

OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE EXTRUSÃO DE FARELO DE SOJA PELO EMPREGO DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA\*

Rosa M.C.Barros\*\*  
Rui S.F.Silva\*\*\*  
Dionísio Borsato\*\*\*  
José A.C.Arêas\*\*

Investiga o efeito de variáveis como temperatura de processo e umidade do material na textura de farelo de soja extrusado, utilizando a metodologia de superfície de resposta (MSR).

INTRODUÇÃO

Das técnicas correntemente empregadas para texturização de proteínas, o processo de extrusão é o mais popular se comparado com o de fiação de fibras. Requer equipamento menor, tecnologia mais simples com resultados equivalentes ou melhores comparado com outros processos de texturização de proteínas (KINSELLA, - 1978).

Este processo foi inicialmente aplicado cerca de 50 anos atrás na produção contínua de massas e cereais matinais prontos para comer (ROSSEN & MILLER, 1973) e foi subsequentemente usado para texturizar proteínas vegetais (ATKINSONS, 1970). É atualmente uma tecnologia amplamente praticada e responsável pela fabricação de significativa fração de alimentos proteicos (HARPER, 1979).

Uma extrusora típica de alimentos consiste de um parafuso de Archimedes o qual gira dentro de um canhão estacionário, cuja temperatura pode ser controlada. O processo de extrusão baseia-se, primariamente, na gelatinização do amido de farinhas e sementes de oleaginosas quando submetidas ao tratamento térmico na unidade de extrusão. A mistura é transportada através de sistema de alimentação até o parafuso, onde esse é envolvido por uma camisa dupla na qual pode circular água ou vapor. O material é então conduzido sob pressão, passando através de orifícios especiais que dão o formato desejado. Sendo a pressão interna muito

\* Apoio financeiro: FINEP (Convênio FCF/FINEP: 5485002500)

\*\* Departamento de Alimentos e Nutrição Experimental da Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade de São Paulo

\*\*\* Departamento de Tecnologia de Alimentos e Medicamentos da Fundação Universidade Estadual de Londrina, Pr.

maior do que a atmosférica, quando o produto atinge o meio ambiente ocorre a expansão do mesmo pela evaporação da água superaquecida aprisionada na massa de material. A atual variedade de alimentos fabricados por extrusão é impressionante. Como exemplo de tais produtos pode-se citar amidos pré-cozidos e modificados, cereais matinais prontos para comer, "snacks", análogos de carne, proteína vegetal texturizada, etc... As modificações dos produtos dentro de cada uma dessas categorias amplia imensamente a quantidade de extrusados fabricados. Muitas dessas variações envolvem trocas relativamente simples, tais como aroma ou formato; outras já envolvem trocas fundamentais como combinações de novos ingredientes ou condições de processamento, chegando-se a uma gama enorme de materiais modificados.

Embora tenha-se texturizado principalmente proteínas de soja, outras fontes tais como semente de algodão, amendoim, trigo, milho, etc..., têm sido empregadas com algum sucesso. Recentemente, misturas de farelo de soja e proteínas extraídas de resíduos animais também têm sido extrusadas com êxito (MITTAL, 1981).

A transformação de produtos de origem vegetal em alimentos com textura semelhante à carne é considerada um dos maiores avanços no setor da alimentação, sendo a proteína vegetal texturizada - um desses novos tipos de alimentos designados como "análogos de carne", cujas características funcionais (aparência, textura, aroma, sabor), assemelham-se a esta.

A textura, densidade, mastigabilidade, rehidratabilidade e cor dos produtos extrusados podem ser influenciados não somente pela natureza dos ingredientes utilizados, mas também pelo conteúdo de umidade do material, perfil da temperatura nas várias zonas da extrusora, pressão gerada, razão de cisalhamento (velocidade do parafuso), tempo de residência do material na extrusora o tipo e configuração da extrusora, formato e tamanho do orifício de saída. Muitos destes fatores estão interrelacionados e o efeito preciso das diferentes variáveis na determinação da textura final dos produtos extrusados termoplasticamente dependerá também do modo de funcionamento individual de cada equipamento (LAWRIE et al, 1983).

O objetivo deste trabalho é o de investigar o efeito de variáveis como temperatura de processo e umidade do material na textura do produto. Em geral, a extrusão está relacionada com a umidade e velocidade do parafuso e quando se altera uma dessas variáveis, enquanto outras são mantidas constantes, nenhuma noção das interações ocorridas é obtida a não ser em um exame amplo de combinações.

Desse modo, o emprego da Metodologia de Superfície de resposta (MSR) permite a análise dessas interações quando se varia mais de uma variável simultaneamente.

Na extrusão termoplástica de alimentos, em particular para a extrusão de farelo de soja, essa metodologia tem sido aplicada com precisão para a obtenção de equações preditivas que relacionam variáveis respostas como: textura, inibição de fator antitriptico, valor biológico com variáveis independentes como: temperatura, velocidade do parafuso, umidade inicial da amostra, tamanho do orifício de saída, etc... (AGUILERA et al, 1976; FRA

ZIER et al., 1980, 1982).

Alguns estudos concluíram que, através do uso da MSR, as variáveis de extrusão podem ser controladas concomitantemente, revelando ótimas qualidades dos produtos extrusados (MAURICE & STANLEY, 1978).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Farelo de soja desengordurado fornecido pela SANBRA S/A foi utilizado (Prosam F). As amostras foram hidratadas com água destilada e homogeneizadas em bateadeira Planetária Arno, a um total de umidade entre 29,2 e 39,4% base sólida seca. Depois de umidificadas as amostras foram lacradas em sacos de polietileno e armazenadas em câmara fria (temperatura 10°C) para equilíbrio durante 3 dias aproximadamente. Antes da extrusão as amostras retornaram à temperatura ambiente.

### 2.2 Metodologia de superfície de resposta (MSR)

Temperatura, umidade do material, tipo de parafuso, diâmetro do orifício de saída e velocidade do parafuso são fatores que servem para justificar a maior parte da variação na texturização durante a extrusão (AGUILERA et al., 1976). Um método para avaliar a influência dessas diversas variáveis sobre as características do produto é a superfície de resposta (ROSENBROCK, 1960). Esta metodologia tem obtido bons resultados de otimização nos parâmetros de processo para a extrusão de soja (SMITH et al., 1982).

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas de grande utilidade na análise de problemas, onde várias variáveis independentes influenciam uma variável dependente, a resposta. Esta metodologia se inicia com a escolha de um modelo, normalmente uma polinomial de primeira ou segunda ordem, onde os coeficientes viriais são estimados pela técnica dos mínimos quadrados, a partir de dados experimentais (HILL & HUNTER, 1966).

Um estudo típico da MSR começa com a definição do problema (quais respostas a serem medidas, de que modo serão medidas, quais variáveis a serem estudadas, sobre que limites elas serão exploradas, etc...) e compreensão, em particular de: representação estatística dos experimentos delineados; estimativa dos coeficientes na equação de superfície de resposta; verificação da adequação da equação; e estudo da superfície de resposta na região de maior interesse.

Assim, estabelecendo-se o ponto central, a MSR se presta como excelente meio para determinar a otimização das variáveis de processo na extrusão, a fim de obter-se uma qualidade satisfatória quanto a textura do farelo de soja (melhor razão de expansão).

#### 2.2.1 Delineamento experimental

O planejamento dos experimentos é uma escolha crítica para o emprego da MSR. Desde a década de 50 BOX e colaboradores (HILL et al., 1966) estudaram diferentes tipos de delineamento e recomen-



daram alguns, com base no critério de redução do número de experimentos sem a perda importante na qualidade de informação.

Para se determinar os níveis ótimos de temperatura e umidade que influenciam na texturização do farelo de soja, utilizou-se um delineamento experimental denominado "Delineamento composto Central Rotacional" com precisão uniforme descrito por COCHRAN & COX.

O delineamento composto rotacional subdivide-se em 3 partes:

- os quatro pontos  $(-1, -1)$ ;  $(1, -1)$ ;  $(-1, 1)$  e  $(1, 1)$  constituem um fatorial  $2^2$ ;
- os quatro pontos axiais  $(-\sqrt{2}, 0)$ ;  $(\sqrt{2}, 0)$ ;  $(0, -\sqrt{2})$  e  $(0, \sqrt{2})$  são os pontos adicionais incluídos para formar um delineamento composto central;
- cinco pontos são acrescentados no centro, a fim de se dar uma precisão igualmente aproximativa para  $y$  (estimativa de resposta).

Com base neste delineamento foram feitas combinações apropriadas das duas variáveis independentes;  $X_1$  = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $X_2$  = umidade do material (% b.s.s.), com 5 diferentes níveis de variação (Tabelas I, II, III e IV). A função resposta neste trabalho foi a razão de expansão do farelo de soja como medida de sua textura, uma vez que essas duas grandezas estão relacionadas (FRAZIER et al., 1980).

TABELA I - Definição e níveis das variáveis independentes  
1º experimento: velocidade do parafuso 100 r.p.m

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	NÍVEIS				
	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$
$X_1$ = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	160	165	175	185	190
$X_2$ = umidade (% b.s.s.)	29,2	30,0	32,0	34,0	34,8

TABELA II - Delineamento estatístico do 1º experimento  
velocidade parafuso 100 r.p.m.

ENSAIO	Variáveis	Originais	Variáveis	Codificadas
	$X_1$	$X_2$	$X_1$	$X_2$
1	165	30,0	-1	-1
2	185	30,0	1	-1
3	165	34,0	-1	1
4	185	34,0	1	1
5	160	32,0	$-\sqrt{2}$	0
6	190	32,0	$\sqrt{2}$	0
7	175	29,2	0	$-\sqrt{2}$
8	175	34,8	0	$\sqrt{2}$
9	175	32,0	0	0
10	175	32,0	0	0
11	175	32,0	0	0
12	175	32,0	0	0
13	175	32,0	0	0

TABELA III - Definição e níveis de variáveis independentes  
2º experimento - velocidade parafuso 200 r.p.m.

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	NÍVEIS				
	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$
$X_1$ = temperatura (°C)	160,86	165	175	185	189,14
$X_2$ = umidade (% b.s.s.)	30,76	32,0	35,0	38,0	39,24

TABELA IV - Delineamento estatístico do 2º experimento  
velocidade parafuso 200 r.p.m.

ENSAIO	Variáveis $x_1$	Originais $x_2$	Variáveis $x_1$	Codificadas $x_2$
1	165	32,0	-1	-1
2	185	32,0	1	-1
3	165	38,0	-1	1
4	185	38,0	1	1
5	160,86	35,0	$-\sqrt{2}$	0
6	189,14	35,0	$\sqrt{2}$	0
7	175,0	30,76	0	$-\sqrt{2}$
8	175	39,24	0	$\sqrt{2}$
9	175	35,0	0	0
10	175	35,0	0	0
11	175	35,0	0	0
12	175	35,0	0	0
13	175	35,0	0	0

Para a análise dos resultados obtidos experimentalmente chegou-se a uma superfície de resposta quadrática, cujo modelo matemático é:

$$y = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + B_{11} x_1^2 + B_{22} x_2^2 + B_{12} x_1 x_2$$

onde: y é a variável dependente, a resposta (razão de expansão);  
 $B_0$ ;  $B_1$ ,  $B_2$ ;  $B_{11}$ ,  $B_{22}$ ,  $B_{12}$  são coeficientes de ordem zero, um e dois, respectivamente.

$$x_1 = \frac{x_1 - 175}{10} ; x_2 = \frac{x_2 - 32}{2} \quad (1^\circ \text{ experimento})$$

$$x_1 = \frac{x_1 - 175}{10} ; x_2 = \frac{x_2 - 35}{3} \quad (2^\circ \text{ experimento})$$

são as variáveis condificadas.

#### 2.2.2 Extrusão do farelo de soja

Quanto a extrusão das amostras os experimentos foram executados em uma extrusora de laboratório Miotto (projeto desenvolvido por

ra o Convênio FCF/FINEP 54.85.00.25.00), com diâmetro de 20 mm e relação comprimento/diâmetro de 20:1. A temperatura é mantida por um sistema de aquecimento termostatzado para 3 zonas da extrusora onde o seu equilíbrio é feito por refrigeração a ar comprimido e água. A razão de compressão do parafuso empregada foi de 3:1 (relação entre a pressão no final do parafuso e a zona de alimentação) e o diâmetro do orifício de saída de 3 mm.

Para o 1º experimento a velocidade de rotação foi mantida constante a 100 r.p.m. e no 2º experimento a 200 r.p.m. (máxima fornecida pelo aparelho). Para a estabilização da extrusora, entre uma e outra corrida das amostras, foram realizadas corridas com a soja com umidades de 32 ou 35%, dependendo do experimento a qual se referem, onde esses valores foram previamente observados como sendo o provável ótimo. Tal procedimento teve a finalidade de evitar o interrompimento do fluxo de material, impedindo desse modo a instabilidade do processo (FRAZIER et al., 1980).

#### 2.2.3 Medida da razão de expansão dos extrusados obtidos

As medidas dos diâmetros dos extrusados foram feitas em oito amostras de cada ensaio e cada amostra teve seu diâmetro medido em quatro partes diferentes, escolhidas ao acaso, utilizando-se um paquímetro. Tal procedimento foi adotado de acordo com o proposto por AGUILERA (1976). As medições foram efetuadas um dia após a extrusão e a razão de expansão foi calculada como diâmetro extrusados/diâmetro do canal de saída.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Empregando-se o delineamento composto central rotacional, após experimentos preliminares com valores variáveis de temperatura e umidade próximos ao descrito na literatura como ótimo para a extrusão de farelo de soja, chegou-se a valores ótimos para o equipamento e material empregado (SMITH et al., 1982 e FRAZIER et al., 1980).

Este modelo consistiu na variação das variáveis independentes -  $X_1$  e  $X_2$  (temperatura e umidade da amostra) em 5 níveis, incluindo o ponto central e 2 variações positivas e negativas de 1 e  $\sqrt{2}$  níveis de variação escolhidos. Os ensaios realizados foram 13, incluindo 5 repetições do ponto central, obtendo-se assim, uma boa precisão na otimização. Os valores ótimos conseguidos para o farelo de soja e equipamento foram de 32% de umidade do material e 175°C de temperatura na zona de compressão à velocidade fixa do parafuso de 100 r.p.m.; e de 35% de umidade para a velocidade de 200 r.p.m. à mesma temperatura (Tabelas V e VI).

Para ambos os experimentos um polinômio de 2º grau foi obtido e o ponto central correspondeu a um ponto de máximo da função escolhida.



Tabela V - Razão de expansão para os extrusados de soja 1º experimento (Vel. rotação parafuso 100 r.p.m.)

Variáveis Independentes		Diâmetro	Extrusados (mm)	Razão de exp.
190°C/32%	umidade	3,78	+ 0,029	1,26
175°C/32%	umidade	6,15	+ 0,057	2,05
165°C/34%	umidade	5,28	+ 0,059	1,76
175°C/34,8%	umidade	5,63	+ 0,080	1,88
175°C/32%	umidade	6,68	+ 0,058	2,23
175°C/29,9%	umidade	6,83	+ 0,072	2,28
165°C/30%	umidade	5,06	+ 0,076	1,69
175°C/32%	umidade	5,78	+ 0,043	1,93
185°C/30%	umidade	5,23	+ 0,051	1,74
175°C/32%	umidade	6,51	+ 0,052	2,17
160°C/32%	umidade	5,18	+ 0,061	1,73
185°C/34%	umidade	4,73	+ 0,060	1,58
175°C/32%	umidade	5,54	+ 0,074	1,85

Tabela VI - Razão de expansão para os extrusados de soja 2º experimento (Vel. rotação parafuso 200 r.p.m.)

Variáveis Independentes		Diâmetro	Extrusados (mm)	Razão de exp.
175°C/35%	umidade	5,75	+ 0,050	1,92
175°C/39,24%	umidade	5,25	+ 0,051	1,75
175°C/35%	umidade	5,82	+ 0,040	1,94
175°C/35%	umidade	5,77	+ 0,070	1,92
165°C/32%	umidade	5,46	+ 0,055	1,82
161°C/35%	umidade	5,44	+ 0,065	1,81
165°C/38%	umidade	5,37	+ 0,061	1,79
185°C/32%	umidade	6,00	+ 0,074	2,00
175°C/30,76%	umidade	6,00	+ 0,069	2,00
175°C/35%	umidade	6,44	+ 0,043	2,15
175°C/35%	umidade	6,14	+ 0,047	2,05
185°C/38%	umidade	5,06	+ 0,062	1,69
189°C/35%	umidade	5,34	+ 0,066	1,78



Utilizando-se as expressões apresentadas por Cochran e Cox para estimar os valores dos parâmetros das equações preditivas, foram obtidos:

1º experimento	2º experimento
B0 = - 2,04361	B0 = 1,99600
B1 = - 0,09824	B1 = 0,00470
B2 = - 0,08207	B2 = - 0,08672
B11 = - 0,26978	B11 = - 0,10300
B22 = - 0,01564	B22 = - 0,06305
B12 = - 0,05750	B12 = - 0,07000

Portanto, as superfícies de resposta quadrática ajustadas para os dois experimentos são:

$$Y_1 = 2,04361 - 0,09824x_1 - 0,08207x_2 - 0,26978x_1^2 - 0,01564x_2^2 - 0,05750x_1x_2$$

$$Y_2 = 1,9960 + 0,0047x_1 - 0,08672x_2 - 0,10300x_1^2 - 0,06305x_2^2 - 0,070x_1x_2$$

Na análise de regressão para a razão de expansão (Y), obteve-se:

	1º experimento	2º experimento
erro padrão	0,01672	0,0789
erro padrão percentual	9,0%	4,17%
desvio padrão das repetições	0,1590	0,1016
coefic.de variação das repetições	7,77%	5,09%
coefic.de determinação total ( $R^2$ )	0,7961	0,7970
coefic.de determinação linear	14,11%	28,10%
coefic.de determinação quadrática	65,50%	51,60%
coefic.de correlação múltipla (R)	0,8922	0,8928
variação explicada pelo modelo	79,61%	79,70%
var.explicada pelos efeitos lineares	14,11%	28,10%
var.expl.pelos efeitos quadráticos	65,50%	51,60%
var.expl.pelo erro experimental	10,54%	19,25%
var.não expl.pelo modelo e nem pelo erro experimental	9,86%	1,05%

A análise estatística mostrou que o modelo proposto mais o erro experimental respondem por mais de 90% da variação observada. Deve-se ressaltar, no entanto, que para a composição do modelo

(equação quadrática) os possíveis erros experimentais quanto a umidade original do material e a temperatura do processo não foram levados em conta e sim somente o erro existente na medição das respostas (diâmetro dos extrusados). Assim, a porcentagem de variação faltante, sem dúvida, pode ter sido ocasionada por estes erros experimentais.

#### 4 CONCLUSÃO

Avaliando a equação de regressão dos dois experimentos, observa-se que o modelo é fortemente quadrático, sendo a temperatura a variável independente mais significativa.

Diante dos resultados obtidos, os valores variáveis de temperatura e umidade aproximaram-se dos valores descritos na literatura por SMITH et al., 1982 e FRAZIER et al., 1980, como sendo o ótimo da extrusão (38% de umidade do material a temperatura de 150°C e 250 r.p.m. de rotação). A discrepância pode ser devida à limitação da extrusora empregada quanto a rotação do parafuso, onde a máxima velocidade atingida pelo equipamento é de 200 r.p.m.. Há uma notável relação entre umidade, velocidade e estabilidade do escoamento da massa viscosa e sua consequente qualidade após a extrusão (FRAZIER et al., 1980). Assim, apesar da baixa rotação empregada, obteve-se para as duas velocidades do parafuso produtos de textura razoável e com uma razão de expansão superior a 2 vezes o diâmetro do canal de saída utilizado nas condições ótimas.

Os resultados mostraram que o aumento da umidade do material está ligado diretamente ao aumento da rotação do parafuso para que ocorra uma boa texturização do mesmo.

#### Abstract

Study of the effect of temperature and humidity on the texture of extrusion cooked soy grits, utilizing the response surface methodology.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 KINSELLA, J.E. Texturized proteins: fabrication, flavoring and nutrition. R.Food Sci.Nutr., 10:147, 1987.
- 2 LAWRIE, R.A. & LEDWARD, D.A. Texturization of recovered proteins. Upgrading waste for feeds and food, 12:163, 1983.
- 3 MAURICE, T.J. & STANLEY, D.W. Texture-structure relationships in textured soy protein. IV influence of process variable on extrusion texturization. Can.Inst.Food Sci.Technol.J., 11:1, 1978.
- 4 MITTAL, P. Ph D dissertation, 1981. University of Nottingham.
- 5 ROSSEN, J.L. & MILLER, R.C. Food extrusion. Food Technol., 27(8):46, 1973.
- 6 SMITH, J.; MITCHELL, J.R.; LEDWARD, D.A. Effect of polysaccharide on soya extrusion. Prog.Food Nutr.Sci., 6: 139, 1982.