

Metodologia para Formulação de Massas Cerâmicas Usando a Função Perda de Qualidade

Jair Silveira*, Josinaldo Pereira Leite*

Departamento de Tecnologia Mecânica, Centro de Tecnologia, UFPB,
Cidade Universitária, 58051-970 João Pessoa - PB, Brasil
*e-mail: jsilveira@lrh.ct.ufpb.br, josinaldo@ct.ufpb.br

Resumo: O presente trabalho tem o objetivo de propor uma metodologia para formulação de massas aplicadas em revestimentos cerâmicos através de técnicas de delineamento de misturas, particularmente, através de expressões matemáticas denominadas **Função Perda de Qualidade**. O projeto de misturas simplex em pseudocomponentes utilizado permitiu reduzir ao mínimo o número de experimentos. Foram consideradas seis matérias-primas como fatores de controle: talco, quartzo, calcário, filito, dolomita e argilas. As respostas analisadas foram aquelas que afetam a qualidade do produto cerâmico: retração linear, resistência mecânica à flexão e absorção de água. Compararam-se as características de qualidade do corpo cerâmico otimizado de uma matriz de planejamento com o corpo cerâmico elaborado em indústria local.

Palavras-chave: projeto de experimentos, otimização de massas cerâmicas, revestimentos cerâmicos, delineamento de misturas cerâmicas

1. Introdução

Na fabricação de revestimentos cerâmicos, são usadas misturas de matérias-primas provenientes de diversos lugares com características físicas e químicas variáveis. Essas mudanças de matérias-primas alteram as qualidades do produto acabado, o que implica na constante reformulação na composição da massa cerâmica através de tentativa e erro, consumindo tempo, desperdício de material e mão de obra¹. O projeto de experimentos para mistura Simplex é uma das opções disponíveis para um estudo sistemático de formulação de massas cerâmicas^{2,3}, possibilitando, inclusive, um bom entendimento das interações entre os componentes da mistura.

Desenvolvem-se expressões matemáticas denominadas **função de perda**, as quais permitem selecionar a melhor massa dentre várias de uma matriz de planejamento⁴. Esse critério leva em consideração os tipos de características de qualidades desejadas, respeitando as propriedades dos tipos “maior é melhor” e “menor é melhor”, por exemplo: resistência à flexão e absorção de água.

2. O Projeto Experimental

A matriz de planejamento foi elaborada tomando como referência uma massa cerâmica produzida em uma indústria local, com composição de 10% de talco, 4% de quartzo, 3% de calcário, 14% de filito, 5% de dolomita e 64% de argila (aqui denominada massa de referência MR), tendo como respostas: 2,3% de retração linear, 172 Kgf/cm² de resistência à flexão e 14,7% de absorção de água. Essas respostas foram aperfeiçoadas através de um processo de otimização, que foi desenvolvido nas seguintes etapas: 1) **Identificação do problema**, onde foram definidos os objetivos do estudo e as características de qualidade de interesse do cliente e da produção, com seus valores alvos, importância relativas e limites de tolerância; 2) **Planejamento e execução de experimentos**, onde foram planejados e analisados os experimentos segundo os princípios do *DOE - Design of Experiments*³, tendo como fatores controláveis as matérias primas; e 3) **Otimização e discussão dos resultados**, onde foram desenvolvidas modelagens através de regressão linear, das respostas em função dos fatores de controle, otimizando a massa cerâmica através do critério de função perda.

A transformação para pseudocomponentes⁵, resultante da aplicação da Equação 1, dá os valores contidos na Tabela 1, na coluna “níveis codificados”.

$$X'_i = \frac{X_i - L_i}{1 - \sum_1 L_i} \quad (1)$$

onde: X'_i representa o valor em pseudocomponentes i , \sum_{L_i} é o somatório dos limites inferiores dos componentes, e X_i é o percentual verdadeiro do componente i .

A Tabela 1 mostra a matriz de planejamento com as 21 massas elaboradas e a massa de referência MR, em termos de formulações reais e em pseudocomponentes. As composições mostradas foram processadas nas seguintes condições: cominuição durante 2 horas em moinho de bolas tipo tambor cilíndrico rotativo de porcelana, utilizando esferas de porcelana. As massas foram peneiradas em malha 200 mesh, secadas em estufa a 110 °C e compactadas em matriz uniaxial com punção de 50 mm x 150 mm. Foi usada uma prensa hidráulica automática com capacidade de 100 toneladas e aplicada uma pressão de 216 Kgf/cm². O produto cerâmico foi queimado em forno industrial tipo rolos, a temperaturas de 1180 °C. Estas condições de processamento foram às mesmas adotadas pela indústria.

3. Otimização e Discussão dos Resultados

A Tabela 2 mostra a **modelagem individual das respostas** para o modelo quadrático⁶, onde os coeficientes de determinação R^2 avaliam a representatividade das equações das regressões obtidas. Percebem-se os efeitos das interações das matérias-primas.

Essas equações mostram, por exemplo, que o quartzo quando associado ao calcário reduz a retração linear e a resistência à flexão⁷ simultaneamente (- 1,92 X_2X_3 e - 169 X_2X_3). Na linha de produção o que se procura é o mínimo de retração linear (menor é melhor), porém com o aumento da resistência à flexão (maior é melhor). Havendo conflito, é necessário, portanto, encontrar uma solução conciliatória. Surge daí a necessidade de um estudo que conduza a

Tabela 1. Matriz de planejamento das massas elaboradas.

	A: Formulação de massas em (%)						B: Níveis codificados					
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
M1	18	3	3	12	4	60	1	0	0	0	0	0
M2	8	13	3	12	4	60	0	1	0	0	0	0
M3	8	3	13	12	4	60	0	0	1	0	0	0
M4	8	3	3	22	4	60	0	0	0	1	0	0
M5	8	3	3	12	14	60	0	0	0	0	1	0
M6	8	3	3	12	4	70	0	0	0	0	0	1
M7	13	8	3	12	4	60	0,5	0,5	0	0	0	0
M8	13	3	8	12	4	60	0,5	0	0,5	0	0	0
M9	13	3	3	17	4	60	0,5	0	0	0,5	0	0
M10	13	3	3	12	9	60	0,5	0	0	0	0,5	0
M11	13	3	3	12	4	65	0,5	0	0	0	0	0,5
M12	8	8	8	12	4	60	0	0,5	0,5	0	0	0
M13	8	8	3	17	4	60	0	0,5	0	0,5	0	0
M14	8	8	3	12	9	60	0	0,5	0	0	0,5	0
M15	8	8	3	12	4	65	0	0,5	0	0	0	0,5
M16	8	3	8	17	4	60	0	0	0,5	0,5	0	0
M17	8	3	8	12	9	60	0	0	0,5	0	0,5	0
M18	8	3	8	12	4	65	0	0	0,5	0	0	0,5
M19	8	3	3	17	9	60	0	0	0	0,5	0,5	0
M20	8	3	3	17	4	65	0	0	0	0,5	0	0,5
M21	8	3	3	12	9	65	0	0	0	0	0,5	0,5
MR	10	4	3	14	5	64	0,2	0,1	0	0,2	0,1	0,4

X₁: Talco, X₂: Quartzo, X₃: Calcário, X₄: Filito, X₅: Dolomita, X₆: Argilas.

Tabela 2. Modelos de regressão obtidos para as respostas Y_i.

Variável de Resposta (Y _i)	R ²	Modelo Quadrático
Retração Linear (Y1)	97%	$Y_1 = 3,26X_1 + 2,42X_2 + 1,1X_3 + 3,23X_4 + 1,48X_5 + 3,07X_6 - 1,79 X_1X_3 - 1,03 X_1X_5 - 1,92 X_2X_3 - 1,88 X_2X_4 - 1,42 X_2X_4 - 2,32 X_3X_4 + 2,01 X_3X_5 - 1,87 X_3X_6 - 2,48 X_4X_5 + 1,16 X_4X_6$
Resistência a Flexão (Y2)	76%	$Y_2 = 147X_1 + 136X_2 + 135X_3 + 167X_4 + 116X_5 + 165X_6 + 142X_1X_4 + 101X_1X_5 + 116X_1X_6 - 169X_2X_3 + 114X_3X_5 + 96X_4X_5 + 96X_4X_6 + 119X_5X_6$
Absorção de Água (Y3)	94,3%	$Y_3 = 13,12X_1 + 17,35X_2 + 20,65X_3 + 15,85X_4 + 22,27X_5 + 15,5X_6 - 5,15X_1X_2 - 4,0X_1X_3 + 6,6X_2X_3 - 3,9X_2X_4 - 13,65X_2X_5 - 7,2X_2X_6 - 10,75X_4X_5 - 5,20X_4X_6$

otimização simultânea das respostas de interesse. Assunto que será explorado a seguir.

4. Otimização da Massa Cerâmica

4.1. A Função perda de qualidade

Seleciona-se a massa que teve a melhor performance dentre aquelas apresentadas na matriz de planejamento (Tabela 1).

Partindo do princípio da função de perda desenvolvida por Taguchi^{5,6}, e adaptando-a para o nosso estudo, as Figuras 1 e 2 interpretam o comportamento das massas em função das respostas desejadas.

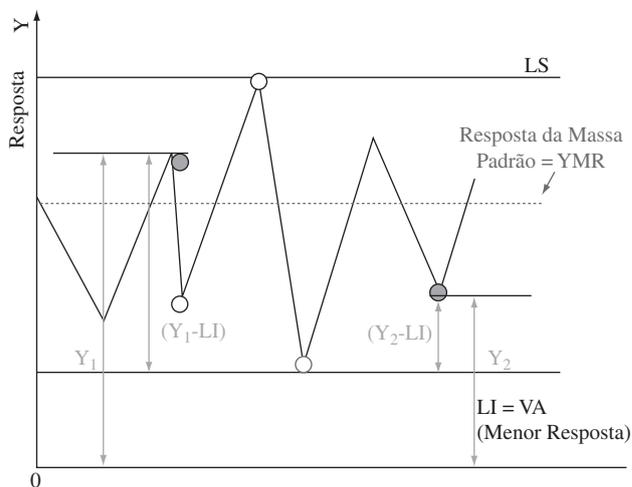


Figura 1. Comportamento do gráfico para resposta do tipo **menor é melhor**. Onde: LI = Limite Inferior = VA (valor Alvo): é o valor que seria ideal, (menor é melhor); LS = Limite Superior, é a pior resposta encontrada, (quando menor é melhor); e YMR é a resposta encontrada para a massa de referência, utilizada na indústria.

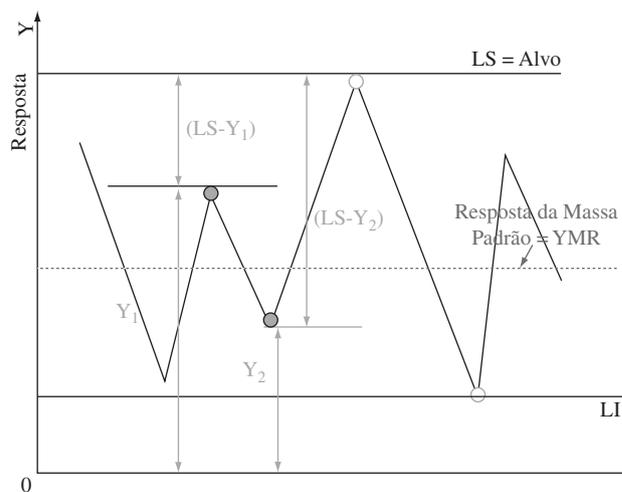


Figura 2. Comportamento do gráfico para resposta do tipo **maior é melhor**.

Essas respostas são aquelas que tiveram maior aproximação dos valores almejados, respeitando as condições: o valor alvo é o limite inferior para respostas do tipo “quanto menor é melhor”, e o valor alvo é o limite superior para resposta do tipo “quanto maior é melhor”. Procura-se deduzir uma expressão que represente o somatório das perdas das respostas encontradas, de forma que as menores perdas conduzam a otimização das melhores respostas, e conseqüentemente a melhor formulação de massa.

A Figura 1 compara duas situações quando se procura respostas do tipo “menor é melhor”.

Percebe-se que $Y_1 > Y_2$, cuja situação é mais favorável para Y_2 (menor é melhor), e $[Y_1 - LI] > [Y_2 - LI]$, o que implica numa perda maior para Y_1 (pior resposta).

A Equação 2 representa a evolução no cálculo de perdas de qualidade para misturas cerâmicas a partir da discussão feita com base na Figura 1.

$$\check{Z}(i) = \sum_{j=1}^j [1/(LS - LI)^2 \times (IR) \times [(Y_j - LI)^2]] \quad (2)$$

(VA = LI, o valor alvo é o limite inferior).

I.R.: é a importância relativa (peso) das respostas entre si. São atribuídas a cada uma das características de qualidades de acordo com a experiência dos engenheiros da indústria onde foram formuladas as massas cerâmicas. Esses valores podem sofrer alterações de acordo com as prioridades desejadas; por exemplo, num revestimento utilizado para parede (azulejo), é mais importante a retração linear do que a resistência à flexão, tendo em vista que o corpo cerâmico não será submetido a grandes cargas, e sim um controle dimensional criterioso.

Para os casos do tipo “maior é melhor” (exemplo: resistência à flexão), a Figura 2 interpreta o comportamento de duas respostas, mostrando que as menores perdas ocorrem quando se tem a maior resposta.

Percebe-se que $Y_1 > Y_2$, cuja situação é mais favorável para Y_1 (maior é melhor), e $[LS - Y_1] < [LS - Y_2]$ o que implica numa perda maior para Y_2 .

De maneira análoga ao desenvolvimento da Equação 2, a equação da função de perda nessa situação (maior é melhor) é então:

$$\hat{Z}(i) = \sum_{j=1}^k [1/(LS - L_j)^2 \times (I.R.) \times [(LS - Y_j)^2]] \quad (3)$$

(VA = LS, o valor alvo é o limite superior).

Tabela 3. Quadro resumo das Perdas de Qualidade das massas.

Massa	Perda Z R.L.	Perda Z A.A.	Perda Z R.F.	Perda Z Total
M1	2,24	0,00	0,68	2,92
M2	0,82	0,89	1,10	2,81
M3	0,00	2,83	2,29	5,12
M4	2,19	0,37	0,47	3,03
M5	0,08	4,19	3,08	7,35
M6	1,80	0,28	0,45	2,53
M7	1,59	0,03	1,90	3,53
M8	0,25	0,77	0,83	1,85
M9	2,19	0,04	0,01	2,24
M10	0,56	0,64	0,43	1,63
M11	2,09	0,01	0,09	2,19
M12	0,04	2,83	5,05	7,92
M13	0,86	0,31	0,47	1,02
M14	0,18	0,54	1,40	2,12
M15	1,53	0,11	0,88	2,53
M16	0,22	1,67	0,41	2,30
M17	0,20	2,85	0,94	3,99
M18	0,20	1,23	0,20	1,63
M19	0,29	0,00	0,29	0,58
M20	2,77	0,08	0,00	2,85
M21	0,86	1,29	0,01	2,26

R.L.: Retração Linear; A.A.: Absorção de Água; e R.F.: Resistência à Flexão).

Maiores Perdas, em ordem crescente:

M19 < M13 < M10 < M18..... → M19 é a melhor massa (menor perda). (0,58) (1,02) (1,63) (1,63)

Tabela 4. Comparação das melhores massas, em relação à massa de referência MR.

Massa	A:Formulação de Massa (%)						B: Níveis Codificados						R.L.	R.F.	A.A.
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆			
M	10	4	3	14	5	64	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1	0,4	2,7	172	14,7
M19	8	3	3	17	9	60	0	0	0	0,5	0,5	0	1,8	166	16,4

R.L: Retração Linear (%); R.F: Resistência à Flexão (Kgf/cm²); e A.A. Absorção de Água (%).

A Tabela 3 a seguir mostra os resultados da perda de qualidade das massas, utilizando as Equações 2 e 3.

A Figura 3 mostra o comportamento das massas com relação às perdas de qualidade.

O modelo de otimização de perda pode ser encontrado em função das variáveis independentes X_j, pois, $Y = F(X)$ e $Z = F(Y) \rightarrow Z = F(X)$. A expressão a seguir representa, então, o modelo de perda Z(i) em função das matérias-primas: Percebe-se em termos absoluto, que a dolomita é a matéria-prima que mais contribui com a perda de qualidade das massas (10,16 X₅), e argila tende a minimizar as perdas de qualidade (2,82 X₆). Em termos relativos, filito e dolomita minimizam a perda de qualidade (- 22,26 X₄X₅):

$$Z(i) = 2,92X_1 + 3,66X_2 + 7,53X_3 + 3,41X_4 + 10,16X_5 + 2,82X_6 + 1,08X_1X_2 - 3,9X_1X_3 - 3,54X_1X_4 - 17,44X_1X_5 - 2,72X_1X_6 + 18,02X_2X_3 - 6,82X_2X_4 - 15,56X_2X_5 - 2,48X_2X_6 - 6,16X_3X_4 - 8,58X_3X_5 - 9,54X_3X_6 - 22,26X_4X_5 - 0,66X_4X_6. \quad (4)$$

A Tabela 4 mostra dados comparativos entre a melhor massa selecionada dentre aquelas elaboradas na matriz de planejamento, através da função perda (massa M19); e a massa fabricada na indústria, a massa de referência MR.

A massa M19 apresentou a uma retração linear, em torno de 50% menor do que a massa de referência MR, sem grandes alterações na resistência à flexão e absorção de água. Em termos de composição das matérias-primas, essa massa se caracteriza por um maior percentual de filito e dolomita, comparada com a massa de referência MR.

5. Conclusão

A utilização da técnica de análise de experimentos se mostrou eficaz no que se refere à formulação de massas cerâmicas, pois os estudos realizados permitiram uma melhor compreensão da influência das matérias-primas no comportamento das respostas das massas utilizadas na indústria, o que pode conduzir a melhoria da qualidade do produto, com menos refugo e conseqüentemente com menores custos de produção.

As equações de perdas de qualidade, que foram desenvolvidas neste trabalho, permitem selecionar a melhor massa dentre as várias que fazem parte da matriz de planejamento.

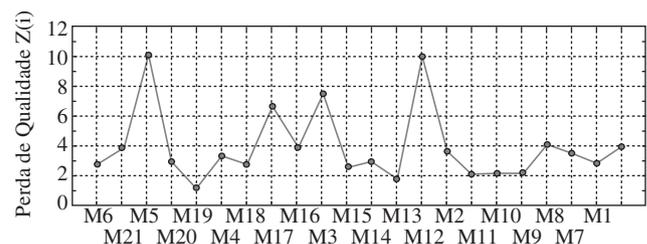


Figura 3. Comportamento das perdas de qualidade das massas.

Referências

1. Caten, C.; Ribeiro, J. L. Etapas na Otimização Experimental de Produtos e Processos: Discussão e Estudo de Caso. **Revista Produção**. Belo Horizonte, MG, v. 6, n. 1, p. 45-64, julho 1996.
2. Cornell, J. A. **Experiments with Mixtures**. 2. ed. New York, John Wiley & Sons, Inc 1981. 305 p.
3. Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5.ed. New York, John Wiley and Sons, 1991. 538 p.
4. Moura, E. C.; Taguchi, S. Aplicação Prática da Engenharia Robusta. 3 ed. **Controle da Qualidade**. São Paulo, SP, n. 81, p. 82-86, fevereiro 1999.
5. Neto, B.; Scarmínio, I.; Bruns, R. **Como fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 2. ed. Campinas, SP. Editora da UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, 2000. 401 p.
6. Bittencourt, L. E.; Junior, J. Metodologia Experimental para Desenvolvimento de uma Formulação de Revestimento Poroso em Processo de Monoporosa Através de Programação Linear. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 6, p. 35-40, julho/agosto 2001.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas Cerâmicas para Revestimento-Especificação e Métodos de Ensaios. Rio de Janeiro, ABNT, abril, 1997.