

DESENHO DE EXPERIÊNCIAS - ESTRATÉGIAS

R. Domingues¹, F. A. Costa Oliveira², L. Esperto¹

¹Inv. Auxiliar, ²Inv. Principal
Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
Departamento de Materiais e Tecnologias de Produção

RESUMO

O desenvolvimento de produtos e processos pressupõe a realização de experiências que conduzam à sua optimização ao menor custo possível. As estratégias a utilizar na condução das experiências, bem como o tratamento estatístico dos resultados alcançados, deverão conduzir às melhores condições de realização dos ensaios necessários à prossecução deste objectivo. O método de Taguchi permite obter informação relevante, com um número reduzido de experiências, conforme se demonstra nos casos de estudo apresentados.

1. DESENHO DE EXPERIÊNCIAS

1.1. Introdução

O Desenho ou Planeamento de Experiências é uma técnica estatística utilizada na análise dos problemas de qualidade e da melhoria contínua do desempenho de qualquer processo produtivo [1].

A primeira abordagem sobre o assunto foi efectuada por R.A. Fisher nos meados do século passado, em Inglaterra, com enfoque na resolução de problemas relacionados com a agricultura [2].

Numerosos desenhos de experiências têm, desde então, sido desenvolvidos com aplicações na indústria química, farmacêutica, automóvel e outras e, mais recentemente com aplicações na área dos serviços.

O Desenho de Experiências, quando aplicado na fase de concepção, permite determinar quais os factores de controlo, as interacções e os factores de ruído que afectam determinadas características do produto assim como quais os melhores níveis desses factores de forma a tornar o processo “robusto” ao chamado “ruído” [3].

1.2. Desenho com um factor a vários níveis

Trata-se do desenho mais simples, onde se comparam os efeitos de vários níveis

de um factor numa ou mais característica(s) do produto.

A técnica estatística utilizada para a resolução de problemas deste tipo é a chamada “Análise de Variância” (ANOVA: Analysis of Variance), que utiliza a distribuição F.

Caso de Estudo I: Estudo de Suspensões de Esteatite para Atomização

A esteatite é um silicato de magnésio ($MgO \cdot SiO_2$) utilizado no fabrico de componentes para aplicações eléctricas.

Procurou-se avaliar o efeito da adição de diversos desfloculantes (cinco), utilizando diferentes concentrações (0,1; 0,2; 0,3), na viscosidade de suspensões, de forma a obter características reológicas adequadas ao processo de atomização, conducente ao fabrico de granulados que após prensagem e cozedura originam produtos à base de esteatite.

Tabela 1. Resultados experimentais de viscosidade obtidos.

Nível	y_1	y_2	y_3	Y	Total
0,1	172	172	170	171	514
0,2	154	153	152	153	459
0,3	141	141	139	140	421

Identificaram-se as condições às quais se obtém a menor viscosidade para cada suspensão preparada (neste caso, o efeito pretendido é quanto menor melhor). Para efeitos da aplicação da ANOVA, as observações foram recolhidas aleatoriamente

por replicação das experiências, repetidas três vezes nas mesmas condições (Tabela 1).

Conforme se constata da Tabela 1, a viscosidade diminui com o aumento do teor de desflocculante adicionado, independentemente do tipo utilizado.

Tabela 2. ANOVA aplicada aos dados de viscosidade.

	F	S	V	F	P
D ₁	2	1458	729	623,0769 *	99,50
erro	6	7	1,17		0,50
Total	8	1465			100

* >99,5 % confiança

O Factor F, definido como a razão de variâncias da amostra, conduz a valores de F (Tabela 2) que excedem os tabelados para um nível de confiança de 99,5 %, o que significa que efectivamente o teor de desflocculante adicionado influencia a viscosidade das suspensões preparadas.

1.3 Planeamento Factorial Completo

O Planeamento Factorial Completo avalia o efeito (denominado por resposta) de todas as combinações possíveis das variáveis independentes (factores de controlo) e respectivos níveis. Para um dado planeamento factorial completo, o número de experiências necessárias (N) para um dado número n de factores a L níveis é calculado pela expressão $N = L^n$.

Num desenho de experiências poderão, ainda, considerar-se as interações entre factores, situação que se verifica quando o efeito de um factor na resposta depende do nível a que o outro factor se encontre.

1.4 Métodos de Taguchi

A aplicação do planeamento factorial completo implica que, à medida que o número de factores e o número de níveis por factor aumentam, o número de experiências necessárias para se estudarem todas as combinações possíveis, aumenta consideravelmente (por exemplo, 4 factores a três níveis requerem 81 experiências), fazendo com que por vezes o tempo e os

custos associados à realização das experiências inviabilize a sua aplicação.

Frequentemente, o número de experiências envolvidas no desenvolvimento de novos produtos ou processos é inoportável, pelo que a aplicação do Planeamento Factorial Fraccionado, que corresponde a uma fracção do factorial completo, será de extrema utilidade, já que permite a obtenção da informação relevante sobre o efeito dos factores, efectuando o mínimo de experiências.

As chamadas Matrizes Ortogonais (“orthogonal arrays”) desenvolvidas por Taguchi para se planearem experiências, correspondem a matrizes fraccionadas, mas normalizadas de acordo com o número de factores e dos níveis por factor considerados.

A representação habitual das matrizes desenvolvidas por Taguchi é do tipo L_n onde n representa o número de experiências a efectuar, que corresponde a n-1 graus de liberdade.

A escolha da matriz de Taguchi mais adequada, caso a caso, faz-se a partir do número de factores principais a controlar e dos níveis por factor. Os factores não controláveis, também designados por factores de ruído, são incluídos numa segunda matriz (matriz exterior) utilizada em conjunto com a primeira (designada por matriz interior).

As matrizes disponíveis na literatura [4] cobrem a maioria dos casos mais comuns, desde que os factores controláveis apresentem os mesmos níveis, 2, 3 ou 4 e a interação entre os factores seja, de facto, desprezável. Quando tal não acontece, há que utilizar as chamadas matrizes modificadas de modo a contemplar as particularidades próprias do problema em análise.

A análise de variância (ANOVA) efectuada aos resultados das experiências permite identificar os factores que apresentam maior contribuição para reduzir a variação e simultaneamente ajustar a média da variável a controlar, e ainda identificar os melhores níveis dos factores de controlo que conduzem às melhores características de qualidade do produto.

A contribuição dos factores de controlo bem como o efeito dos factores podem ser calculados a partir do valor médio das experiências realizadas ou a partir do índice sinal-ruído (“Signal-to-Noise ratio”, S/N). O objectivo do planeamento de Taguchi, e da respectiva análise de dados, é maximizar S/N dado pela expressão:

$$S/N = -10 \log (\text{MSD})$$

sendo MSD o desvio quadrático médio e, como valor estatístico, mede a variação da característica em análise relativamente ao valor nominal.

Caso de Estudo II: Estudo da sinterização de pós metálicos pelo processo DMLS

Pretendia-se identificar as melhores condições de sinterização de uma mistura de pós metálicos por meio de DMLS – sinterização directa de pós metálicos por laser, que garantisse uma boa densificação do material em aço do tipo “DirectSteel” destinados ao fabrico rápido de eléctrodos por EDM – maquinaria por electroerosão de penetração [5].

Seleccionaram-se para cada um dos factores controláveis: A – Potência do Laser (%), B - “Hatching” (mm), C - Velocidade de varimento (mm/s) dois níveis (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros experimentais utilizados.

Nível	Factores		
	A	B	C
1	65	0.24	100
2	90	0.32	500

Para o planeamento de experiências foi escolhida uma matriz L₄, visto que o número de graus de liberdade de cada factor é igual a 1.

Para cada experiência, realizaram-se duas réplicas e determinaram-se as respectivas densidades do material sinterizado (Tabela 4).

Tabela 4. Dados experimentais de densidade obtida.

Exp. N.º	A	B	C	Densidade média
1	1	1	1	7,43
2	1	2	2	5,69
3	2	1	2	6,28
4	2	2	1	7,69

A análise de variância (Tabela 5) indica que a velocidade de varimento é o factor que mais contribui para uma maior

densificação das peças sinterizadas, devendo-se optar por utilizar 100 mm/s.

Tabela 5. ANOVA aplicada aos dados de densidade.

	f	S	V	F	P
Potência	1	0,1806	0,1806	35,2734*	6.7
“Hatching”	(1)	removido			
Velocidade	1	2,4806	2,4806	484,4971*	92.3
Erro	5	0,0256	0,0051		1
Total	7	2,687			100

*>99.9 %

A melhor combinação dos níveis dos factores controláveis é: A₂ B₁ C₁, sendo o efeito do “hatching” pouco significativo (Figura 1).

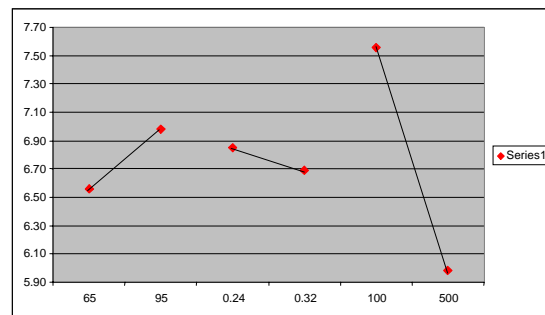


Figura 1. Variação da densidade com os níveis.

Caso de Estudo III: Aplicação dos métodos de Taguchi à optimização do processo de fabrico de cordierite densa

A cordierite é um alumino-silicato de magnésio (Mg₂Al₄Si₅O₁₈) utilizado em aplicações na área da microelectrónica e no controlo de emissões gasosas resultantes da combustão em motores a gasolina e a diesel na indústria automóvel.

Tabela 6. Factores e respectivos níveis e dados experimentais obtidos.

Exp.N.º	A	B	C	D	σ _r (MPa)
1	AS1	18	1	5	111±5
2	AS1	20	3	6	85±6
3	AS1	22	5	7	91±4
4	AS2	18	3	7	88±6
5	AS2	20	5	5	95±9
6	AS2	22	1	6	106±6
7	AS3	18	5	6	91±3
8	AS3	20	1	7	88±5
9	AS3	22	3	5	103±5

O objectivo era estudar o efeito de 4 factores: A- tipo de alumina, B- % ponderal de alumina, C- taxa de arrefecimento e D- tamanho médio de partícula, a 3 níveis, na resistência à flexão, no intuito de obter valores superiores a 100 MPa (neste caso, pretende-se quanto maior melhor). Para o efeito, utilizou-se uma matriz de Taguchi, L₉, com 9 experiências, em vez das 81

requeridas pelo desenho factorial completo [6].

Para cada experiência, foram efectuadas 30 réplicas (valores médios e respectivos desvio-padrão (Tabela 6).

Tabela 7. ANOVA construída a partir de S/N.

	f	S	V	S'	P	F
A	(2)	removido	-	-	-	-
B	2	1,733	0,867	1,689	30	38,935 *
C	2	1,426	0,713	1,381	25	32,026**
D	2	2,365	1,182	2,320	42	53,117 *
erro	2	0,045	0,022	-	3	
Total	8	5,568	-	-	100	

* >97.5%; **>95%

Aplicando a ANOVA aos valores de resistência à flexão medidos, constata-se que a fonte de alumina é o factor com a menor contribuição (P=0.8%) para maximizar a resistência σ_r ao passo que o tamanho médio de partícula (42.5%), o teor de alumina adicionado (31.1%) e a taxa de arrefecimento (25.6%) são os factores que mais influenciam a característica de qualidade medida (Tabela 7). O grau de confiança (α) é superior a 95%, de acordo com o factor de Fisher determinado.

Tabela 8. Efeito médio dos factores de controlo.

		Nível		
		1	2	3
Factor	A	39.54	39.61	39.44
	B	39.66	38.94	39.99
	C	40.09	39.21	39.28
	D	40.21	39.41	38.97

No sentido de identificar os melhores níveis, calcularam-se os valores de S/N para cada factor num dado nível (Tabela 8). A combinação óptima obtida pelo método de Taguchi foi A2, B3, C1, D1. A experiência de confirmação efectuada nestas condições permitiu obter valores de resistência à flexão de 104 ± 5 MPa (na gama dos valores estimados), que são superiores aos 67 ± 5 MPa alcançados para a cordierite comercial.

2. Conclusões

Neste trabalho demonstrou-se a vantagem da utilização do desenho de experiências a casos concretos de desenvolvimento de novos produtos. O sucesso da aplicação desta metodologia, passa por uma cuidada selecção dos factores

de controlo e respectivos níveis. Isto requer um adequado conhecimento dos processos e a realização de alterações deliberadas e sistemáticas nas principais variáveis de controlo (factores) de modo a observar a alteração que as mesmas irão provocar no resultado final (resposta). É essencial uma adequada selecção do desenho de experiências a utilizar caso a caso, bem como assegurar (1) a condução das experiências de acordo com as melhores práticas disponíveis e (2) a interpretação dos respectivos resultados avaliando os efeitos produzidos pelos factores em termos, quer da variação quer dos valores médios, recorrendo à ANOVA.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Rauschert Portuguesa Lda e ao projecto mobilizador FRF o apoio prestado à realização deste trabalho.

Bibliografia

- [1] Pereira, Zulema L., Planeamento e Controlo de Qualidade, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 1997/1998.
- [2] R.A.Fisher . 1951. Design of Experiments. Edinburgh: Oliver & Boyd.
- [3] Roy, Ranjit, A Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [4] Burton Gunter . 1987. "A Perspective on the Taguchi Methods." Quality Progress. Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality Control.
- [5] Materiais 2005 (2005, Aveiro, Portugal). COSTA OLIVEIRA, Fernando A., TAVARES, Sandra, DOMINGUES, Joaquim R., CRUZ FERNANDES, José, DIAS, Diamantino: Optimisation of cordierite processing through Taguchi method. Advanced Materials Forum III, Proceedings of the III International Materials Symposium, Aveiro, Portugal, March 20-23, 2005, Paula Maria Vilarinho (ed.), *Materials Science Forum*, Vols. 514-516, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2006, p. 1448-1451.