

UM NOVO MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DE FORMULAÇÕES CERÂMICAS

Carla S.Caten¹, J.Luis Ribeiro¹, Adriano M. Bernardini², Elita U.C.Frajndlich³, Humberto.G.Riella⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS/RS

²Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC/SC

³Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN/SP

⁴Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/SC

Caixa Postal 476 - CEP 88040-900 Florianópolis, SC

e-mail: riella@enq.ufsc.br

RESUMO

Este artigo inicialmente descreve um método de otimização de produtos ou processos medidos por múltiplas características de qualidade. O método proposto é quantitativo e flexível, permitindo otimizar simultaneamente, além de múltiplas características de qualidade, diferentes objetivos de interesse dos engenheiros. Em um segundo momento relata-se o estudo de otimização de uma formulação de massa cerâmica para pavimentos usando-se o método Taguchi [1]. Ao longo do texto, apontam-se falhas corriqueiras no planejamento e otimização de produtos e processos e faz-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos usando-se o método Taguchi e aqueles obtidos seguindo-se, sempre que possível, as etapas do método de otimização descrito neste artigo.

Descritores: massa cerâmicas, modelagem

INTRODUÇÃO

A otimização da formulação de pastas cerâmicas é muito importante, pois exerce influência decisiva em todas as etapas do processo de fabricação e nas características de qualidade do produto cerâmico resultante. No entanto, o aumento da proporção de uma matéria-prima pode influenciar positivamente determinada característica de qualidade e piorar as demais. Raramente a mesma proporção das matérias-primas na formulação conduz ao valor ideal de todas as características do produto cerâmico simultaneamente. Uma vez que haja conflito, é necessário fazer uma otimização global de todas as características de qualidade de interesse do cliente. Essa otimização global implica em uma solução de compromisso que

ABSTRACT

This article initially describes a method for optimization of products or processes measured by multiple quality characteristics. The proposed method is quantitative and flexible, leading to simultaneous optimization of multiple quality characteristics and several engineer aims. In a second moment it describes the optimization study of a ceramic mass formulation for pavements following Taguchi's methodology [1]. Routine failures in planning and optimization of products and processes are discussed and a comparative study of the results obtained with this method and that of Taguchi is presented.

Key words: ceramic masses, modelling

otimiza simultaneamente todas as características de qualidade, ponderando as importâncias relativas de cada característica sobre o produto cerâmico e os diferentes objetivos de interesse de engenharia.

Como as características do produto cerâmico dependem das matérias-primas e do processo de fabricação, há grande dificuldade na formulação de uma massa cerâmica que possa combinar as melhores características de cada matéria-prima e ao mesmo tempo ser produzida em um processo de fabricação econômico e dinâmico, como é a monoqueima.

Pelos métodos convencionais de formulação utiliza-se uma pasta padrão e faz-se ajustes na proporção de cada matéria-prima até serem obtidas

2

características de qualidade aceitáveis. Percebe-se o desperdício em tempo e dinheiro com tal método, pois o processo de otimização é realizado por tentativa e erro.

Assim, há necessidade de desenvolvimento de um método eficiente para a formulação de pastas cerâmicas quando pretende-se otimizar simultaneamente mais de uma característica de qualidade de interesse do cliente e mais de um objetivo de interesse do produtor. O objetivo deste artigo é a apresentação de um método de otimização de múltiplas características de qualidade e diferentes objetivos e sugerir técnicas usualmente utilizadas na área de Engenharia da Qualidade, como Projeto de Experimentos, Regressão Múltipla, Função de Perda Multivariada e Programação Linear. A otimização de produtos e processos é um dos focos centrais da área da Engenharia de Qualidade, a qual combina o uso de ferramentas da Engenharia e da Estatística.

O método proposto é quantitativo e flexível, uma vez que todo o conhecimento é modelado matematicamente e o ajuste ótimo é identificado através de um critério numérico, ou seja, uma função objetivo que permite incorporar múltiplas características de qualidade e diferentes objetivos de interesse.

Aplica-se o método proposto neste artigo aos dados de um estudo de formulação de pastas cerâmicas usando-se o método Taguchi^[1] e faz-se uma comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos.

O método proposto visa, prioritariamente, a otimização da qualidade de produtos avaliados por múltiplas características de qualidade. Além destas, o método considera também múltiplos objetivos, que podem ser otimizados simultaneamente^[2]. Para tal fim há as seguintes etapas:

- identificação do problema e planejamento e execução dos experimentos^[3-7].
- modelagem individual das características de qualidade^[8, 9],
- definição de uma função objetivo^[10]
- otimização.

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DA FORMULAÇÃO DE PASTA CERÂMICA PARA PAVIMENTOS

Este estudo de caso tem como objetivo fazer uma comparação entre os resultados obtidos em

um experimento usando-se o método Taguchi e aqueles obtidos utilizando-se o método proposto.

Ao longo do texto serão apontadas falhas de planejamento normalmente encontradas, e a otimização dos produtos e processos, visando alertar o leitor a prevenir possíveis equívocos.

Matérias-primas utilizadas

A tabela 1 apresenta a composição química das matérias-primas utilizadas nas pastas formuladas.

Os resultados dos ensaios físicos e mecânicos para as matérias primas, obtidos em forno mufla à temperatura de 1120°C, apresentam-se na tabela 2.

Identificação do Problema

A etapa de identificação do problema visa estabelecer claramente os objetivos do estudo. O foco do estudo experimental é a otimização da formulação de pasta cerâmica para pavimentos. Uma vez estabelecido este objetivo é necessário identificar quais as características de qualidade de interesse do cliente, que serão medidas no estudo experimental (variáveis de resposta). A escolha correta das características de qualidade é passo fundamental para a correta definição dos níveis dos fatores controláveis que otimizam o produto em estudo. As características de qualidade escolhidas nesse estudo apresentam-se na tabela 3.

No entanto, uma característica de qualidade muito importante não foi avaliada no estudo^[1], a *defloculação*. Ao final da análise dos resultados obtidos no estudo de otimização usando-se o método Taguchi identificou-se que a argila B otimizava as características de qualidade. Essa argila foi colocada em fabricação industrial e verificou-se que ela não tinha uma boa defloculação. Dessa forma, abandonou-se o uso dessa argila que havia sido identificada como sendo a argila ótima. Se a característica de qualidade – defloculação fosse medida no estudo experimental, este problema não ocorreria. Certamente a argila identificada como a argila ótima não seria a argila B, mas sim uma que atendessem a todas as características de qualidade de interesse, inclusive a defloculação.

Planejamento e Projeto de Experimentos

Nesta fase é necessário identificar todos os parâmetros do processo que pode influenciar as

Tabela 4. Fatores Controláveis na formulação da massa cerâmicos para pavimentos

Fatores Controláveis	Nível - 1	Nível 0	Nível +1
X1: Temperatura de Queima	1140°C		1160°C
X2: Percentual de Filito	43%	46%	49%
X3: Percentual de Argila	22%	25%	28%
X4: Percentual de Talco	9%	12%	15%
X5: Percentual de Arenito	8%	11%	14%
X6: Tipo de Argila	A	A e B	B
X7: Tipo de Filito	A	A e B	B
X8: Tipo de Talco	A	A e B	B

características de qualidade é pequeno. Contudo, não foram realizados testes de significância e assim não se chegou a essa conclusão. Decidiu-se então coletar dados adicionais sobre esses fatores, isto é, coletar dados adicionais sobre os fatores menos influentes. Há falha na análise do experimento: não se utilizou testes de significância para a tomada de decisão. Outra falha que também pode ser observada é que o projeto experimental foi ampliado de forma arbitrária, fugindo de um desenho ótimo [5]. A tabela 6 apresenta os fatores controláveis ensaiados no segundo experimento. O desenho do experimento escolhido foi um arranjo ortogonal

Tabela 5 - Arranjo ortogonal L_{18} com sete fatores a três níveis e um fator a dois níveis

Ensaio	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
1	1160	43	22	15	14	A	A	A
2	1160	43	25	9	11	A/B	A/B	A/B
3	1160	43	28	12	8	B	B	B
4	1160	46	22	15	11	A/B	B	B
5	1160	46	25	9	8	B	A	A
6	1160	46	28	12	14	A	A/B	A/B
7	1160	49	22	9	14	B	A/B	B
8	1160	49	25	12	11	A	B	A
9	1160	49	28	15	8	A/B	A	A/B
10	1140	43	22	12	8	A/B	A/B	A
11	1140	43	25	15	14	B	B	A/B
12	1140	43	28	9	11	B	A	B
13	1140	46	22	9	8	A	B	A/B
14	1140	46	25	12	14	A/B	A	B
15	1140	46	28	15	11	B	A/B	A
16	1140	49	22	12	11	B	A	A/B
17	1140	49	25	15	8	A	A/B	B
18	1140	49	28	9	14	A/B	B	A

avaliação dos resultados obtidos. Com o método de Taguchi não é possível identificar o melhor ajuste para os fatores X2, X4 e X5. Logo realiza-se um novo experimento para ensaiar apenas esses três fatores. Vale ressaltar que não foi possível identificar o melhor ajuste para X2, X4 e X5 porque o efeito desses fatores sobre as

L_9 que contempla três fatores ensaiados a três níveis (ver tabela 7). O experimento foi replicado dez vezes. A análise utilizando o método proposto nesse artigo aproveitará os resultados obtidos nos dois experimentos. Considera-se que as condições experimentais tenham se mantido aproximadamente as mesmas durante

Tabela 6 - Fatores controláveis e níveis codificados no segundo experimento

Fatores Controláveis	- 2	- 1	- 0,33	0	+1	+1,33	+ 2
X2: Percentual de Filito	40 %		45 %			50 %	
X4: Percentual de Talco				12 %	15 %		18 %
X5: Percentual de Arenito		8 %		11 %	14 %		

os dois experimentos. A tabela 8 apresenta uma visão geral dos níveis ensaiados para cada fator controlável. A matriz analisada será formada pelas 90 observações obtidas no primeiro experimento (18 tratamentos x 5 repetições) acrescidas das 90 observações obtidas no segundo experimento (9 tratamentos x 10 repetições), totalizando 180 observações. Dessa forma, pretende-se tirar o maior número de informações possíveis dos resultados do experimento realizado. Sabe-se que esse não é um experimento ideal pois os pontos ensaiados não estão dispersos de maneira uniforme dentro da região a ser pesquisada. Pode-se observar que certos fatores controláveis possuem maior número de pontos concentrados em uma determinada região. De qualquer forma, o uso dos resultados obtidos em ambos experimentos permite obter maior número de níveis para alguns fatores controláveis, o que possibilita a modelagem de termos de ordem superior, e maior número de graus de liberdade, o que possibilita a avaliação de interações não confundidas com os fatores principais.

Modelagem individual das características de qualidade

A modelagem individual das características de qualidade consiste em obter modelos de regressão que expressem cada uma dessas características em função dos fatores controláveis. Uma vez que os modelos sejam conhecidos, é possível identificar os ajustes dos fatores controláveis que otimizam, individualmente, cada característica de qualidade.

A modelagem das características de qualidade não foi feita no estudo usando-se o método de Taguchi^[1]. A análise do ajuste ótimo para cada característica de qualidade foi realizada da seguinte maneira: para cada tratamento calculou-se a razão sinal/ruído; usando-se a razão sinal/ruído como resposta, calculou-se a ANOVA para cada característica; verificou-se para cada nível dos fatores

controláveis os valores da razão sinal/ruído; os níveis ótimos escolhidos foram os níveis dos fatores controláveis que maximizavam a razão sinal/ruído. A estatística sinal/ruído foi usada considerando-se que a variabilidade era significativa. No entanto, não aplicou-se nenhum variabilidade. Houve falha na escolha apropriada das características de qualidade: o uso da estatística sinal/ruído só é apropriado nos casos significativo. Este processo foi repetido na o aumento da característica de qualidade^[11]. No cálculo da ANOVA não se aplicou nenhum teste para verificar a significância dos efeitos dos fatores controláveis sobre a característica de qualidade individual das características de qualidade, independentemente de seu efeito ser ou não análise das três características de qualidade.

Tabela 7 - Arranjo ortogonal L_9 do segundo experimento

Ensaio	X2	X4	X5
1	50	18	11
2	40	12	14
3	45	15	8
4	50	12	8
5	40	15	11
6	45	18	14
7	50	15	14
8	40	12	8
9	45	18	11

Nenhum esforço é feito no sentido de modelar as características de qualidade. Além da modelagem da média, pode-se modelar a variabilidade das características de qualidade em função dos parâmetros do processo. Com isso, pode-se ajustar o processo em níveis dos fatores controláveis que minimizem a variabilidade. Os modelos obtidos para a média e para a variabilidade das características de qualidade aparecem descritos a seguir.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/BR

Y1: Retração Linear

$$Y1 = 11,16 - 0,374 \times X2 - 0,956 \times X3 - 0,658 \times X5 - 0,359 \times X6 - 0,753 \times X7 - 0,290 \times X2^2 - 1,08 \times X3^2 - 0,505 \times X5^2 + 0,584 \times X6^2 - 1,25 \times X7^2 + 2,10 \times X1 \times X8 - 0,204 \times X2 \times X5 \hat{\sigma}_{Y1} = 0,838 - 0,115 \times X2 + 0,53 \times X7 + 0,11 \times X8 - 0,158 \times X2^2 + 0,504 \times X3^2 + 0,243 \times X5^2 - 0,273 \times X6^2 - 0,405 \times X8^2 - 0,452 \times X1 \times X8 + 0,212 \times X2 \times X5$$

Y2: Resistência Mecânica

$$Y2 = 513 - 46,5 \times X1 - 23,6 \times X3 - 34,4 \times X4 - 16,9 \times X6 - 24,1 \times X7 + 24,3 \times X8 - 9,62 \times X2^2 - 49,7 \times X5^2 - 51,2 \times X6^2 - 34,0 \times X7^2 + 109 \times X7 \times X8 + 41,0 \times X5 \times X7 \hat{\sigma}_{Y2} = 85,8 - 11,5 \times X3 + 17,0 \times X7 - 22,4 \times X6^2 - 25,4 \times X8$$

Y3: Absorção d'água

$$Y3 = 3,90 + 0,279 \times X1 + 0,931 \times X2 + 1,23 \times X3 + 1,09 \times X5 - 0,949 \times X6 + 0,799 \times X7 + 0,637 \times X2^2 + 0,731 \times X7^2 + 2,30 \times X3 \times X8 \hat{\sigma}_{Y3} = 0,419 + 0,211 \times X4 + 0,307 \times X5 + 0,212 \times X3 \times X8 + 0,213 \times X2 \times X5$$

Os modelos das médias e variabilidades das características de qualidade serão considerados no estudo de otimização utilizando-se o método proposto neste artigo. Apresenta-se na tabela 9 dados comparativos entre os ajustes ótimos encontrados utilizando-se o método Taguchi e o método proposto neste artigo. Como pode ser visto na tabela 9, comparado à solução obtida usando-se o método Taguchi, o ajuste alcançado com o método proposto neste artigo prevê valores para as características de qualidade muito mais próximos dos valores alvos.

Tabela 8. Níveis dos fatores controláveis conforme ensaiados Nos experimentos 1 e 2.

Fatores	- 2	- 1	- 0,33	0	0,33	1	1,33	2
X1: T Queima		1140				1160		
X2: % Filito	40	43	45	46		49	50	
X3: % Argila		22		25		28		
X4: % Talco		9		12		15		18
X5: % Arenito		8		11		14		
X6: Argila		A		A/B		B		
X7: Filito		A		A/B		B		
X8: Talco		A		A/B		B		

Definição da função objetivo

Na etapa anterior foram identificados os ajustes ótimos para os fatores controláveis considerando cada característica de qualidade separadamente. Para realizar a otimização global utiliza-se uma função objetivo "Z", descrita na equação 1:

$$\hat{Z}_{(i)} = \sum_{j=1}^J w_j \left[(\hat{Y}_j - T_j)^2 + \hat{\sigma}_{Y_j}^2 + \sum_{k=1}^K \hat{\sigma}_{X_k}^2 \left(\frac{\partial \hat{Y}_j}{\partial X_k} \right)^2 \right] \quad (1)$$

onde:

$Z(i)$ é a função objetivo a ser minimizada para cada ajuste dos fatores controláveis (tratamento i), pode-se obter um valor estimado de $Z(i)$;

w_j são pesos que levam em conta as unidades e a importância relativa de cada característica de qualidade;

T_j é o valor ideal para a característica de qualidade j;

\hat{Y}_j estimativa da média da característica de qualidade j;

$\hat{\sigma}_{Y_j}$ estimativa do desvio padrão da característica de qualidade j;

Para o exemplo em questão, os pesos w_j foram definidos levando-se em consideração a importância relativa (IR) de cada característica de qualidade e a semi-amplitude do intervalo de especificação (ΔE)

Para a resistência mecânica onde o intervalo de especificação é $250 - \infty$, usou-se 720 kgf/cm^2 como limite superior de especificação, uma vez que esse valor (720 kgf/cm^2) representa uma condição excepcional de resistência mecânica, ou seja, na prática confunde-se com uma resistência infinita (equação 2)

$$w_j = IR_j \times \frac{1}{\Delta E^2} \quad (2)$$

Com relação às oscilações dos parâmetros do processo, foi indicado que estas poderiam ser representadas por:

$$CV_{X1} = 0,227\% \quad \hat{\sigma}_{X1} = 0,00227 \times 1150 = 2,63$$

$$\text{ou } \hat{\sigma}_{X1} = \frac{2,63}{10} = 0,263 \quad (\text{n.c.})$$

$$CV_{X_2} = 1,66\% \quad \hat{\sigma}_{X_2} = 0,0166 \times 46 = 0,764$$

$$\text{ou } \hat{\sigma}_{X_2} = \frac{0,764}{3} = 0,255 \text{ (n.c.)}$$

$$CV_{X_3} = 1,00\% \quad \hat{\sigma}_{X_3} = 0,01 \times 25 = 0,25$$

$$\text{ou } \hat{\sigma}_{X_3} = \frac{0,25}{3} = 0,083 \text{ (n.c.)}$$

$$\hat{\sigma}_{X_4} = \frac{0,333}{3} = 0,111 \text{ (n.c.)}$$

$$\text{ou } CV_{X_5} = 0,0\% ; CV_{X_6} = 0,0\% ;$$

$$CV_{X_7} = 0,0\% ; CV_{X_8} = 0,0\% \quad (3)$$

Os modelos para a média e desvio - padrão de cada característica de qualidade já foram apresentados anteriormente. A partir dos modelos para a média das características de qualidade, calculou-se as derivadas parciais correspondentes. Todos esses pesos, modelos e derivadas foram substituídos na função objetivo.

Tabela 9. Ajuste ótimo dos fatores controláveis considerando individualmente cada característica de qualidade.

Y1: Retração Linear		Y2: Resist. Mecânica		Y3: Absorção d'Água	
Taguchi	Método	Taguchi	Método	Taguchi	Método
X1=-1	X1=+1	X1=+1	X1=-1	X1=+1	X1=-0,7
X2=+1,33	X2=1,33	X2=-2	X2=-0,05	X2=-0,33	X2=-0,7
X3=+1	X3=+1	X3=-1	X3=-1	X3=-1	X3=-1
X4=+1	X4=qquer	X4=+2	X4=-1	X4=+2	X4=qquer
X5=+1	X5=+1	X5=0	X5=0,45	X5=0	X5=-1
X6=-1	X6=0,45	X6=+1	X6=-0,85	X6=+1	X6=0,5
X7=-1	X7=+1	X7=0	X7=+1	X7=0	X7=-0,4
X8=-1	X8=-1	X8=+1	X8=+1	X8=-1	X8=0,2
Y1=9,47	Y1=2,65	Y2=343	Y2=676	Y3=4,02	Y3=0,012
Y1 alvo=0	Y1 alvo=0	Y2 alvo= ∞	Y2 alvo= ∞	Y3 alvo=0	Y3 alvo=0

No estudo de otimização usando-se o método Taguchi não foi utilizada uma função objetivo para a identificação do ajuste ótimo global. Assim, não foram estabelecidos os compromissos necessários para levar a termo a otimização global, conforme a importância relativa de cada característica de qualidade

sobre a qualidade do produto final. Tampouco se incluiu na análise os diferentes objetivos listados acima. Houve falha em definir uma função objetivo capaz de avaliar fatores quantitativamente o melhor ajuste dos controláveis.

Otimização

No estudo usando-se o método Taguchi, o ajuste ótimo global foi encontrado da seguinte forma: a partir do ajuste ótimo individual para as três características de qualidade analisadas, verificava-se a tendência geral. Por exemplo, se o nível (+1) do fator X1 otimizava uma característica de qualidade, e o nível (-1) otimizava duas características de qualidade, escolhia-se o nível (-1) como o nível ótimo global para X1. No entanto, existiam fatores que não apresentaram uma tendência, logo não foi possível concluir usando-se esse método, a respeito dos níveis ótimos globais desses fatores. Para os fatores que não apresentaram nenhuma tendência (X2, X4 e X5) foi necessário rodar um segundo experimento. A partir do segundo experimento, usou-se o mesmo critério para identificar-se os níveis ótimos desses

fatores. No entanto, o fator X2 continuou não apresentando uma tendência e optou-se por um nível utilizando-se critérios subjetivos. No estudo que utilizou o método Taguchi, não se modelou as características de qualidade individualmente, logo não há interpolação e o ajuste ótimo fica restrito aos níveis ensaiados. Além disso, só era

possível concluir a respeito do ajuste ótimo global se casualmente um nível do fator controlável otimiza mais de uma característica de qualidade. No entanto, o ajuste ótimo global geralmente se encontra em níveis intermediários, onde existe um compromisso entre as várias características de qualidade. O ajuste ótimo global não deve otimizar duas características de qualidade em detrimento de outra. O ajuste ótimo global deve satisfazer simultaneamente todas as características de qualidade da melhor maneira possível. A estratégia de otimização é ineficiente. No estudo de otimização usando-se o método proposto nesse artigo, o ajuste ótimo global é encontrado minimizando-se a função objetivo, ou função de perda, definida anteriormente. Usa-se rotinas de programação linear para identificar o ajuste que minimiza a função objetivo. O ajuste que minimiza a função objetivo é considerado o ajuste ótimo global, pois minimiza a perda incorrida ao consumidor ponderando as múltiplas características de qualidade e os múltiplos objetivos.

A tabela 10 apresenta o ajuste ótimo global, conforme encontrado no estudo que utilizava o conduzem aos valores de características de qualidade que aparecem na tabela 11. Como

máximos níveis de qualidade possíveis de serem obtidos com a tecnologia existente. Essa falha é consequência natural de todas as falhas anteriores.

Comparada à solução obtida no primeiro estudo, o ajuste encontrado segundo o método proposto nesse artigo prevê valores das características de qualidade mais próximos dos respectivos alvos de forma que a perda (devida à má qualidade) incorrida ao consumidor é muito inferior.

Uma vez encontrado o ajuste ótimo, realizou-se uma análise de sensibilidade para verificar o efeito dos fatores controláveis sobre a função de perda. A análise de sensibilidade foi realizada da seguinte forma: variou-se um fator controlável por vez e calculou-se a função de perda, enquanto os demais fatores eram mantidos fixos em seus níveis ótimos. Dessa forma, gerou-se oito gráficos distintos, onde a função de perda é mostrada para cada um dos oito fatores controláveis.

As figuras 1 a 8 apresentam a análise de sensibilidade da função de perda em relação aos fatores controláveis. Com a análise de sensibilidade pode-se verificar que os fatores X1, X3 e X8 possuem

Tabela 10 - Ajuste ótimo global dos fatores controláveis

ÓTIMO GLOBAL			
MÉTODO DE TAGUCHI		MÉTODO PROPOSTO	
níveis codificados	níveis reais	níveis codificados	níveis reais
X1=-1	X1=1140°C	X1=-1	X1=1140°C
X2=-2	X2=40%	X2=0,3	X2=46,9%
X3=-1	X3=22%	X3=-1	X3=22%
X4=+2	X4=18%	X4=-1	X4=9%
X5=0	X5=11%	X5=+1	X5=14%
X6=+1	X6=DL34	X6=+1	X6=DL34
X7=0	X7=Itapeva/LV	X7=+1	X7=LV
X8=-1	X8=ITA124	X8=+1	X8=G1

pode-se verificar, tendo como base os modelos ajustados para as características de qualidade. O ajuste encontrado segundo o método Taguchi prevê valores distantes do valor alvo, que não asseguram qualidade superior para o produto. Há falha em se obter os

um efeito forte sobre a função de perda. Os fatores X6 e X7 possuem um efeito moderado sobre a função de perda, enquanto que os fatores X2, X4 e X5 possuem um efeito fraco. A partir dos gráficos pode-se delimitar um envelope operacional. O envelope operacional

corresponde a um intervalo dos fatores controláveis que assegura valores relativamente baixos para a função de perda. No interior do envelope operacional que aparece definida na tabela 12, o valor da função de perda é inferior a 7. O estudo da função de perda através da análise de sensibilidade também revela que melhorias adicionais no processo poderiam ser obtidas trabalhando-se com temperaturas de queima e percentuais de argila menores que os limites ensaiados. Um próximo experimento poderia investigar essa condição (baixas Temperaturas de queima e Percentuais de Argila) e ainda, se possível, incluir outros tipos de talco, uma vez que a qualidade do produto final é fortemente dependente do tipo de talco utilizado.

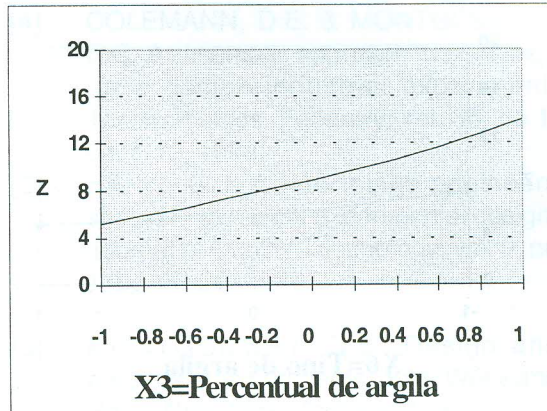


Fig. 3. Função de Perda x % de Argila

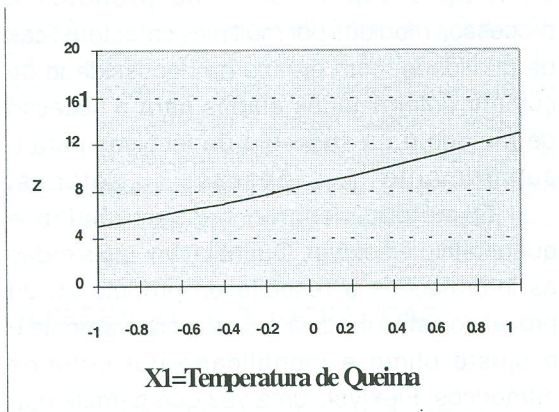


Fig. 1. Função de Perda x Queima

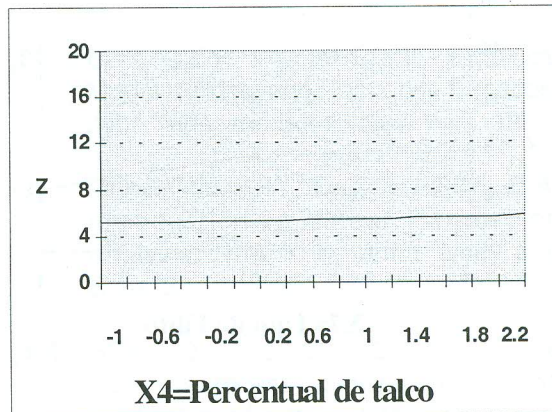


Fig. 4. Função de Perda x % de Talco

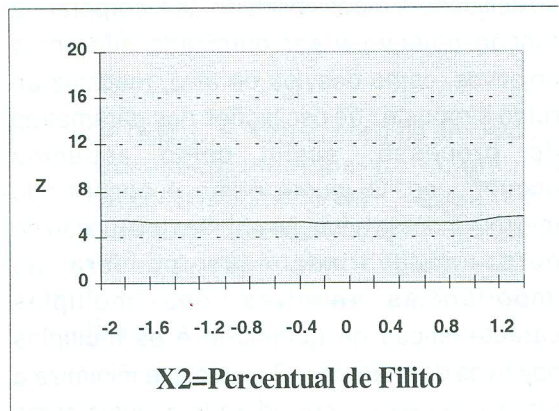


Fig. 2. Função de Perda x % Filito

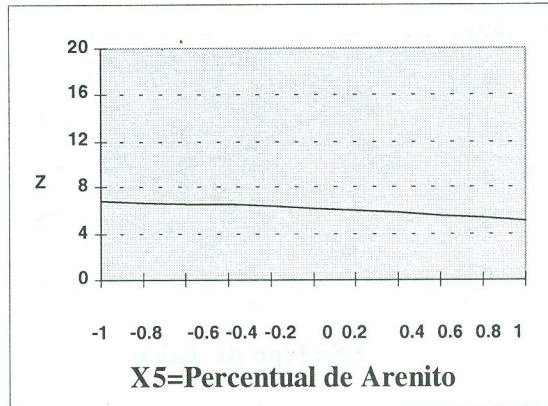


Fig. 5. Função de Perda x Tipo de Argila

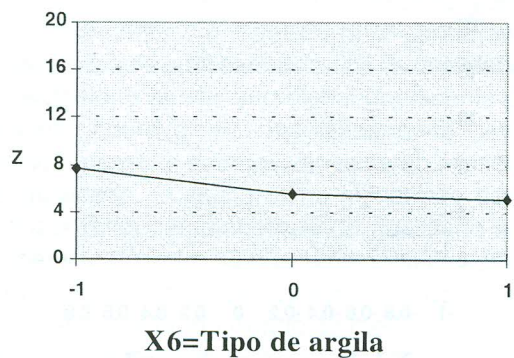


Fig. 6. Função de Perda x Tipo de Argila

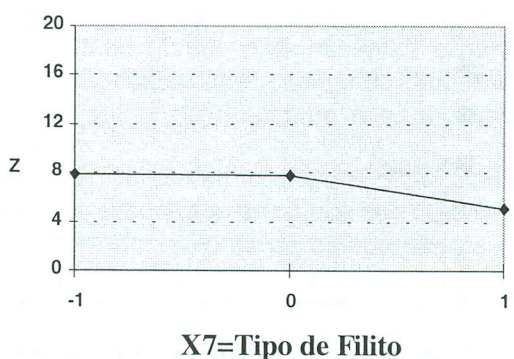


Fig. 7. Função de Perda x Tipo de Filito

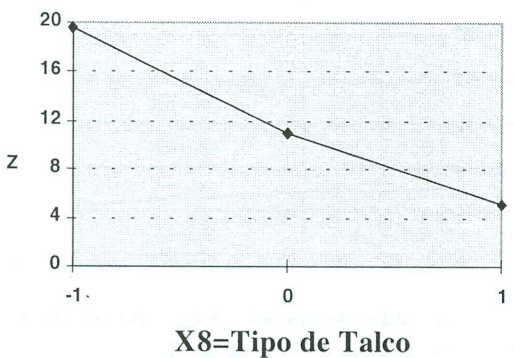


Fig. 8. Função de Perda x Tipo de Talco

Tabela 12. Envelope operacional para os fatores controláveis

Parâmetros do processo	Níveis codificados	Níveis reais
X1= Temperatura de queima	[-1,0 a -0,9]	[1139 a 1141]
X2= Percentual de filito	[-2,0 a +1,1]	[40,0 a 49,3]
X3= Percentual de argila	[-1,0 a -0,9]	[21,7 a 22,3]
X4= Percentual de talco	[-1,0 a +1,2]	[9,0 a 15,6]
X5= Percentual de arenito	[0,7 a +1,0]	[13,1 a 14,0]
X6= Tipo de argila	1	2
X7= Tipo de filito	1	2
X8= Tipo de talco	1	2

CONCLUSÕES

Este artigo descreveu um método para otimização experimental de produtos e processos medidos por múltiplas características de qualidade, com ênfase na necessidade de cumprir determinadas etapas para o sucesso do método e na sugestão de técnicas para o cumprimento dessas etapas.

O método descrito nesse trabalho é quantitativo e flexível. Quantitativo, pois todas as informações a respeito do produto ou do processo estão modeladas quantitativamente e o ajuste ótimo é identificado por critérios numéricos. Flexível, uma vez que permite que se trabalhe simultaneamente com várias características de qualidade de interesse do consumidor, com importâncias relativas diferenciadas. Outro fator que contribui para sua flexibilidade é a possibilidade de incorporar na função objetivo a ser otimizada diferentes objetivos, como desvios do alvo, robustez ao ruído e robustez às oscilações dos parâmetros do processo, assim como aspectos econômicos. O ajuste ótimo é encontrado minimizando-se a função objetivo, ou função de perda multivariada, que pondera as importâncias relativas das múltiplas características de qualidade e os múltiplos objetivos de interesse. O ajuste que minimiza a função de perda é considerado o ajuste ótimo global, pois minimiza a perda devida à má qualidade incorrida ao consumidor.

No estudo de caso aplicou-se, sempre que possível, as etapas do método proposto nesse artigo aos dados obtidos em um estudo de otimização usando-se método de Taguchi, descrito por Bernardin (1994) [1]. Usando-se o método Taguchi identificou-se um ajuste como sendo o ótimo, no entanto, esse ajuste não otimizou a formulação de massa cerâmica. Como pode-se verificar na seção anterior, o ajuste encontrado segundo o método Taguchi prevê valores distantes do valor alvo, que não asseguram qualidade superior para o produto. O ajuste ótimo encontrado pelo método proposto nesse artigo prevê valores das características de qualidade mais próximos dos respectivos alvos, de forma que a perda devida à má qualidade incorrida ao consumidor é muito inferior.

Com esse estudo envolvendo tantas características de qualidade e objetivos conflitantes, visualizou-se a eficiência do método proposto. Com isso, acredita-se que ele possa resolver com sucesso muitos problemas dos materiais cerâmicos, principalmente quando os parâmetros do processo forem do tipo contínuo e quando for difícil mantê-los em níveis pré-fixados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERNARDIN, A.M. Delineamento de experimentos utilizando as técnicas de Taguchi para formulação de massa cerâmica. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1994.
- [2] CATEN, C.S. Otimização de produtos e processos medidos por múltiplas características de qualidade. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1995.
- [3] BOX, G.E.P., HUNTER, W.G. & HUNTER, J.S. Statistics for experimenters. John Wiley, New York, 1978.
- [4] COLEMANN, D.E. & MONTGOMERY, D.C. A systematic approach to planning for a design industrial experiment. *Technometrics*, February, vol. 35, no 1, pp. 1-12, 1993.
- [5] HAHN, G.J. Some things engineers should know about experimental design. *Journal of Quality Technology*, vol. 9, no 1, pp. 13-20, 1977.
- [6] MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments. John Wiley and Sons, New York, 3rd ed., 1991.
- [7] NANNI, L.F. & RIBEIRO, J.L. Planejamento e avaliação de experimentos. *Caderno de Engenharia* 17/87, CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1991.
- [8] BOX, G.E.P. & DRAPER, N. Empirical Model Building and Response Surfaces. John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [9] MONTGOMERY, D.C. & PECK, E.A. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley and Sons, 2nd ed. 1991.
- [10] RIBEIRO, J.L. & ELSAYED, E.A. A case study on process optimization using the gradient loss function. *International J. of Production Research*, vol. 33, no. 12, pp. 3233-3248, 1995.
- [11] BOX, G.E.P. Signal-to-Noise ratios, performance criteria, and transformation. *Technometrics*, February, vol. 30, no 1, pp. 1-21, 1988.