de Abrams se torna praticamente uma reta no intervalo de interesse de resistências à compressão, quando essa variável é tomada como função da relação entre volume de cimento e volume da pasta. O resultado foi a obtenção de um modelo matemático simples, mas eficiente, já que os coeficientes de determinação encontrados foram elevados. A Figura 1 mostra uma curva de Abrams típica, e a Figura 2, a curva resultante da modificação da variável massa de água/massa de cimento para a variável volume de cimento/volume de pasta, considerando o cimento como possuidor de uma massa específica igual a $3,15 \text{ g/cm}^3$.

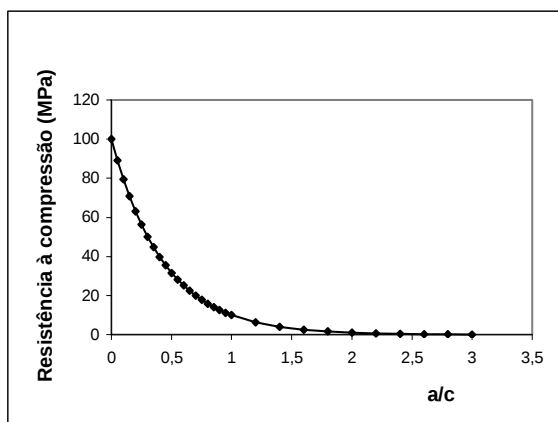


Figura 1 - Curva de Abrams típica

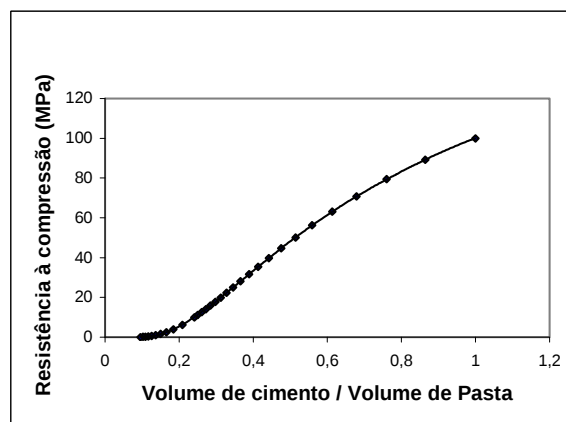


Figura 2 - Curva de Abrams modificada

Considerando que na formulação de argamassas as propriedades resistência à compressão e módulo de elasticidade são essenciais, e a hipótese de que essas variáveis podem não apresentar uma relação direta de dependência, prepararam-se argamassas com diferentes proporções em massa entre os componentes, tendo sido os resultados dessas propriedades analisados conforme o modelo proposto por Dafico e Prudêncio Jr. (2002) para o concreto de alto desempenho.

Materiais e métodos

Foram produzidas argamassas mistas com 16 traços diferentes em quatro blocos com relações entre água e aglomerante de 0,6, 0,7, 0,8 e 0,9, sendo cada bloco com quatro argamassas com relações entre cal e cimento de 0,000, 0,125, 0,250 e 1,500. Com o objetivo de produzir misturas com relação entre água e aglomerante fixas, o ajuste de trabalhabilidade foi feito pela adição de mais areia na betoneira. Para isso, foi proposto um teor inicial de areia significativamente menor que o esperado para cada traço. As relações entre água e aglomerante adotadas foram propostas com base no trabalho de Rago e Cincoto (1995), que afirmam ser o valor 0,8 um número bastante comum para traços de argamassas mistas com teores de cal não muito altos e a particular opção

por argamassas mais resistentes, para utilização em alvenaria estrutural.

Para a elaboração das misturas foi utilizado um cimento do tipo CP-II-Z-32-RS, com massa específica de 3,05 g/cm³, uma cal hidratada do tipo CH-I, de massa específica de 1,82 g/cm³, e uma areia lavada com massa específica de 2,66 g/cm³ e módulo de finura igual a 1,81.

A Tabela 1 apresenta na primeira coluna os códigos utilizados para diferenciar as misturas, sendo que a letra indica a proporção de cal, e o número informa a relação entre água e aglomerante utilizada. Na segunda coluna estão as proporções em massa de cal, areia e água em relação ao cimento, onde a proporção de areia é um valor incógnito a ser obtido experimentalmente. A última coluna mostra os traços em massa antes dos acréscimos de areia realizados para o ajuste de trabalhabilidade.

O ajuste de trabalhabilidade das misturas foi feito através do acréscimo de mais areia diretamente na betoneira por um pedreiro experiente em elevação de alvenaria estrutural e em plena atividade. Para a confirmação da trabalhabilidade das argamassas assim produzidas, antes da moldagem dos corpos-de-prova parte do material era retirado da betoneira e testado pelo pedreiro mediante o assentamento de alguns blocos cerâmicos.

Código dos traços	Traços em massa (cimento : cal : areia : água)*	
	Traços teóricos (proporção de areia é incógnita)	Traços iniciais (proporção de areia antes dos acréscimos)
A6	1 : 0,000 : a : 0,60	1 : 0,000 : 1,0 : 0,60
B6	1 : 0,125 : a : 0,68	1 : 0,125 : 1,5 : 0,68
C6	1 : 0,250 : a : 0,75	1 : 0,250 : 2,0 : 0,75
D6	1 : 0,500 : a : 0,90	1 : 0,500 : 2,5 : 0,90
A7	1 : 0,000 : a : 0,70	1 : 0,000 : 1,5 : 0,70
B7	1 : 0,125 : a : 0,79	1 : 0,125 : 2,0 : 0,79
C7	1 : 0,250 : a : 0,88	1 : 0,250 : 2,5 : 0,88
D7	1 : 0,500 : a : 1,05	1 : 0,500 : 3,0 : 1,05
A8	1 : 0,000 : a : 0,80	1 : 0,000 : 2,0 : 0,80
B8	1 : 0,125 : a : 0,90	1 : 0,125 : 2,5 : 0,90
C8	1 : 0,250 : a : 1,00	1 : 0,250 : 3,0 : 1,00
D8	1 : 0,500 : a : 1,20	1 : 0,500 : 3,5 : 1,20
A9	1 : 0,000 : a : 0,90	1 : 0,000 : 2,5 : 0,90
B9	1 : 0,125 : a : 1,01	1 : 0,125 : 3,0 : 1,01
C9	1 : 0,250 : a : 1,13	1 : 0,250 : 3,5 : 1,13
D9	1 : 0,500 : a : 1,35	1 : 0,500 : 4,0 : 1,35

* A simbologia utilizada neste trabalho para a expressão do traço em massa é (1: k : a : x)

Tabela 1 – Proporções em massa dos traços de argamassa antes do ajuste de trabalhabilidade

Também foi realizado o ensaio denominado Gtec Teste, descrito detalhadamente por Casali (2003), para a verificação da trabalhabilidade de argamassas para o assentamento de blocos de concreto destinados à alvenaria estrutural. Por esse método é moldado um filete de argamassa com 2 cm de altura, 2,5 cm de largura e 10 cm de comprimento, o qual é comprimido por uma peça metálica de massa padronizada, de modo a imitar a pressão exercida por um bloco no momento em que o pedreiro solta o bloco sobre a argamassa. A espessura do filete, medida em centímetros, logo após a liberação do peso, é denominada L_0 e indica a consistência da argamassa.

Segundo Prudêncio Jr. *et al.* (2002), os valores recomendados do L_0 para argamassas destinadas ao assentamento de blocos de concreto estão na faixa de 1,6 cm a 1,8 cm. O dispositivo também permite a aplicação de pequenos golpes de energia padronizada logo após a medida do L_0 , de forma a imitar o trabalho do pedreiro de promover o assentamento do bloco até uma espessura de junta de 1 cm. Esse valor, que indica a plasticidade da mistura, é denominado “n”, sendo o recomendado pelos últimos autores valores da ordem de 6 a 12 golpes. Um último parâmetro medido no ensaio, denominado de “i”, é o número de golpes necessário para romper a argamassa fresca (desprendimento da rebarba), que indica a coesão da mistura. Se “i” for menor que “n”, significa que a rebarba se rompeu antes de a junta atingir a espessura final especificada no ensaio, que é de 1 cm, o que indica falta de coesão da argamassa.

Após a produção das misturas, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de dimensões de 5 cm x 10 cm para ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação. A idade de ensaio dessas propriedades mecânicas foi de 20 semanas, idealizada de modo a proporcionar uma avaliação dessas propriedades em idade avançada, mais realista quanto ao desempenho de uma argamassa no edifício ao longo do tempo.

Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados do Gtec Teste, onde se pode observar os valores de três medições feitas para cada mistura, os valores médios, arredondados em uma casa decimal para “ L_0 ”, e os valores inteiros para “n” e “i”. Os valores de L_0 variaram entre 0,3 e 1,3, números bem menores que os propostos por Prudêncio Jr. *et al.* (2002). Entretanto, isso se justifica pelo fato de que o pedreiro ajustou a trabalhabilidade com base na necessidade de argamassas para assentamento de blocos cerâmicos de dimensões 9 x 19 x 19, muito mais leves que blocos de concreto destinados à alvenaria estrutural. Se considerarmos que um pedreiro experiente conhece bem sua necessidade em termos de trabalhabilidade da argamassa, os resultados apresentados dizem que o ensaio do Gtec Teste carece de adaptação para a caracterização de argamassas destinadas a outros usos que não a alvenaria estrutural de blocos de concreto.

Cód.	L_0 (cm)				n				i			
	I	II	III	Média	I	II	III	Média	I	II	III	Média
A6	1,0	1,2	1,2	1,1	0	1	1	1	1	2	3	2
B6	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
C6	0,6	0,5	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
D6	1,2	1,4	1,4	1,3	1	3	2	2	8	11	4	9
A7	1,2	1,1	1,0	1,1	1	0	0	0	4	2	0	2
B7	0,8	0,8	0,8	0,8	0	0	0	0	0	1	2	1
C7	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
D7	0,5	0,4	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
A8	1,2	1,0	1,2	1,1	1	0	1	1	2	1	2	2
B8	1,0	0,9	0,9	0,9	0	0	0	0	2	0	1	1
C8	0,6	0,8	0,4	0,6	0	0	0	0	0	1	0	0
D8	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0
A9	0,9	0,9	1,0	0,9	0	0	0	0	0	0	1	0
B9	1,1	1,2	1,2	1,1	0	1	1	1	1	1	1	1
C9	0,7	0,8	0,7	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0
D9	0,5	0,7	0,5	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de trabalhabilidade através do Gtec Teste

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão (ABNT, 1995) e módulo de deformação das argamassas (ABNT, 2003). A Tabela 4 contém os traços definitivos, as relações em massa água/aglomerante e areia/aglomerante, e ainda as relações entre volume de aglomerante e volume de pasta (Δpt) e entre volume de cal e volume de aglomerante (Δag).

A Figura 3 mostra como a resistência à compressão e o módulo de deformação podem ser produzidos com certa independência. Para um mesmo módulo de deformação, as misturas de relação entre água e aglomerante menores produzem argamassas mais resistentes.

Código Traço	Resistência à compressão (MPa)				Módulo de Deformação (GPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
A6	9,2	9,0	7,5	8,6	22,4	21,3	21,8	21,8
B6	6,0	7,1	7,2	6,8	19,4	18,8	18,2	18,8
C6	6,3	6,1	6,3	6,2	18,7	16,2	17,2	17,4
D6	4,5	5,1	5,2	4,9	14,2	13,2	13,2	13,5
A7	8,3	8,3	7,4	8,0	21,8	21,8	23,2	22,3
B7	6,0	6,3	5,6	6,0	16,7	18,1	17,3	17,6
C7	5,3	4,8	5,5	5,2	14,6	14,6	15,2	14,8
D7	4,1	3,9	4,1	4,0	12,7	14,3	5,7	10,9
A8	6,7	6,3	6,6	6,5	17,6	18,8	21,0	19,1
B8	2,0	5,5	4,9	4,1	12,9	16,2	13,6	14,2
C8	4,0	3,9	3,7	3,9	12,5	13,9	14,3	13,6
D8	3,1	3,3	3,2	3,2	10,2	10,0	10,7	10,3
A9	4,9	5,3	4,4	4,9	18,2	16,6	15,4	16,7
B9	2,7	3,5	3,4	3,2	14,2	13,3	12,6	13,4
C9	3,1	2,5	2,9	2,8	12,5	10,7	9,9	11,0
D9	2,4	2,1	2,3	2,3	10,1	8,6	7,8	8,8

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação

Código Traço	Traço				água/ag	a/ag	Δpt	Δag
	l	k	a	x				
A6	1	0,000	2,24	0,60	0,6	2,24	0,35	0,00
B6	1	0,125	2,35	0,68	0,6	2,09	0,40	0,17
C6	1	0,250	2,44	0,75	0,6	1,95	0,44	0,30
D6	1	0,500	1,92	0,90	0,6	1,28	0,50	0,46
A7	1	0,000	2,49	0,70	0,7	2,49	0,32	0,00
B7	1	0,125	2,86	0,79	0,7	2,54	0,36	0,17
C7	1	0,250	3,01	0,88	0,7	2,41	0,40	0,30
D7	1	0,500	3,27	1,05	0,7	2,18	0,46	0,46
A8	1	0,000	2,66	0,80	0,8	2,66	0,29	0,00
B8	1	0,125	2,98	0,90	0,8	2,65	0,33	0,17
C8	1	0,250	3,25	1,00	0,8	2,60	0,37	0,30
D8	1	0,500	3,64	1,20	0,8	2,43	0,43	0,46
A9	1	0,000	2,79	0,90	0,9	2,79	0,27	0,00
B9	1	0,125	3,30	1,01	0,9	2,93	0,31	0,17
C9	1	0,250	3,60	1,13	0,9	2,88	0,34	0,30
D9	1	0,500	4,35	1,35	0,9	2,90	0,40	0,46

Relação massa água/massa de aglomerante (água/ag), relação massa de areia/massa de aglomerante (a/ag), relação entre volume de aglomerante e volume de pasta (Δpt) e relação entre volume de cal e volume de aglomerante (Δag)

Tabela 4 - Proporções dos traços definitivos

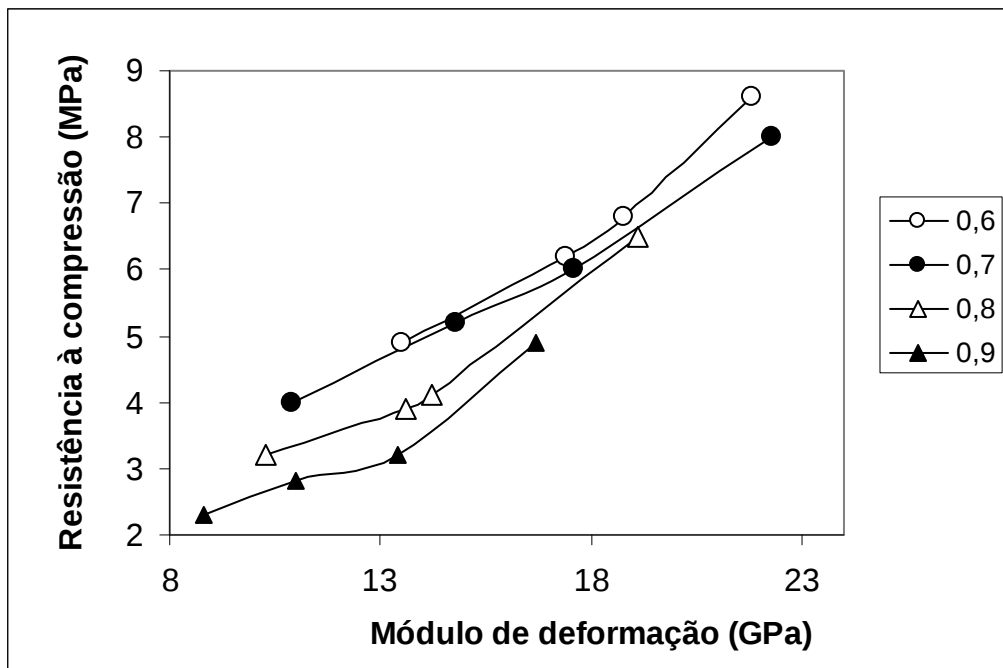


Figura 3 – A regressão entre a resistência à compressão e o módulo de deformação mostra expressiva independência entre essas variáveis

Foram feitos ajustes das variáveis independentes: volume de aglomerante/volume de pasta (Δpt) e volume de cal/volume de aglomerante (Δag) a cada uma das variáveis dependentes: resistência à compressão e módulo de elasticidade, com elevados coeficientes de correlação – r , iguais a 0,98 ($r^2 = 0,96$) em ambos os casos. Os ajustes foram feitos por regressão linear múltipla, pelo método dos mínimos quadrados. Importante lembrar, como mostrado na Figura anterior, que a regressão linear simples entre a resistência à compressão e o módulo de deformação não apresenta coeficiente de correlação tão bom ($r^2 = 0,92$), o que é desejável e justifica o presente trabalho, ou seja, a obtenção de alguma independência entre resistência e elasticidade nas argamassas. As equações obtidas 1 e 2 seguem o seguinte modelo, em que as constantes obtidas nas operações de regressão são representadas pela letra grega “ α ” e um índice numérico arábico:

$$Rc = \alpha_1 + \alpha_2.\Delta pt + \alpha_3.\Delta ag \quad (1)$$

$$E = \alpha_4 + \alpha_5.\Delta pt + \alpha_6.\Delta ag \quad (2)$$

E as equações particulares 3 e 4 encontradas para as 16 argamassas dosadas foram:

$$Rc = -4,07 + 35,76.\Delta pt - 18,28.\Delta ag \quad (3)$$

$$(r^2 = 0,9564)$$

$$E = 2,75 + 56,53.\Delta pt - 37,05.\Delta ag \quad (4)$$

$$(r^2 = 0,9603)$$

Os acréscimos de areia para o ajuste de trabalhabilidade resultaram em teores de areia em relação ao cimento na faixa entre 1,92 e 4,35. É interessante observar na Figura 4 que a capacidade de incorporação de areia da mistura possui forte correlação com a relação entre água e cimento, exceção da mistura D6 (ponto em negrito), que, sendo uma relação entre água e aglomerante muito baixa e com um elevado teor de cal (considerando o tipo de argamassa de que se trata), adentra em comportamento reológico que foge da linearidade apresentada pelas demais misturas. O valor médio do índice “i” do Gtec Teste referente ao traço D6, apresentado na Tabela 2, mostra que essa mistura era muito mais coesa que as demais.

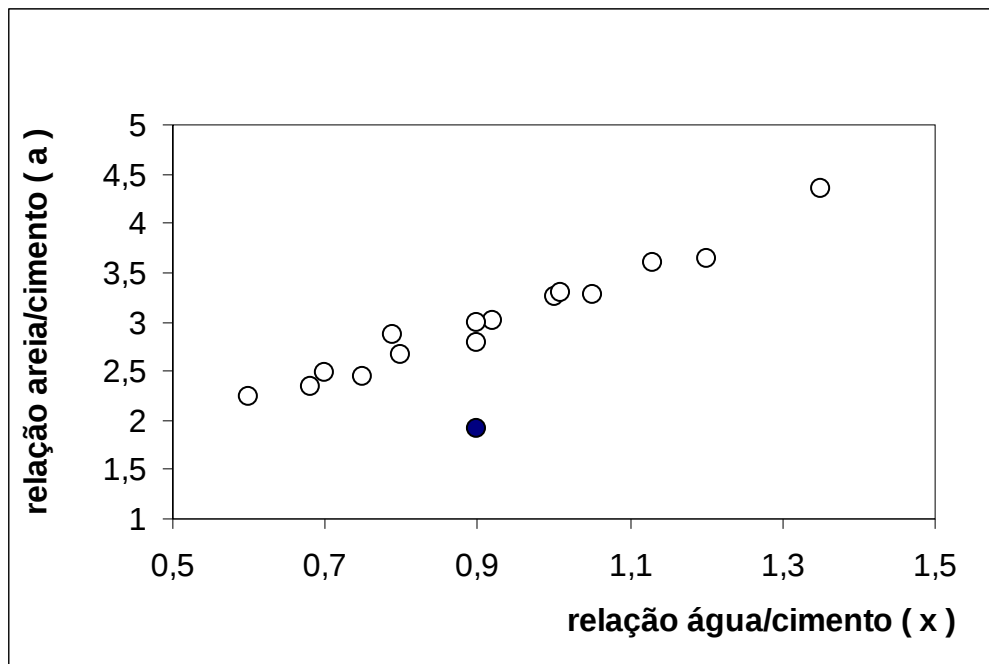


Figura 4 – Teor de areia sobre o cimento *versus* relação entre água e cimento

A regressão apresentada na Figura 4 apresenta $R^2 = 0,77$, e, eliminando-se o ponto referente à mistura D6, o R^2 passa para 0,92, que pode ser considerado um ótimo coeficiente de determinação. Entretanto, para possibilitar estudos de dosagem através de um modelo matemático mais eficaz, foi realizada regressão múltipla entre o teor de areia com a relação a/c e com a relação cal/c. Desse modo, encontrou-se $R^2 = 0,87$, e, eliminando o ponto referente à mistura D, o coeficiente de determinação encontrado foi de 0,97. O maior erro de previsão do teor de areia em relação ao cimento, nesse caso, foi de apenas 7,2% do valor real obtido nas misturas. A equação 5 segue o seguinte modelo:

$$a = \alpha_7 + \alpha_8.k + \alpha_9.x \quad (5)$$

onde:

a = proporção de areia do traço em massa;

k = proporção de cal do traço em massa;

x = relação entre água e cimento em massa; e

α_7 , α_8 , α_9 são constantes obtidas na operação de regressão.

A equação 6, obtida para os materiais deste trabalho em particular, foi:

$$a = 0,4759 - 0,1508.k + 2,7971.x \quad (6)$$

Conclusões

Argamassas mistas de cimento e cal podem ser produzidas com expressiva independência entre a resistência à compressão e o módulo de deformação. A utilização de modelo matemático para expressar com precisão aceitável essas variáveis em função das proporções entre os materiais componentes de uma argamassa formulada em massa pode viabilizar estudos que visem ao estabelecimento de parâmetros de dosagem, isto é, os valores ideais para essas variáveis segundo sua utilização e ainda o desenvolvimento de métodos para o estudo de dosagem visando à obtenção de argamassas que atendam às especificações.

É provável que a estratégia utilizada neste trabalho também possa ser utilizada com sucesso na utilização de modelos matemáticos para expressar outras variáveis importantes para o desempenho adequado das argamassas, como a retração e a resistência de aderência.

Argamassas com comportamentos reológicos bem diferentes podem ser consideradas igualmente trabalháveis pelo pedreiro. É preciso desenvolver métodos práticos para medir a reologia das argamassas, mas é preciso ter o cuidado para não limitar muito as faixas de utilização. Para isso é fundamental a opinião do pedreiro, pois a trabalhabilidade é, no atual estágio de desenvolvimento da tecnologia das argamassas, ainda um conceito abstrato.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento de paredes e tetos – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995. 2 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

CASALI, J. M. **Estudo comparativo do comportamento de diferentes tipos de argamassas de assentamento para alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2003. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. A simple model to explain compressive strength of high-performance concrete. In: HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. INTERNATIONAL CONFERENCE, 3., Recife, 2002. **Proceedings...** Performance and Quality of Concrete Structures. SP 207. Recife, PE, Brasil, 2002, SP 207-9. p. 139-150.

GOMES, A. O.; NEVES, C. M. M. Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2002.

PRUDÊNCIO JR., R. L.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN, C. A. **Alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Florianópolis: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002. 208 p.

RAGO, F.; CINCOTO, M. A. A reologia da pasta de cimento e a influência da cal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. **Anais...** Goiânia, 1995. p. 125-32.