DOSAGEM DE ARGAMASSAS PELO DELINEAMENTO ESTATÍSTICO DE MISTURAS E OTIMIZAÇÃO MÚLTIPLA: ARGAMASSA ESTABILIZADA

Tema: Tecnologia dos materiais.
Grupo: 2

CLEBER M. R. DIAS[1], RAQUEL R. SANTOS[2], ANA L. S. F. CONCEIÇÃO[3], ELLEN C. B. MIRANDA[4], VANESSA S. SILVA[5]

[1]Prof. Dr, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia/UFBA, clebermrd@gmail.com
[2]Graduanda em Eng. Civil, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia/UFBA, raquel.ramos.sts@hotmail.com
[3]Graduanda em Eng. Civil, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia /UFBA, analuciafreitas94@gmail.com
[4] Graduanda em Eng. Civil, Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia /UFBA, ellen_miranda10@hotmail.com
[5]Profª Drª, Escola Politécnica - Universidade Federal da Bahia/UFBA, vanessass@ufba.br

RESUMO

Este artigo propõe o uso do delineamento estatístico de misturas aliado à otimização múltipla para a dosagem de argamassas estabilizadas. A estratégia *screening* foi empregada na definição de formulações que serviram para a construção de modelos que explicam as propriedades das argamassas estabilizadas no estado fresco e endurecido a partir da proporção dos materiais. As correlações lineares permitiram identificar a dependência entre as propriedades das argamassas e as frações mássicas dos materiais utilizados. Os polinômios lineares de Scheffé apresentaram-se como modelos estatisticamente adequados à previsão de propriedades e otimização do desempenho e custo das argamassas estabilizadas.

Palavras-chave: Argamassa estabilizada, dosagem, delineamento de misturas, otimização, desempenho.

STATISTICAL MIXTURE DESIGN AND MULTIPLE OPTIMIZATION FOR MORTARS DOSAGE: READY-MIX MORTAR

ABSTRACT

This paper proposes the use of the statistical mixture designs combined with multiple optimization for the dosage of ready-mix mortars. The screening mixture design was used in the definition of formulations that were used to construct models that explain the properties of ready-mix mortars in the fresh and hardened state considering the formulation. The linear correlations allowed to identify the dependence between the properties of the mortars and the mass fractions of the used ingredients. Scheffé linear polynomials were presented as statistically suitable models for predicting properties and optimizing performance and cost of ready-mix mortars.

Key-words: Ready-mix mortar, dosage, mixture design, optimization, performance.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços na tecnologia dos aditivos têm proporcionado o desenvolvimento de misturas cimentícias especiais[1], como as argamassas estabilizadas. Entretanto, a grande diversidade de aditivos disponíveis e a falta de domínio da interação entre eles e demais matérias primas na mistura, bem como a ausência de normalização[2, 3] e a falta de um método universal de dosagem, têm dificultado a escolha eficiente das formulações, implicando em problemas relacionados à trabalhabilidade, enrijecimento e desempenho mecânico.

Modelos que correlacionam as propriedades de misturas com suas formulações são indispensáveis para a escolha assertiva da proporção entre os materiais. Entretanto, estabelecer as regras de mistura pode ser uma tarefa árdua quando a quantidade de materiais envolvido é grande e se desconhece a sinergia entre os materiais.

Experimentos com misturas podem ser definidos como aqueles em que se mistura dois ou mais materiais em proporções estrategicamente variadas, e se coleta propriedades (respostas) resultantes das diferentes proporções[4, 5]. Neste tipo de problema há pelo menos uma restrição: a soma das frações mássicas, ou volumétricas, dos materiais deve ser igual a 1, conforme Equação 1, e as respostas coletadas são exclusivamente relacionadas às frações dos materiais. Em 1957, Henry Scheffé[4] propôs regressões polinomiais, como a Equação 2 (linear) e a Equação 3 (quadrática), para relacionar as respostas experimentais às frações dos materiais em problemas envolvendo misturas.

$$\sum_{i=1}^{q} X_i = 1 \tag{1}$$

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{q} \beta_i X_i \tag{2}$$

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{q} \beta_i X_i + \sum\sum_{i<j}^{q} \beta_{ij} X_i X_j \tag{3}$$

Em que:

$\hat{y}$ é o valor estimado da propriedade de interesse da argamassa, q é o número de materiais, β_i é o coeficiente constante do termo X_i do polinômio de ajuste, assim como β_{ij} é para $X_i X_j$ e X_i é a proporção da i-ésima matéria-prima.

Este trabalho propõe combinar o delineamento estatístico de misturas e a otimização múltipla[6] na dosagem de argamassas estabilizadas. Neste estudo, os polinômios de Scheffé são empregados como regras que relacionam as propriedades das argamassas estabilizadas no estado fresco e endurecido com as frações mássicas de seis materiais.

2. ARRANJO EXPERIMENTAL

Foram etapas do arranjo experimental: a) a caracterização parcial dos materiais (materiais) constituintes das argamassas; b) a elaboração do projeto estatístico de mistura; c) a produção e caracterização laboratorial das argamassas; d) a criação e checagem da adequação dos modelos estatísticos (regras de mistura); e) a otimização múltipla.

2.1. Materiais

Para o preparo das argamassas foram empregados os seguintes materiais: a) cimento CP II - Z 40 (ρ= 3297 kg/m³), coletado em central de produção de argamassas; b) cal CH-I (ρ= 2488 kg/m³); c) areia quartzosa (ρ= 2650 kg/m³, D_{max} 1,18 mm e M.F.= 1,66) coletada em central de produção de argamassas; d) aditivo estabilizador de hidratação (AEH) (ρ= 1,17 g/cm³) Power Mix Retard 225 da MC-Bauchemie e; e) aditivo incorporador de ar (IAR) (ρ= 1,0 g/cm³) Power Mix 411 BR, do mesmo fabricante do AEH.

2.2. Elaboração do projeto de mistura

Para a elaboração do projeto estatístico de mistura, os níveis máximo e mínimo das frações mássicas dos materiais foram estabelecidos considerando as recomendações do fabricante, no caso dos aditivos, e a viabilidade do preparo das argamassas. A Tabela 1 apresenta os pontos experimentais gerados no software Design-Expert 11® através da ferramenta *screening (D-optimal)*[7]. Nesta tabela são apresentadas, as frações mássicas de cada ingrediente nas formulações (séries), bem como parâmetros de interesse tecnológico correspondentes a cada formulação. O projeto experimental é composto por treze formulações, elaborado para a combinação de seis materiais. Neste projeto, o teor de AEH variou de 0 a 1,5% em relação à massa de cimento, enquanto o de IAR variou de 0,2 a 0,6%. A relação entre a massa de areia e a de cimento Portland variou de 3,0 a 7,5, e a relação a/c variou de 0,67 a 1,5.

2.3. Preparo e caracterização das argamassas

As argamassas das séries apresentadas na Tabela 1 foram preparadas em sequência randômica em argamassadeira com capacidade de 5 L. A sequência de mistura foi a que se segue: a) introdução da água e aditivos na cuba da argamassadeira; b) introdução do material sólido homogeneizado, seguida de repouso por 1 min; c) mistura em baixa rotação por 30 s, seguida de repouso por 1 min e; d) mistura em baixa rotação por 30 s. As argamassas tiveram as seguintes propriedades no estado fresco caracterizadas: a) tempo de início de pega (IP); b) índice de consistência (IC) *flow table* (NBR 13276); c) densidade de massa (ρ_m) (NBR 13278); d) teor de ar incorporado (NBR 13278) e; e) retenção de água (RA) (NBR 13277).

Tabela 1 – Formulações do projeto de mistura e propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

Série	Fração mássica						Estado fresco								Estado endurecido				
	X_{Cim}	X_{Cal}	X_{Areia}	X_{AEH}	X_{IAR}	$X_{Água}$	C_{cim}** (kg/m³)	$C_{Água}$** (kg/m³)	IP (h)	IC (mm)	ρ_m (kg/cm³)	RA (%)	AI (%)	Custo (R$/m³)	ρ_{ap} (kg/m³)	C_{abs} (g/dm².min$^{1/2}$)	R_t (MPa)	R_c (MPa)	E_{din} (GPa)
1	0,2000	0,0000	0,6494	0,00000	0,00060	0,1500	342	257	3,40	298	1712	83,0	21,4	210,00	1675	6,54	3,84	12,8	15,0
2	0,1629	0,1000	0,6000	0,00150	0,00060	0,1350	274	227	35,95	261	1684	97,8	22,8	271,99	1637	2,02	4,61	15,2	14,6
3*	0,1439	0,0439	0,6686	0,00075	0,00050	0,1424	232	230	22,55	290	1614	77,1	25,7	198,33	1563	4,76	2,60	8,75	11,6
4	0,2000	0,0000	0,6646	0,00000	0,00040	0,1350	332	224	3,66	241	1662	75,3	25,3	203,45	1684	3,96	3,99	16,4	16,1
5*	0,1439	0,0439	0,6686	0,00075	0,00050	0,1424	232	230	22,02	286	1613	80,3	25,7	198,32	1564	3,86	3,35	9,32	12,2
6*	0,1439	0,0439	0,6686	0,00075	0,00050	0,1424	232	230	23,60	289	1615	80,1	25,6	198,47	1567	5,26	2,93	8,53	10,9
7*	0,1439	0,0439	0,6686	0,00075	0,00050	0,1424	232	229	22,61	279	1611	83,2	25,8	198,00	1559	2,12	3,88	12,8	13,4
8	0,1000	0,0000	0,7494	0,00000	0,00060	0,1500	151	227	3,74	258	1511	67,7	29,6	121,85	1457	16,75	0,33	2,28	6,2
9	0,1000	0,1000	0,6496	0,00000	0,00040	0,1500	161	242	0,27	246	1612	90,0	24,1	210,52	1570	6,86	1,98	6,96	10,0
10	0,2000	0,0000	0,6481	0,00150	0,00040	0,1500	354	265	---	312	1769	*Outlier*	18,7	222,48	1646	10,36	1,82	4,60	12,2
11	0,1000	0,1000	0,6481	0,00150	0,00040	0,1500	163	245	34,70	286	1632	94,9	23,0	219,17	1537	10,62	1,40	5,55	9,1
12	0,2000	0,0646	0,6000	0,00000	0,00040	0,1350	356	240	2,90	241	1779	91,6	19,4	275,70	1814	2,11	5,48	24,4	19,9
13	0,1131	0,0000	0,7500	0,00150	0,00040	0,1350	169	201	---	231	1491	60,2	32,0	133,55	---	---	---	---	---
14*	0,1439	0,0439	0,6686	0,00075	0,00050	0,1424	234	232	21,01	271	1628	77,0	25,0	200,09	1574	3,73	3,72	10,5	12,6
15	0,1000	0,0129	0,7500	0,00150	0,00060	0,1350	149	201	---	256	1489	74,3	31,9	135,65	---	---	---	---	---
16	0,1000	0,1000	0,6644	0,00000	0,00060	0,1350	158	213	1,78	223	1579	87,9	27,1	207,47	1582	4,90	2,47	7,6	11,3
17	0,2000	0,0479	0,6000	0,00150	0,00060	0,1500	343	257	60,10	302	1716	79,8	20,7	258,26	1650	2,58	4,88	16,6	15,5
Mín.	**0,1000**	**0,0000**	**0,6000**	**0,00000**	**0,00040**	**0,1350**	**149**	**201**	**0,27**	**223**	**1489**	**60,2**	**18,7**	**121,85**	**1457**	**2,02**	**0,33**	**2,28**	**6,17**
Máx.	**0,2000**	**0,1000**	**0,7500**	**0,00150**	**0,00060**	**0,1500**	**356**	**265**	**60,10**	**312**	**1779**	**97,8**	**32,0**	**275,70**	**1814**	**16,75**	**5,48**	**24,4**	**19,9**

Obs.: *As formulações 3, 5, 6, 7 e 14 são idênticas e correspondem ao centróide do hiperpoliedro limitado pelos vértices extremos da região experimental; **Consumo de cimento considerando o volume aparente das argamassas.

O IP foi determinado através do monitoramento por até 120 h, da temperatura de aproximadamente 1 kg de argamassa de cada série, armazenado em caixas de poliestireno expandido. Neste ensaio, feito com repetição em duas amostras da mesma série, foram empregados sensores de temperatura DS18B20 e microcontrolador Arduino. O tempo correspondente ao final do período de indução foi considerado igual ao IP.

Foram preparados três corpos de prova de cada série com (40 x 40 x 160) mm³. Os corpos de prova permaneceram nos moldes por cinco dias, quando foram desmoldados e submetidos à cura ao ar em laboratório (UR= 65% e T= 23°C), até completarem 28 dias. Nesta idade, as seguintes propriedades foram caracterizadas: a) densidade aparente (ρ_{ap}) (NBR 13280); b) coeficiente de absorção capilar (C_{abs}) (NBR 15259); c) módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) (NBR 15630); d) resistência à tração na flexão (R_t) (NBR 13279) e; e) resistência à compressão axial (R_c) (NBR 13279). Todas as propriedades avaliadas foram determinadas seguindo os procedimentos das Normas Brasileiras vigentes correspondentes.

3. RESULTADOS

Nota-se na Tabela 1, ampla faixa de variação nas propriedades das argamassas avaliadas, o que é esperado para um projeto de misturas em que as frações mássicas dos materiais variam em níveis amplos. As formulações 13 e 15 não apresentaram IP dentro do período de monitoramento de 120 h e os corpos de prova destas formulações não enrijeceram dentro do prazo estabelecido para desmoldagem (5 dias). Estas formulações não tiveram, portanto, a caracterização no estado endurecido realizada.

A Tabela 2 apresenta as correlações lineares entre as frações mássicas dos materiais e as propriedades das misturas. A correlação linear r (Equação 4), corresponde ao grau de dependência entre duas variáveis (X e Y). Este parâmetro estatístico varia entre -1 e 1. Quando tem módulo próximo de 1, significa que há forte dependência entre a propriedade da mistura e a fração mássica do material considerado. O valor 0 corresponde à independência entre a propriedade e a fração mássica. Valor positivo para a correlação linear indica que o valor para a propriedade aumenta com o aumento da fração mássica do material. Valor negativo, por outro lado, indica que há redução no valor da propriedade com o aumento da fração mássica do material.

$$r = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\frac{(X_i - \bar{X})}{s_x}.\frac{(Y_i - \bar{Y})}{s_y} \quad (4)$$

Em que:

X_i é a iésima fração mássica do material considerado, $\bar{X}$ é a média das frações mássicas do material considerado, s_x é o desvio padrão das frações mássicas do material considerado, Y_i é iésimo valor para a propriedade considerada, $\bar{Y}$ é o valor médio para a propriedade

considerada, s_y é o desvio padrão dos valores para a propriedade considerada e N é o número de observações.

Foram constatadas fortes correlações positivas entre o tempo de início de pega e a fração mássica do AEH; entre o índice de consistência e a fração mássica de água; entre a retenção de água e a fração mássica de cal hidratada e; entre o teor de ar incorporado e a fração de areia (Tabela 2). São observadas fortes correlações negativas entre a retenção de água, bem como a densidade de massa e a fração mássica de areia, indicando que os valores para estas propriedades reduzem com o aumento da fração de areia.

Constatou-se também, pela forte correlação linear positiva na Tabela 2, o importante papel do cimento Portland nas propriedades mecânicas, indicando que o aumento da fração mássica de cimento promove o aumento do E_{din}, R_t e R_c. Em contrapartida, o aumento da fração mássica deste material promove a redução nos valores de E_{din}, R_t e R_c. Isto pode ser constatado a partir das moderadas correlações lineares negativas entre estas propriedades e a fração mássica de areia.

Tabela 2 – Correlações lineares entre as frações mássicas dos materiais e as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

Material	IP	IC	RA(%)	ρ_m*	AI(%)	ρ_{ap}*	C_{abs}	E_{din}	R_t	R_c
Cimento	0,19	0,47	0,13	0,84	-0,73	0,86	-0,41	0,87	0,74	0,71
CH-I	0,20	-0,23	0,78	0,14	-0,25	-0,08	-0,30	-0,07	0,07	0,05
Areia	-0,38	-0,41	-0,76	-0,87	0,89	-0,62	0,52	-0,62	-0,61	-0,58
AEH	0,94*	0,43	-0,05	-0,06	0,04	-0,10	-0,08	-0,03	0,07	-0,10
IAR	0,24	0,12	-0,02	-0,21	0,21	-0,27	-0,02	-0,13	0,09	-0,05
Água	0,22	0,76	0,07	0,23	-0,39	-0,44	0,60	-0,55	-0,56	-0,59

Obs.: *Fortes correlações estão sublinhadas.**Os resultados são obtidos em g/cm³.

Os coeficientes dos polinômios de Scheffé, utilizados para ajustar os dados de algumas propriedades selecionadas, são apresentados na Tabela 3. A análise de variância mostrou que todos os modelos lineares, com exceção do utilizado para ajustar o C_{abs}, são estatisticamente significantes para o nível de significância de 95%. Para o C_{abs} empregou-se um modelo quadrático alternativo estatisticamente significante, que contem parâmetros de interação binária entre os materiais de mais alta correlação linear com o C_{abs}.

O projeto estatístico elaborado possibilitou obter resultados que permitem, através dos polinômios de Scheffé e a otimização múltipla, estabelecer formulações de argamassas que se enquadram em qualquer classe estabelecida pela NBR 13281:2005[8], para a retenção de água, coeficiente de absorção capilar e resistência à tração na flexão. Os resultados permitem formular argamassas com densidades de massa nas classes D2 a D4, densidades aparentes nas classes M3 a M6, e resistências à compressão nas classes P2 a P6.

Tabela 3 – Coeficientes dos polinômios de Scheffé para propriedades selecionadas das argamassas.

Parâmetro	IP	RA(%)	ρ_m	ρ_{ap}	C_{abs}	R_t	R_c	Custo
β_1	10,78	129,65	3,651E+03	6,248E+04	1,689E+02	36,49	149,02	1672,306
β_2	-18,44	284,65	1,276E+04	-3,355E+04	-3,511E+02	22,49	95,25	2098,85
β_3	18,99	43,10	6,576E+00	-2,472E+04	-3,251E+02	2,99	11,72	-34,6331
β_4	-89490	-1272,33	-1,322E+05	3,278E+06	-6,164E+03	-278,59	-2703,28	5195,613
β_5	-121,23	8623,62	-2,011E+06	-6,980E+06	4,304E+05	3029,18	3086,84	-262728
β_6	-73,65	121,09	7,447E+03	-3,327E+05	1,479E+03	-47,33	-167,07	595,1876
β_{12}	---	---	-3,649E+03	---	---	---	---	---
β_{13}	---	---	---	---	---	---	---	-1203,77
β_{14}	159790		---	-3,813E+05	---	---	---	---
β_{15}	---	---	---	---	-9,938E+05	---	---	---
β_{16}	---	---	---	---	---	---	---	---
β_{23}	---	---	---	1,456E+05	---	---	---	---
β_{24}	---	---	---	---	8,304E+04	---	---	---
β_{26}	---	---	-6,786E+04	---	---	---	---	-8415,7
β_{34}	---	---	2,205E+05	-4,917E+06	---	---	---	---
β_{35}	---	---	2,728E+06	---	---	---	---	345667,3
β_{36}	---	---	---	5,668E+05	---	---	---	---
β_{46}	644443,61	---	---	---	---	---	---	---
β_{56}	---	---	---	4,564E+07	-1,965E+06	---	---	---
R^2	0,9981	0,8412	0,9965	1,0000	0,9748	0,8268	0,8267	0,9992
R^2 ajustado	0,9959	0,7618	0,9920	0,9999	0,9413	0,7306	0,7304	0,9985

Para testar a validade da otimização múltipla, cujos princípios foram estabelecidos por Derringer e Suich[8], fez-se a simulação da dosagem de uma argamassa com IP entre 36 e 40 h, e classes P5 (5,5 MPa ≤ R_c ≤ 9,0 MPa), M4 (1400 kg/m³ ≤ ρ_m ≤ 1800 kg/m³), R4 (2,0 MPa ≤ R_t ≤ 3,5 MPa), C4 (3,0 g/dm².min$^{1/2}$ ≤ C_{abs} ≤ 7,0 g/dm².min$^{1/2}$), D3 (1400 kg/m³ ≤ ρ_{ap} ≤ 1800 kg/m³), U3 (80% ≤ RA ≤ 90%). Foi estabelecida a desejabilidade 1 para valores dentro das faixas em cada classe citada, e zero para valores fora das faixas. Para o custo foi estabelecida a desejabilidade 1 para valores menores que R$ 121,85/m³ e zero para valores maiores que R$ 275,70/m³. A desejabilidade para o custo variou de forma linear para valores entre estes limites. A desejabilidade global, que consiste da média geométrica das desejabilidades individuais, foi maximizada no procedimento de otimização.

Na simulação obtiveram-se as seguintes frações mássicas para os materiais: X_{cim} = 0,1260, X_{Cal} = 0,0486, X_{Areia} = 0,6813, X_{AEH} = 0,0015, X_{IAR} = 0,0006, $X_{Água}$ = 0,1419, o que corresponde ao traço unitário 1: 0,386: 5,405: 0,0119: 0,0048: 1,126 (Cimento: cal: areia: AEH: IAR: Água). As propriedades previstas para esta formulação são: IP = 36 h, IC= 278 mm, ρ_m= 1587 kg/m³, RA = 80%, AI(%) = 27%, R_c = 5,50 MPa, ρ_m= 1531 kg/m³, R_t = 2,41 MPa, E_{din}= 9,38 GPa, ρ_{ap}= 1528 kg/m³ e C_{abs} = 5,1 g/dm².min$^{1/2}$ e custo igual a R$ 203,74/m³.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho propõe a aplicação de projetos estatísticos de mistura para a dosagem e otimização de formulações de argamassas. O método proposto permitiu gerar um projeto de mistura robusto com ampla variação nas propriedades das argamassas. O tempo de início de pega, determinado através do monitoramento da temperatura da mistura, variou de 0,27 a 60,1 h. Algumas misturas contendo o percentual máximo de aditivo estabilizador recomendado pelo fabricante não apresentaram início de pega dentro do período monitorado (120 h). Os polinômios de Scheffé apresentaram-se como regras de misturas eficazes para a previsão de propriedades em função da proporção mássica dos materiais, e para a otimização múltipla que leva em consideração o desempenho das argamassas e o custo com materiais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Bruno Ribeiro, João Paulo, Henrique Almeida, Nilson Júnior, e ao Prof. Dr. Daniel Véras pela disponibilização do PUNDIT.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CASTRO, A. L.; PANDOFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica,** 55 (2009) 18-20.

2. BAUER, E; REGUFFE, M.; NASCIMENTO, M. L. M.; CALDAS, L. R. Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimentos. **XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas XI SBTA**. P 28-30. Porto Alegre. 2015

3. CASALI, J. M.; MELO, F. D.; SERPA, V. C.; OLIVEIRA, A. L. de; BETIOLI, A. M.; CALÇADA, L. M. L. Influence of cement type and water content on the fresh state properties of ready mix mortar. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 33-52, abr./jun. 2018.

4. SCHEFFÉ, H. Experiments with mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society** B 20. 344-360. (1958)

5. CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures**. John Wiley & Sons. New York. (1981)

6. DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology** 12 (4) (1980).

7. SNEE R. D.; MARQUARDT, D. W. Screening concepts and design for experiments with mixtures. **Technometrics** 18 (1) (1976)

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. **Rio de Janeiro**, 2005.