

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Silvana Mariana Srebernick e aprovada pela comissão julgadora em 24.07.89, Campinas, 24 de julho de 1989.


Presidente da Banca

EFEITO DA UMIDADE, TEMPERATURA, VELOCIDADE DO PARAFUSO E
DIÂMETRO DA MATRIZ NAS CARACTERÍSTICAS DO AMIDO DE SORGO
SUBMETIDO À EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA

Silvana Mariana Srebernick
Engenheira de Alimentos

22/89

Prof. Dr. Ahmed A. El-Dash
Orientador

Tese apresentada à FEA/UNICAMP para a obtenção do
título de MESTRE em Tecnologia de Alimentos

Campinas - 1989

Ao

Antenor com amor

À

*minha mãe e minhas tias
com carinho*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. *Ahmed A. El-Dash* pela orientação, incentivo e amizade.
- À FEA, através de sua *Direção e Coordenadoria de Pós-Graduação*, pelas condições oferecidas para o desenvolvimento da pesquisa.
- Ao *Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL*, por permitir o uso de suas instalações para o desenvolvimento de parte desta pesquisa.
- Ao Pesquisador Científico *Antenor Pizzinatto* pela orientação no ITAL e pelas sugestões e apoio no desenvolvimento da pesquisa e elaboração da tese.
- À *Pontifícia Universidade Católica de Campinas-PUCC* pela concessão do afastamento que possibilitou o término desta pesquisa.
- Ao *CNPq* e à *CAPES-PICD*, pelo auxílio financeiro.
- Aos professores, amigos e funcionários do *Departamento de Tecnologia de Alimentos*, pelo apoio, colaboração e amizade.
- À *ABIA* pelo auxílio na impressão da tese.
- A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE QUADROS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMO	IX
SUMMARY	XII
I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
A. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SORGO	2
B. FORMAS DE UTILIZAÇÃO	4
C. AMIDO DE SORGO	5
D. EXTRUSÃO	6
1. Equipamento	8
2. Processo de extrusão	9
3. Efeitos da extrusão no amido	12
a. Alterações na estrutura do grânulo	12
b. Alterações nas propriedades funcionais	14
III. MATERIAIS E MÉTODOS	18
A. MATERIAIS	18
1. Matéria-prima	18
2. Reagentes	18
B. MÉTODOS	18
1. Obtenção do amido	18
a. Descascamento do sorgo	18
b. Extração do amido	18
2. Caracterização do amido	22
a. Composição química	22
b. Viscosidade	22

	Página
3. Extrusão do amido	23
a. Condicionamento das amostras	23
b. Determinação da velocidade do alimentador	23
c. Equipamento	23
d. Processamento	27
4. Análise Estatística	28
a. Delineamento experimental	28
b. Análise dos resultados	29
5. Torque	31
6. Propriedades físico-químicas dos produtos extrusados	31
a. Expansão	31
b. Viscosidade	31
c. Índices de solubilidade em água (ISA) e de absorção de água (IAA)	32
d. Suscetibilidade enzimática	33
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
A. CARACTERIZAÇÃO DO AMIDO	35
B. TORQUE	38
C. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS AMIDOS EXTRUSADOS	41
1. Expansão	41
2. Viscosidade inicial	51
3. Viscosidade a quente	57
4. Viscosidade após 20 min. a 95°C	63
5. Viscosidade final	70
6. Índice de solubilidade em água	78
7. Índice de absorção de água	85
8. Suscetibilidade enzimática	92

	Página
V. CONCLUSÕES	98
VI. BIBLIOGRAFIA	100

ÍNDICE DE QUADROS

	Página
QUADRO 1. Níveis das variáveis independentes	24
QUADRO 2. Delineamento experimental central composto para 4 variáveis em 5 níveis (valores codificados)	25
QUADRO 3. Delineamento central composto para 4 variáveis em 5 níveis (valores reais)	26
QUADRO 4. Resultados relativos à obtenção de amido	36
QUADRO 5. Composição química do amido	36
QUADRO 6. Influência das variáveis do processo de extrusão no torque	39
QUADRO 7. Análise de variância para Y_1 = torque	40
QUADRO 8. Influência das variáveis do processo de extrusão na expansão	44
QUADRO 9. Análise de variância para Y_2 = expansão	46
QUADRO 10. Análise de variância para Y'_2 = expansão. Modelo reajustado	47
QUADRO 11. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade inicial	52
QUADRO 12. Análise de variância para Y_3 = viscosidade inicial	53
QUADRO 13. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade a 95°C	58
QUADRO 14. Análise de variância para Y_4 = viscosidade a quente	60

QUADRO 15. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade após 20 minutos a 95°C	64
QUADRO 16. Análise de variância para Y_5 = viscosidade após 20 minutos a 95°C	65
QUADRO 17. Análise de variância para Y'_5 = viscosidade após 20 minutos a 95°C. Modelo reajustado	67
QUADRO 18. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade final	71
QUADRO 19. Análise de variância para Y_6 = viscosidade final	73
QUADRO 20. Análise de variância para Y'_6 = viscosidade final. Modelo reajustado	74
QUADRO 21. Influência das variáveis do processo de extrusão no índice de solubilidade em água	79
QUADRO 22. Análise de variância para Y_7 = índice de solubilidade em água	80
QUADRO 23. Análise de variância para Y'_7 = índice de solubilidade em água. Modelo reajustado	82
QUADRO 24. Influência das variáveis do processo de extrusão no índice de absorção de água	86
QUADRO 25. Análise de variância para Y_8 = índice de absorção de água. 87	
QUADRO 26. Análise de variância para Y'_8 = índice de absorção de água. Modelo linear reajustado	89

QUADRO 27. Influência das variáveis do processo de extrusão na suscetibilidade enzimática	93
QUADRO 28. Análise de variância para Y_9 = suscetibilidade enzimática.	94

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1. Desenho esquemático de um extrusor de rosca única	10
FIGURA 2. Fluxograma do processo de obtenção do amido de sorgo	19
FIGURA 3. Curvas viscoamilográficas para diferentes concentrações de amido de sorgo	37
FIGURA 4. Efeito da umidade e temperatura no torque	42
FIGURA 5. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura no torque	43
FIGURA 6. Efeito da umidade, temperatura e diâmetro da matriz na expansão do amido extrusado	48
FIGURA 7. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura na expansão do amido extrusado	50
FIGURA 8. Efeito da umidade e temperatura na viscosidade inicial do amido extrusado	55
FIGURA 9. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura na viscosidade inicial do amido extrusado	56
FIGURA 10. Efeito da umidade e temperatura na viscosidade a quente do amido extrusado	61
FIGURA 11. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura na viscosidade a quente do amido extrusado	62

FIGURA 12. Efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade após 20 minutos a 95°C do amido extrusado	68
FIGURA 13. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade após 20 minutos a 95°C do amido extrusado	69
FIGURA 14. Efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade final do amido extrusado	75
FIGURA 15. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade final do amido extrusado	76
FIGURA 16. Efeito da umidade, temperatura e diâmetro da matriz no ISA do amido extrusado	83
FIGURA 17. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura no ISA do amido extrusado	84
FIGURA 18. Efeito da temperatura e diâmetro da matriz no IAA do amido extrusado	90
FIGURA 19. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e diâmetro da matriz no IAA do amido extrusado	91
FIGURA 20. Efeito da temperatura e diâmetro da matriz na suscetibilidade enzimática do amido extrusado	95
FIGURA 21. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e diâmetro da matriz na suscetibilidade enzimática do amido extrusado	96

RESUMO

O sorgo é uma gramínea originária da África (Etiópia e Sudão) e Ásia, onde é cultivada em áreas de baixa disponibilidade de água, sendo um cereal com capacidade de desenvolver em solos considerados inadequados a certos outros cereais. Seu potencial agrícola associado a um alto potencial tecnológico torna-o um importante cereal para a alimentação, tanto humana quanto animal. Uma das formas de se estudar o sorgo no sentido de se desenvolver novos produtos é através da extrusão termoplástica do seu amido, desde que existem poucos trabalhos a esse respeito na literatura.

Assim, o presente trabalho se propôs a avaliar as características do amido de sorgo "in natura" e estudar os efeitos das variáveis da extrusão termoplástica sobre as propriedades do mesmo.

Para estudar os efeitos das variáveis umidade, temperatura, velocidade do parafuso e diâmetro da matriz nas características do amido de sorgo, submetido à extrusão termoplástica, utilizou-se a metodologia de superfície de resposta, pela qual foram obtidos modelos matemáticos preditivos, relacionando as variáveis do processo de extrusão com as mudanças ocorridas nestas propriedades.

As características avaliadas foram expansão, viscosidade (inicial, a quente (95°C), após 20 minutos a 95°C e final (50°C)), índice de solubilidade em água (ISA), índice de absorção de água (IAA) e suscetibilidade enzimática. Avaliaram-se, também, os efeitos das variáveis da extrusão sobre o torque, pelo qual é possível estimar a eficiência do processo em termos de consumo de energia.

A análise dos resultados mostrou que a variável temperatura foi a que mais influenciou afetando significativamente todas as propriedades estudadas. Por outro lado, a variável velocidade do parafuso foi a menos significativa afetando somente a viscosidade após 20 minutos a 95°C (resistência ao atrito mecânico) e a viscosidade final (retrogradação do amido).

Com relação aos efeitos das variáveis da extrusão nas características do amido, verificou-se que a expansão foi dependente das variáveis umidade, temperatura e diâmetro da matriz, sendo que, para uma determinada temperatura, ela diminuiu com o aumento da umidade, efeito que se tornou menos intenso com o aumento do diâmetro da matriz. Quanto às viscosidades, nenhuma delas foi dependente do diâmetro da matriz. Entretanto, a viscosidade inicial foi dependente das variáveis umidade e temperatura, aumentando com o aumento da temperatura para umidades superiores a 20%, ocorrendo o inverso para umidades inferiores a 18%, enquanto que a viscosidade a quente foi dependente apenas da variável temperatura, diminuindo com o seu aumento. Também, a viscosidade após 20 minutos a 95°C e a viscosidade final foram dependentes das variáveis temperatura e velocidade do parafuso, ambas diminuindo com o aumento da temperatura, fato que se tornou mais acentuado com altas velocidades do parafuso e altas temperaturas.

O ISA foi dependente das variáveis umidade, temperatura e diâmetro da matriz, sendo seus valores máximos obtidos com baixos teores de umidade e altas temperaturas, enquanto que o IAA foi dependente das variáveis temperatura e diâmetro da matriz, aumentando com o aumento dessas variáveis.

A suscetibilidade enzimática foi dependente das variáveis temperatura e diâmetro da matriz, aumentando com o aumen-

to dessas variáveis, até um certo limite (190°C e 5,4mm), diminuindo a seguir.

O torque foi dependente apenas da variável umidade, diminuindo com o aumento desta.

Assim, a extrusão mostrou ser um meio adequado para se obter amido pré-gelatinizado e, em função das variáveis empregadas no processo, foi possível obter amido pré-gelatinizado com diferentes características.

SUMMARY

Sorghum is a grain that originated in Africa (Ethiopia and Sudan) and Asia, where it can be cultivated in dry areas, developing under conditions which are unfavorable for other cereals. Its agricultural potential is associated with a high technological potential, making it an important cereal for human and animal consumption. One way to study it is through the development of new products using thermoplastic extrusion of its starch, especially since there are practically no articles discussing this subject.

Thus, the present thesis intends to evaluate the characteristics of native sorghum starch and study the effect of thermoplastic extrusion variables on these properties.

The effect of the extrusion variables of moisture content, temperature, screw speed, and die diameter on sorghum starch have been analysed using surface response analysis, a method which has yielded mathematically predictable models relating extrusion process variables to differences in starch properties.

The starch characteristics studies were expansion, viscosity (initial, hot (95°C), after 20 min. at 95°C, and final (50°C)), water solubility index (WSI), water absorption index (WAI), and susceptibility to enzymatic action. The effects of the extension variables on torque was also examined; this makes it possible to estimate the efficiency of the process in terms of energy consumption.

An analysis of the results showed that the factor of temperature was the most critical, affecting all of the properties studied. On the other hand, the screw speed was the least important, affecting only viscosity after 20 min. at 95°C (re-

sistance to mechanical shear) and final viscosity (starch retrogradation).

When relating extrusion variables to starch characteristics, it was found that expansion was dependent on moisture content, temperature and die diameter; at any given temperature it decreased as the moisture content increased, although increasing the die diameter reduced this effect. None of the viscosities depended on the die diameter, although the initial viscosity was dependent on moisture content and temperature, increasing with an increase of temperature when the former exceeded 20%, but decreasing with such increases when the moisture content was below 18%. Hot viscosity, on the other hand, depended only on temperature, decreasing with its increase. The viscosity after 20 min. at 95°C and final viscosity depended on both temperature and screw speed, both decreasing with an increase in temperature, an effect which becomes more pronounced with faster screw speeds and higher temperatures.

WSI was dependent on the variables of moisture content, temperature, and die diameter, with maximum values obtained for low moisture contents and high temperatures, while the WAI increased as the temperature and die diameter increased.

Enzymatic susceptibility depended on the temperature and die diameter, increasing with their increase to a maximum, then decreasing.

Torque depended only on the moisture content, decreasing as this variable increased.

Thus, extrusion proved to be an adequate means of obtaining pre-gelatinized starch; moreover, it was possible to obtain pre-gelatinized starch with various characteristics.

INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma gramínea originária da África (Etiópia e Sudão) e Ásia, onde, até hoje, é cultivada em áreas de baixa disponibilidade de água. É, também, um cereal com capacidade de se desenvolver em solos considerados inadequados a alguns outros cereais. Seu potencial agrícola associado a um alto potencial tecnológico torna-o um importante cereal para a alimentação, tanto humana como animal.

As vantagens oferecidas pelas características agrônômicas do sorgo no Brasil devem ser utilizadas no sentido de se descobrir novas formas de emprego do mesmo, tanto para alimentação como para fins industriais.

Uma das formas de se estudar o sorgo no sentido de se desenvolver novos produtos é através da extrusão termoplástica. Muito pouco trabalho tem sido publicado com respeito à extrusão de sorgo (4, 10). Por outro lado, os trabalhos existentes foram feitos há vários anos quando o processo de extrusão estava se iniciando, portanto, limitado ao controle de um menor número de variáveis do processo. Trabalhos de pesquisa sobre extrusão de amido de sorgo não têm sido reportados na literatura. Assim, o presente trabalho se propõe a avaliar as características do amido de sorgo e estudar o efeito das variáveis da extrusão termoplástica sobre as propriedades do mesmo.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. Características gerais do sorgo

O cultivo do sorgo em escala comercial é recente no Brasil, tendo se iniciado em 1968. Em 1971 a produção de sorgo no Brasil esteve limitada a 2.000 t. Esta aumentou rapidamente atingindo 450.000 t em 1975. Nos últimos dez anos, a produção oscilou muito, mas esteve geralmente abaixo da produção registrada em 1975. Assim, nos anos de 1980, 1984 e 1986, a produção de sorgo no Brasil foi da ordem de 180.000 t, 381.000 t e 369.000 t, respectivamente (5). O rendimento médio brasileiro de sorgo em grão nos últimos cinco anos foi de 2.076kg/ha, sobressaindo os Estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo, com produtividades médias de 3.103kg/ha, 2.224kg/ha e 2.700kg/ha, respectivamente (5). Portanto, é no Sul do País que a cultura apresenta maior desenvolvimento. O Rio Grande do Sul, em primeiro lugar e São Paulo logo a seguir, são os dois maiores produtores nacionais, acumulando quase 60% da produção total do Brasil (11). No Nordeste do Brasil a cultura do sorgo não é bem aceita e isto se deve não somente aos hábitos alimentares dessa região, como também ao incentivo ao cultivo e uso do milho (16, 29). Entretanto, é nas regiões de cerrado e no Nordeste que o resultado econômico com a cultura de sorgo é mais impressionante. Assim, em 1973, quando o sertão nordestino produziu, em média, 648kg/ha de milho, a produtividade do sorgo foi de 2,18 vezes maior, atingindo a cifra de 1.419kg/ha. A comparação entre a produtividade do sorgo e a do milho mostra uma indiscutível vantagem para o primeiro (11).

São cultivados três tipos de sorgo no Brasil: o granífero para produção de grãos; o forrageiro para suplementação na ração animal e o sacarino, para produção de xarope ou álcool (16).

Os dados de produção disponíveis dizem respeito principalmente ao sorgo granífero, que é o mais cultivado. Poucas informações se tem a respeito dos sorgos forrageiro e sacarino. Acredita-se que o sorgo sacarino não seja cultivado em escala comercial (28).

Entretanto, o cultivo do sorgo na entressafra da cana-de-açúcar mostra o excelente desempenho que este pode ter como fornecedor de matéria-prima para destilarias, justamente nas épocas de escassez de cana. Além disso, o sorgo sacarino reúne a qualidade de fornecedor de açúcar, grãos e de uma torta, que pode ser empregada na alimentação animal, tudo isso aliado à vantagem de se manter o solo cultivado e coberto durante a estiagem. Por ocasião da colheita do sorgo sacarino, separam-se os grãos do colmo. Os grãos são vendidos ou usados em rações animais, enquanto que o colmo é moído e fornece em caldo que, processado de forma semelhante ao da cana, fornece de 40 e 45% de álcool por tonelada. A massa esmagada conserva de 1 a 2% de açúcares, que também podem enriquecer rações. É fácil concluir que a introdução do cultivo de sorgo sacarino nas regiões canavieiras reduziria a ociosidade das destilarias, ao mesmo tempo em que ajudaria a melhorar a alimentação animal nessas regiões (11).

O sorgo é, portanto, uma cultura muito promissora por suas características e facilidades de cultivo, própria para o clima tropical, como é o do Brasil.

Assim, o grande trunfo do sorgo, num país como o Brasil, é a sua resistência aos longos períodos de seca, além de sua fácil adaptação a solos de baixa fertilidade. Entretanto, apesar de todas essas vantagens, existe um certo preconceito do agricultor brasileiro em relação ao sorgo, sendo a sua cultura ainda muito restrita e sem um sistema de comercialização definido (11). Isto se deve à falta de pesquisa no sentido de expandir o uso de sorgo na alimentação humana e em aplicações industriais. Observações semelhantes têm sido reportadas por cientistas de outros países (46, 47, 55).

B. Formas de utilização

No Brasil, as maiores utilizações para o sorgo estão no preparo de silagem para o gado e na indústria de ração, onde é consumido como grão (52).

Existem países onde o sorgo é utilizado na alimentação humana, enquanto que em outros é usado apenas para ração animal ou para fins industriais (46, 54, 56).

Na alimentação humana o sorgo é utilizado principalmente na forma de farinha no preparo de pães, bolos e mingaus (46). Também é utilizado como cereal para o desjejum em certos países da África e da Ásia, onde tem o seu maior consumo na alimentação humana.

A farinha de sorgo pode, ainda, ser utilizada em adição de até 20% à farinha de trigo, na elaboração de outros tipos de alimentos na área de panificação (11). Em alguns países africanos, o sorgo também é usado na produção de cerveja do tipo "kaffir", onde é empregado na forma de malte (54, 56). Como substrato (fonte de carboidrato) para a fermentação na produção de cerveja, o sorgo não tem tido grande aceitação por afetar o sabor da mesma.

C. Amido de sorgo

O amido de sorgo é normalmente obtido por via úmida, macerando-se os grãos inteiros em solução de bissulfito de sódio a 0,1%, por períodos que variam de 16 a 48 horas, em média (42). Os grãos macerados são, posteriormente, moídos e o material obtido é levado para um sistema de peneiras, onde, através de lavagens sucessivas, eliminam-se fibras e impurezas, obtendo-se a suspensão de amido. Esta é, posteriormente, centrifugada e seca, obtendo-se o amido.

A maceração com solução de bissulfito de sódio tem por finalidade romper a rede protéica, facilitando a liberação dos grânulos de amido e evitar a ação microbiana durante a maceração, além de facilitar o processo de moagem do grão de sorgo.

O amido, maior componente da farinha de sorgo, perfaz cerca de 83% do endosperma, e este, por sua vez, representa aproximadamente 82% do grão inteiro (55).

Os grânulos do amido de sorgo são semelhantes aos grânulos do amido em tamanho e forma. O tamanho médio dos primeiros é da ordem de 15 microns, enquanto que os últimos medem em média, 10 microns (55). Estas diferenças não apresentam qualquer importância prática, sendo muito difícil observar alguma diferença microscópica entre eles (56).

Uma das propriedades mais importantes do grânulo do amido é a sua faixa de temperatura de gelatinização. No amido de sorgo esta se situa entre 68^o e 76^oC e no amido de milho

entre 62° e 68°C. Assim, o amido de sorgo requer maior energia térmica ou maior tempo de cozimento para o processamento (46). Desde que valores altos não são desejáveis para certos propósitos, têm sido selecionados sorgos com temperatura de gelatinização mais baixa (55).

O amido de sorgo ceroso possui praticamente 100% de amilopectina em contraste com o amido de sorgo normal, que contém aproximadamente 73% de amilopectina e 27% de amilose. Os grânulos de amido de sorgo ceroso, quando gelatinizados, incham e perdem sua forma mais facilmente que os amidos normais, e quando resfriados não formam gel como fazem os outros amidos (55). Assim, as propriedades de pasta dependem da proporção de amilose: amilopectina, do tamanho molecular dessas frações e de suas associações a ácidos graxos (56).

O amido de sorgo é empregado desde as indústrias de construção até as de fundição, refinação de minerais, carvão, papéis e em prospecção de petróleo (46, 56).

O amido modificado de sorgo é muito empregado nas indústrias têxteis, de papel, de adesivo e também na indústria farmacêutica, onde é usado como extensor do plasma sanguíneo (56).

A mistura de amido de sorgo dos tipos normal e ceroso quando empregada na indústria de papelão, apresenta propriedades superiores às dos derivados de amido de milho, proporcionando melhor impressão, maior rigidez e menor curvamento das placas, além de um menor custo (56).

D. Extrusão

A palavra extrusão é originária do latim e significa expulsar ou empurrar para fora (49). O processo de extrusão foi

primeiramente desenvolvido para a indústria de plásticos e tornou-se importante na indústria de alimentos em 1935, quando foi utilizado na produção contínua de pastas alimentícias (22). Houve, desde aquela época até os anos 60, um interesse crescente das indústrias pelo processo de extrusão. Entretanto, a partir dos anos 60, com a introdução do extrusor termoplástico, o qual apresentava uma série de vantagens, a indústria de alimentos tomou uma nova dimensão. Hoje, o extrusor termoplástico representa um equipamento de importância vital em muitas indústrias, sendo inúmeros os produtos obtidos e comercializados, principalmente na área de alimentos.

A extrusão termoplástica de alimentos é um processo do tipo "HTST", que se caracteriza pelo emprego de altas temperaturas em curtos espaços de tempo e é definida por EL-DASH (14) como um processo contínuo em que a fricção mecânica é combinada com aquecimento térmico para misturar continuamente, plastificar e gelatinizar o amido, desnaturar materiais protéicos reestruturando-os para a obtenção de produtos com novas texturas e formas.

As aplicações da extrusão termoplástica são numerosas e englobam uma faixa bastante ampla de produtos, tais como: proteínas vegetais texturizadas, análogos de carne, sopas instantâneas, "snacks", alimentos infantis, etc. É também empregada na gelatinização de amido de cereais para fins industriais ou alimentícios (48), na inativação de fatores antinutricionais e de enzimas em farinhas de soja, auxiliando a manter a estabilidade e o sabor no armazenamento (37, 38) e na pasteurização e esterilização de produtos alimentícios, reduzindo a população de microrganismos e evitando a contaminação por bactérias patogênicas (17).

O pré-cozimento na extrusão termoplástica leva a um aumento da digestibilidade do produto alimentício devido à gelatinização do amido e à desnaturação de proteínas, além de minimizar as reações de escurecimento, evitando-se a perda de lisina disponível (24).

A extrusão é mais uma possibilidade de complementar farinhas de cereais com farinhas protéicas, vitaminas e minerais, a fim de melhorar o balanço de aminoácidos e o valor nutricional (1).

O processo de extrusão exibe uma série de vantagens, como: grande versatilidade (14), produção contínua em larga escala, baixo custo de mão-de-obra, alta capacidade de produção por unidade de área, ausência de efluentes, curta permanência do material dentro do extrusor e como principal vantagem a dos ingredientes sofrerem um conjunto de operações unitárias (mistura, cisalhamento, cozimento, secagem e texturização) em um único, eficiente e rápido processo (51).

Muitos fatores contribuem para a versatibilidade do processo incluindo desenho do equipamento, variáveis operacionais e tipos de ingredientes, obtendo-se produtos com diferentes texturas, tamanhos, formatos, cores e sabores (49).

Assim, a variedade de alimentos produzidos hoje pelo extrusor excede, em muitas vezes, o que se previu inicialmente (50).

1. Equipamento

O extrusor é constituído basicamente das seguintes

partes: alimentador, parafuso, cilindro encamisado e matriz (Figura 1).

O alimentador deve ser equipado com agitador ou rosca, a fim de manter um fluxo contínuo de alimentação e permitir um bom funcionamento no extrusor, evitando flutuações no cozimento e nas características do produto extrusado.

O parafuso é a parte central e principal do equipamento e sua geometria influencia grandemente o processo. Está dividido em três zonas: de alimentação, de transição e de alta pressão.

O cilindro nos extrusores de cozimento é ranhurado na sua parte interna, evitando o deslizamento da massa, aumentando assim, a taxa de cisalhamento. Para propiciar uma maior flexibilidade e controle do processo, o cilindro é normalmente camisado, permitindo a circulação de vapor ou água fria.

A matriz do extrusor pode ter várias configurações, o que influencia a forma e a textura do produto extrusado (23). Assim, se, por exemplo, a matriz apresenta alta taxa de cisalhamento, a mesma terá um efeito potencialmente maior na textura do produto. Altas taxas de cisalhamento na matriz levam à redução do tamanho das partículas, dando origem a produtos com poros menores tornando-os mais macios, mais solúveis e menos resistentes à ação mecânica.

2. Processo de extrusão

O material a ser extrusado é primeiro alimentado em um pré-condicionador onde é tratado com água e/ou vapor para elevar a umidade até o teor desejado, em média de 15 a 35% (22).

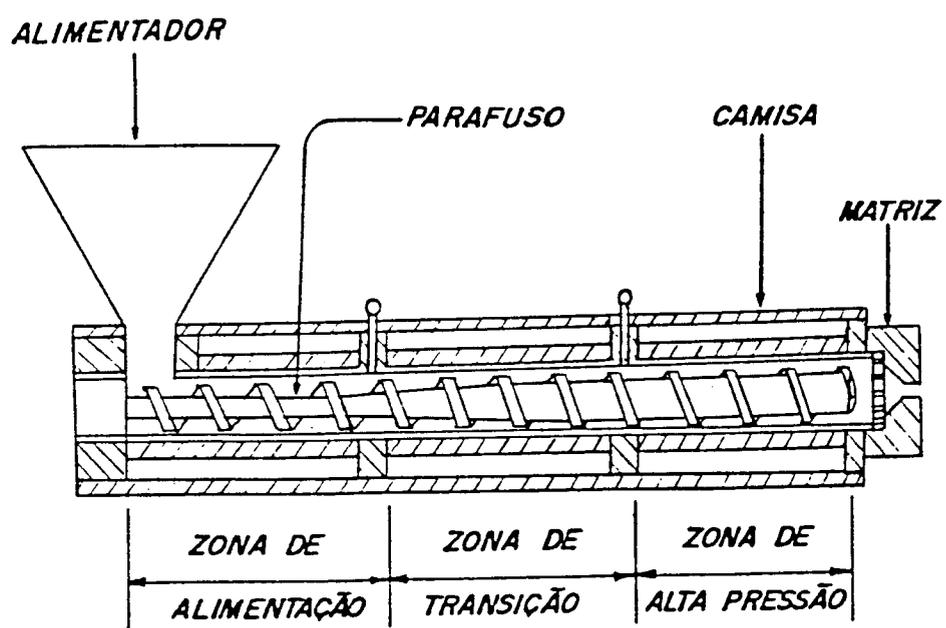


FIGURA 1. Desenho esquemático de um extrusor de rosca única.

O material pré-condicionado é introduzido no extrusor através do alimentador e cai na zona de alimentação, a qual tem a função de receber o material e comprimí-lo iniciando o seu transporte através do extrusor, onde começa a ser transformado em uma massa contínua. Nesta zona, a rosca possui maior profundidade ou maior passo.

Na zona de transição que se segue, o material é completamente transformado em massa e cozido parcialmente, devido à geometria do parafuso que se modifica gradualmente através de decréscimo na altura ou no passo da rosca, fazendo com que aumente a taxa de cisalhamento e a energia mecânica consumida, resultando em um aumento de temperatura (130°-180°C) e pressão (20-50 atm).

Quando o material atinge a zona de alta pressão, o mesmo é cozido até o grau desejado. Nesta zona a taxa de cisalhamento é muito alta, a intensidade de mistura é drasticamente aumentada e a dissipação de energia está no seu ponto máximo. O aumento de temperatura é muito rápido e alcança o máximo justamente antes do produto sair da matriz. Quando a massa atravessa a matriz, a pressão é rapidamente liberada e grande parte da água superaquecida evapora instantaneamente, provocando a expansão do produto (18). A rápida perda de umidade após a matriz resulta no resfriamento do material que se solidifica e se firma.

O controle do processo de extrusão é bastante complexo devido a um grande número de variáveis que o afetam. Estas se relacionam com a engenharia do equipamento (desenho do parafuso e da matriz), com a matéria-prima (umidade e composição

química) e com as condições operacionais (temperatura, velocidade do parafuso e fluxo de alimentação).

Estudos dos efeitos combinados destas variáveis foram possíveis com a aplicação da metodologia estatística de superfície de resposta (MSR) como demonstram os trabalhos de EL-DASH *et alii* (15), OWUSU-ANSAH *et alii* (40) e MEUSER *et alii* (36).

3. Efeitos da extrusão no amido

(a) Alterações na estrutura do grânulo

O amido "in natura" sofre mudanças substanciais que levam a uma grande desorganização molecular durante a extrusão. Ocorre perda de sua cristalinidade nativa, sofre degradação molecular e, freqüentemente, se complexa com lipídeos durante a homogeneização na fase de mistura. Os efeitos de cisalhamento, temperatura, umidade e composição da matéria-prima são outros fatores altamente significantes na transformação do amido pela extrusão (23). A extrusão destrói a estrutura cristalina organizada, parcial ou totalmente, dependendo da razão amilose/amilopectina e das variáveis de extrusão, tais como teor de umidade e cisalhamento. Com amido de tubérculos que estão livres de lipídeos e amido ceroso que não contém amilose, a redução da cristalinidade é observada a uma temperatura de extrusão tão baixa quanto 70°C. A temperaturas mais altas, a estrutura é completamente destruída, levando a um padrão de raio X típico de um estado amorfo (8).

Amidos com teor normal de amilose (32) comportam-se diferentemente. Dois tipos de estrutura podem ser formados. Abaixo de 170°C, aparece um padrão de difração de raio X, característico de amido de estrutura V, sendo observado em contraste, acima de 185°C, uma nova estrutura chamada "extrusa-

da" ou "tipo E", caracterizada por três picos de difração levemente deslocados daqueles do tipo V. Entre 170°C e 185°C ocorrem ambos os tipos, E e V.

A razão amilose/amilopectina também é importante na determinação das propriedades de produtos extrusados a base de amido. O componente amilose propicia leveza e elasticidade, regularidades de superfície e textura, mas uma superfície pegajosa. Em contraste, a amilopectina leva a produtos extrusados mais rígidos e menos expandidos. FAUBION *et alii* (18) verificaram que produtos extrusados contendo alto teor de amilose eram menos resistentes às forças de cisalhamento e de quebra. Estes resultados confirmam a reivindicação de MATZ (27), que recomendou um nível de 5-20% de amilose no amido para dar adequada friabilidade e aceitável textura. HARPER (23) afirma que a amilose é menos suscetível a danos mecânicos durante o processo de extrusão que a amilopectina e que para aumentar a solubilidade da amilose são necessárias altas temperaturas na extrusão.

GOMEZ & AGUILERA (20) afirmam que o cisalhamento causa danos mecânicos ao amido, enquanto que a aplicação de calor e umidade favorecem a perda da cristalinidade. Por outro lado, um menor teor de umidade causa aumento da viscosidade e maior dano mecânico. A amilopectina, devido ao volume de sua molécula, não consegue se alinhar efetivamente durante o seu transporte pela rosca através da camisa e da matriz, ocorrendo grande dano mecânico com conseqüente redução do seu tamanho molecular (12). Estes amidos danificados são menos coesivos que os amidos gelatinizados não danificados. Conseqüentemente, eles expandem

menos, predominantemente na direção longitudinal (26), originando produtos com poros menores, texturas mais macias e maior solubilidade.

Entretanto, HARPER (23) contradiz esta afirmação dizendo que o não alinhamento das moléculas de amilopectina na extrusão leva à obtenção de produtos altamente expandidos.

Produtos resultantes da extrusão de amido contendo altos teores de umidade apresentam poros de maior tamanho e paredes celulares mais espessas, podendo expandir significativamente após a matriz, mas colapsam antes de serem resfriados, solidificando-se e dando origem a produtos de textura muito dura (vítrea) e indesejável.

As mudanças acima têm sido relatadas por diversos pesquisadores (19, 34, 35, 41). Os dados apresentados são muito específicos quanto ao tipo de extrusor usado, porém, não trazem maiores informações quanto às características mecânicas e operacionais do extrusor e não podem ser generalizados a níveis específicos de cisalhamento na rosca e/ou na matriz e para relações de tempo/temperatura/umidade necessários para a obtenção de produto com características específicas de textura.

(b) Alterações nas propriedades funcionais

Entre as principais propriedades funcionais dos amidos extrusados estão a viscosidade, expansão, absorção de água e solubilidade em água. Diferenças substanciais são observadas entre amidos extrusados, particularmente entre aqueles com diferentes razões amilose/amilopectina, mas as mesmas tendências são encontradas. Assim, diversos estudos foram realizados no sentido de procurar esclarecer os efeitos de algumas variáveis nas propriedades físico-químicas do amido.

MERCIER & FEILLET (34) estudaram os efeitos da temperatura (70°-225°C), teor de umidade (10,5-28,5%) e razão amilose/amilopectina nos produtos obtidos por extrusão de amidos de milho, trigo e arroz, utilizando um extrusor Creusot-Loire. Eles verificaram que o aumento da temperatura provocou aumento da fração de carboidratos solúveis em água, sendo este efeito mais acentuado quanto menor era o teor de amilose. O Índice de Absorção de Água (IAA) também aumentou com a temperatura, quando o teor de amilose era de 25%, mas permaneceu praticamente constante quando esse teor era mais elevado. A viscosidade final a 50°C, em quase todas as amostras, decresceu com o aumento da temperatura. Observaram, ainda, que o aumento da umidade provocou um aumento da viscosidade final e do IAA, enquanto que o Índice de Solubilidade em Água (ISA) e a expansão diminuíram. Amidos de diferentes fontes (milho, arroz ou trigo) tratados nas mesmas condições, apresentaram respostas diferentes para as propriedades estudadas, indicando a influência da estrutura física do amido. Analisando as frações solúveis em água e em álcool, concluíram que a extrusão provocou apenas liberação de polímeros de alto peso molecular, sem formação de dextrinas.

MERCIER (30), extrusando amido de batata em extrusor Creusot-Loire, verificou que aumentos da temperatura de extrusão (75°-190°C) provocaram aumentos na expansão e no ISA, enquanto que a viscosidade a 50°C e o IAA diminuíram. Estes resultados indicaram que houve a ruptura do grânulo de amido, o que foi confirmado pelo espectro de raios X. Ao contrário do que aconteceu com os amidos de cereais, neste caso verificou-se

a formação de oligossacarídeos, com cadeia linear e peso molecular inferior a 2.000. O teor destes oligossacarídeos aumentou com o aumento da temperatura do processo.

MERCIER *et alii* (33) extrusaram amido de mandioca comercial, com 22% de umidade, em extrusor Creusot-Loire BC 45 e constataram que as propriedades dos extrusados assemelhavam-se às do amido de batata, ou seja, aumentos na temperatura de extrusão aumentavam a expansão e o ISA e diminuía o IAA e a viscosidade a frio após o cozimento.

EL-DASH *et alii* (15) aplicaram a metodologia de superfície de resposta para extrusão de amido de milho, em extrusor de laboratório Brabender de rosca única. A umidade e a temperatura afetaram a viscosidade inicial (30°C) e a viscosidade a quente (95°C), medidas em viscoamilógrafo. Altas temperaturas e baixas umidades, ou seu inverso, resultaram em baixa viscosidade inicial, sendo que viscosidades mais altas foram obtidas com amido de 17-24% de umidade, extrusado a 160°-205°C. A viscosidade a quente, para cada teor de umidade, aumentou com a temperatura até um nível crítico, diminuindo a seguir. Para uma dada temperatura, aumentos na umidade resultaram em aumentos de viscosidade. Verificaram, também, que o efeito combinado da umidade e velocidade do parafuso é importante apenas quando o teor de umidade é alto e, neste caso, pequenos aumentos na velocidade aumentam o grau de gelatinização, como foi evidenciado pela diminuição da viscosidade a quente. O torque foi máximo quando o processamento foi realizado com baixo teor de umidade e baixa rotação do parafuso. Nestas condições, o produto obtido apresentou uma viscosidade inicial muito baixa, indicando que, provavelmente, ocorreu despolimerização da molécula de amido.

OWUSU-ANSAH *et alii* (40) utilizando um extrusor Creu^usot-Loire BC 45 e processando amido de milho, procuraram estabele^ucer as variáveis mais diretamente ligadas a cada modificação fí^usico-química provocada no amido. O grau de gelatinização e o IAA foram afetados, principalmente, pela interação temperatura x umi^udade e pela temperatura isoladamente. Mantendo-se a velocidade do parafuso em 90 rpm, a gelatinização máxima foi obtida com alto teor de umidade e baixa temperatura (100°C). O IAA variou da mes^uma maneira que o grau de gelatinização. Para as viscosidades ini^ucial e a quente, a umidade foi a variável mais importante e, atra^uvés de cromatografia em papel, foi constatada a formação de oli^ugossacarídeos.

As conclusões decorrentes das diferentes pesquisas (15, 34, 40), às vezes se mostram contraditórias. Isto ocorre devido às diferenças existentes nos equipamentos, nas matérias-primas e nas condições operacionais em que foram realizados os estudos, o que impede, muitas vezes, que estudos comparativos sejam feitos.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Materiais

1. Matéria-prima

Foram utilizados 250kg de sementes de sorgo sacarino da cultivar BR-501, obtidas no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS) da EMBRAPA, em Sete Lagoas, Estado de Minas Gerais.

2. Reagentes

Nas determinações químicas foram usados reagentes com pureza analítica.

Para o cálculo do grau de gelatinização, usou-se a enzima amiloglicosidase (Glucoamilase, 1,4, α -D-Glucan glucohidrolase; EC 3.2.1.3.) de *Rhizopus*, com 10.000 U/g de sólido, fornecida pela Sigma Chemical Co. (Catálogo A-7255).

B. Métodos

1. Obtenção do amido

O amido de sorgo foi obtido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 2. As diferentes etapas são descritas a seguir.

(a) Descascamento do sorgo

O sorgo foi descascado na máquina de beneficiamento de arroz D'ANDREA, modelo Compacta Júnior, tipo 2 C/R, passando pelo sistema abrasivo cerca de cinco vezes.

(b) Extração do amido

● Maceração

O sorgo descascado foi lavado por sucessivas vezes (7 a 10)

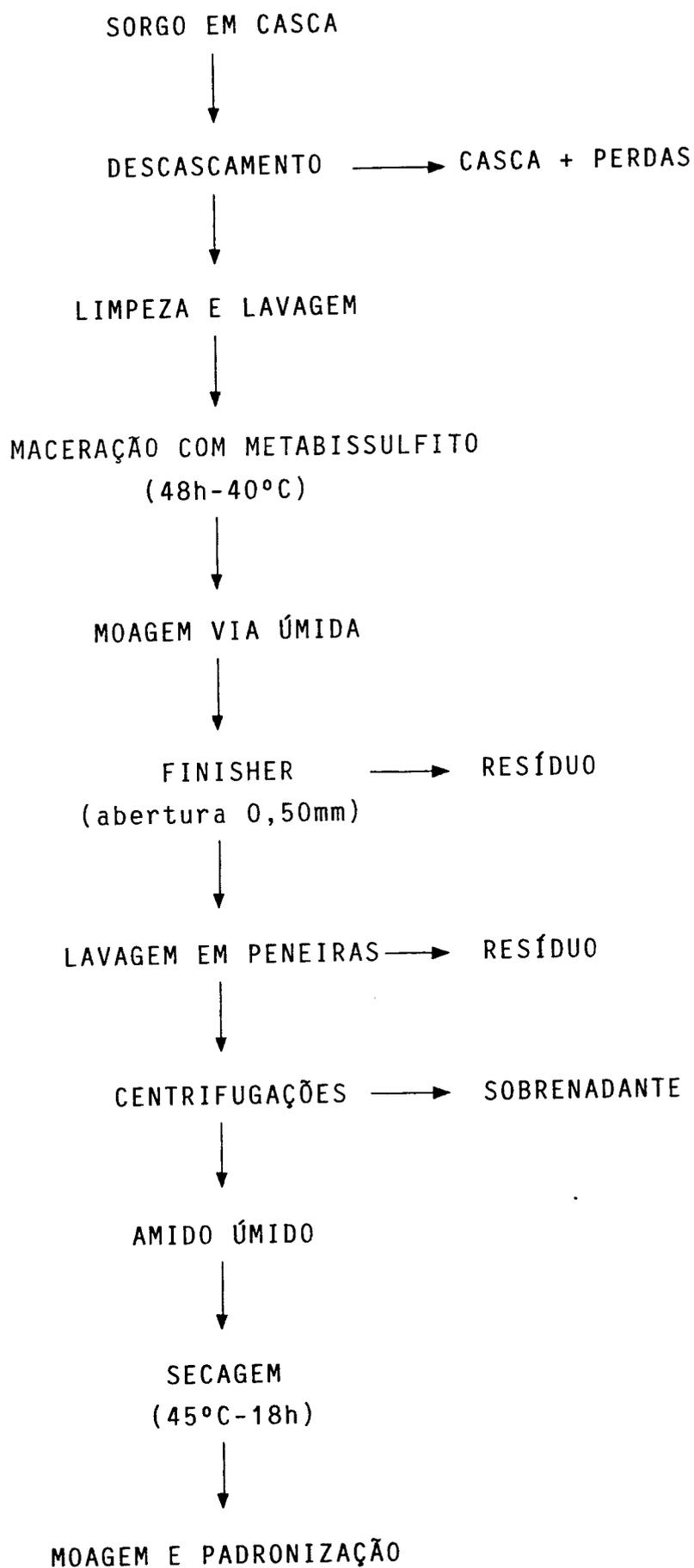


FIGURA 2. Fluxograma do proceso de obtenção do amido de sorgo.

com o objetivo de se retirar as impurezas provenientes do seu descascamento.

Posteriormente, colocou-se em maceração por um período de 48 horas a 40°C. A maceração foi feita utilizando-se para cada parte de sorgo, 2 partes de água contendo 1,5g de metabissulfito de sódio por litro. Uma vez completado o período de maceração, fêz-se a drenagem da água e o sorgo tornou a ser lavado, até a água de lavagem se tornar límpida (5 a 7 vezes).

- Moagem do sorgo por via úmida

O sorgo macerado foi moído no moinho de martelo TREU em duas etapas. Na primeira etapa utilizou-se peneira de 3,2mm de abertura. Na segunda, utilizou-se peneira de 1,25mm de abertura. Para facilitar a moagem adicionaram-se para cada parte de sorgo macerado, 2 partes de água.

- Separação de sólidos grosseiros

O material moído, conforme mostrado na Figura 2, passou posteriormente por um separador de sólidos ("Finisher" - Juice Extractor, modelo 35), utilizando-se uma peneira de 0,50mm de abertura, onde eliminaram-se as impurezas constituídas por partículas grosseiras (> 0,50mm e < 1,25mm).

- Lavagem em peneiras

O material proveniente do "Finisher" foi separado numa seqüência de três peneiras, conforme se segue: 1^a peneira - 0,250mm de abertura; 2^a peneira - 0,125mm de abertura e 3^a peneira - 0,062mm de abertura.

As peneirações foram feitas com o auxílio de água, obtendo-se uma suspensão de amido. O material retido nas peneiras constituído predominantemente por partículas finas de fibras, foi descartado.

- Purificação do amido

A suspensão de amido obtida anteriormente sofreu decantação por 12 horas, eliminando-se, a seguir, o sobrenadante. O amido decantado foi resuspenso em água e posteriormente levado para a centrífuga IEC, modelo Universal UV, onde foi centrifugado a 1500 x G (3700 rpm) por 15 minutos, eliminando-se, em seguida, além do sobrenadante, a borra que se formava na superfície do amido e que, aparentemente, era constituída por proteínas e fibras. Esta operação foi repetida até se obter o amido puro.

- Secagem do amido

O amido obtido nas centrifugações foi transferido para bandejas de alumínio (30 x 50cm), procurando-se evitar camada superior a 1cm. Estas bandejas foram transportadas para um secador trabalhando com ventilação forçada a uma temperatura de 40°C por 18 horas. Para facilitar a secagem do amido nas bandejas, este foi revolvido de hora em hora nas primeiras 6 horas de secagem.

- Desagregação do amido

Para melhorar a aparência do amido e padronizá-lo numa determinada granulometria, o amido proveniente da secagem foi desagregado no moinho experimental Brabender Quadrumat Júnior, sendo, posteriormente, passado por uma peneira de 0,153mm de abertura.

2. Caracterização do amido

(a) Composição química

- Umidade

Foi determinada no determinador rápido de umidade semi-automático Brabender, onde as amostras permaneceram a 130°C por 1 hora.

- Cinza

Foi determinada através de calcinação das amostras a 525°C por 2 horas, segundo o método 08-17 da AACC (2).

- Fibra

Foi determinada segundo o método de KAMER & GINKEL (25).

- Matéria graxa

Foi determinada por extração com éter de petróleo, segundo o método 30-10 da AACC (2).

- Amido

Foi determinado segundo o método 76-20 da AACC (2).

- Proteína

Foi determinada multiplicando-se o teor de nitrogênio total pelo fator 6,25. O nitrogênio total foi determinado segundo o método Kjeldahl 56-12 da AACC (2).

(b) Viscosidade

Foi determinada no viscoamilógrafo Brabender, equipado com cabeçote de 350cmg. Os amilogramas foram obtidos empregando-se suspensões de amido de 5,0; 7,5 e 10,0%, ou seja, 22,50; 33,75 e 45,00g de amido (14% de umidade) em 450ml de água

destilada. A temperatura aumentou de 30°C a 95°C a uma taxa de 1,5°C/min, permanecendo nesta temperatura por 20 minutos, sendo depois diminuída para 50°C, também a uma taxa de 1,5°C/min.

3. Extrusão do amido

(a) Condicionamento das amostras de amido

As amostras usadas na extrusão foram condicionadas para os níveis apropriados de umidade (15,0; 17,5; 20,0; 22,5 e 25,0%), utilizando-se o misturador Blakeslee, modelo B-20-T, na velocidade 1 (100 rpm) por 15 minutos.

(b) Determinação da velocidade do alimentador

Foi estabelecida a relação entre rpm do alimentador e a umidade do amido, a fim de manter uma alimentação constante de 70g/min, taxa esta considerada ótima para o bom funcionamento do extrusor (15).

(c) Equipamento

A extrusão foi feita no extrusor de laboratório Brabender 20 DN e equipado com rosca única sem fim (38cm de comprimento e 1,9cm de diâmetro), com taxa de compressão de 4:1 e com alimentador vertical em hélice de velocidade variável. A camisa deste extrusor está dividida em três zonas: de alimentação, de transição e de alta pressão, as quais são aquecidas por sistema de indução elétrica. As duas primeiras zonas aquecem a rosca enquanto que a terceira zona

aquece a região da matriz. Para se ter melhor controle e maior flexibilidade da operação no que diz respeito à elevação da temperatura pelo atrito durante o processo de extrusão, a zona de alimentação é resfriada por circulação de água fria, enquanto que as zonas de transição e de alta pressão são resfriadas por ar comprimido. O registro e o controle da temperatura de aquecimento nas diferentes zonas da camisa são feitos por termopares. Os requerimentos de energia e as variações de rpm do parafuso são indicados e registrados pelo Do-Corder, o qual se constitui num dinamômetro acoplado ao extrusor.

(d) Processamento

A extrusão foi iniciada após as três zonas atingirem as temperaturas desejadas. A temperatura da primeira zona foi sempre de 85°C, enquanto que nas demais zonas a temperatura variou conforme as condições estabelecidas no desenho experimental (Quadro 1). Inicialmente, introduziu-se no alimentador uma amostra (200 a 300g) com alto teor de umidade (25 a 26%), e após alguns minutos de operação foi então adicionada a amostra de amido previamente condicionada. Quando o torque permaneceu constante, indicando que o sistema atingira o equilíbrio, passou-se a coletar amostra do produto num total de aproximadamente 600g. A seguir, as condições operacionais eram modificadas para processar outra amostra. Após a extrusão, as amostras foram secas em estufa a 50°C e depois moídas no moinho de laboratório IKA, modelo universal M-20. O material moído foi passado em peneira de 0,250mm de abertura, padronizando-se, assim, a granulometria. Em seguida, foi condicionado em saco plástico para posterior utilização nas análises.

QUADRO 1. Níveis das variáveis independentes.

Variáveis independentes	Níveis de variação				
	-2	-1	0	1	2
X_1 = umidade da matéria- -prima (%)	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0
X_2 = Temperatura (°C)	130	155	180	205	230
X_3 = Velocidade do para- fuso (rpm)	80	105	130	155	180
X_4 = diâmetro da matriz (mm)	2	3	4	5	6

4. Análise estatística

(a) Delineamento experimental

Foi usado o delineamento central composto de metodologia de superfície de resposta (MSR), proposto por BOX & WILSON (6), com a finalidade de estudar o efeito combinado de quatro variáveis independentes: umidade da matéria-prima, temperatura, velocidade do parafuso e diâmetro da matriz, em diferentes propriedades do amido de sorgo extrusado (variáveis dependentes ou respostas).

As variáveis foram estudadas em cinco níveis codificados como -2, -1, 0, +1 e +2. Os valores reais desses níveis, que aparecem no Quadro 1, foram calculados de acordo com a equação de regressão.

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\Delta X_i}$$

onde:

- x_i = valor codificado da variável X_i
- X_i = valor real da variável
- \bar{X}_i = valor real da variável no ponto central
- ΔX_i = intervalo de variação de X_i

As variáveis codificadas (x_i) estão relacionadas às unidades originais (X_i) como dados nas seguintes equações:

$$x_1 = \frac{X_1 - 20}{2,5}$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 180}{25}$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 130}{25}$$

$$x_4 = \frac{X_4 - 4}{1}$$

Os valores máximo e mínimo de cada variável foram escolhidos dentro das possibilidades operacionais do processo de extrusão.

O delineamento experimental é composto de 31 ensaios, realizados aleatoriamente, sendo 16 fatoriais (combinam os níveis +1 e -1), 8 axiais (uma variável com o nível +2 ou -2 e as outras em 0) e 7 centrais (todas as variáveis em 0).

O delineamento estatístico dos experimentos aparece nos Quadros 2 e 3.

(b) Análise dos resultados

Foi aplicada a metodologia de superfície de resposta (MSR) (13, 45) para análise dos dados experimentais. Esta metodologia descreve a mudança ou resposta da variável dependente com mudanças nas variáveis independentes.

QUADRO 2. Delineamento experimental central composto para 4 variáveis em 5 níveis (valores codificados).

Experimento	Níveis das variáveis			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
01	-1	-1	-1	-1
02	1	-1	-1	-1
03	-1	1	-1	-1
04	1	1	-1	-1
05	-1	-1	1	-1
06	1	-1	1	-1
07	-1	1	1	-1
08	1	1	1	-1
09	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	-2	0	0	0
18	2	0	0	0
19	0	-2	0	0
20	0	2	0	0
21	0	0	-2	0
22	0	0	2	0
23	0	0	0	-2
24	0	0	0	2
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0

QUADRO 3. Delineamento experimental central composto para 4 variáveis em 5 níveis (valores reais).

Experimento	Níveis das variáveis			
	X_1	X_2	X_3	X_4
01	17,5	155	105	3
02	22,5	155	105	3
03	17,5	205	105	3
04	22,5	205	105	3
05	17,5	155	155	3
06	22,5	155	155	3
07	17,5	205	155	3
08	22,5	205	155	3
09	17,5	155	105	5
10	22,5	155	105	5
11	17,5	205	105	5
12	22,5	205	105	5
13	17,5	155	155	5
14	22,5	155	155	5
15	17,5	205	155	5
16	22,5	205	155	5
17	15,0	180	130	4
18	25,0	180	130	4
19	20,0	130	130	4
20	20,0	230	130	4
21	20,0	180	80	4
22	20,0	180	180	4
23	20,0	180	130	2
24	20,0	180	130	6
25	20,0	180	130	4
26	20,0	180	130	4
27	20,0	180	130	4
28	20,0	180	130	4
29	20,0	180	130	4
30	20,0	180	130	4
31	20,0	180	130	4

Os dados experimentais foram usados para desenvolver um modelo matemático preditivo, baseado na equação de expansão de série de Taylor, onde foi assumido para cada observação o modelo de resposta de segunda ordem, cuja expressão geral é:

$$\begin{aligned}
 Y_i = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \\
 & + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \\
 & + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4 + \epsilon
 \end{aligned}$$

onde:

Y_i : é a função - resposta genérica;

x_1, x_2, x_3 e x_4 : são os níveis codificados das variáveis independentes;

β_0 : ponto central do sistema ou ponto estacionário;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ e β_4 : correspondem aos coeficientes dos efeitos lineares estimados pelo método dos mínimos quadrados;

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}, \beta_{44}, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{23}, \beta_{24}$ e β_{34} : correspondem aos coeficientes dos efeitos de segunda ordem; e

ϵ : resíduo que mede o erro experimental.

A significância do modelo foi testada pela análise de variância (teste F) e a influência das variáveis foi visualizada nas curvas de superfície de resposta, obtidas através do computador VAX 740 da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pelo Sistema de Análise Estatística (SAS).

As respostas observadas foram:

- Y_1 = Torque;
- Y_2 = Expansão;
- Y_3 = Viscosidade a frio;
- Y_4 = Viscosidade a quente;
- Y_5 = Viscosidade após 20 minutos a 95°C ;
- Y_6 = Viscosidade a 50°C , após o cozimento;
- Y_7 = Índice de solubilidade em água (ISA);
- Y_8 = Índice de absorção de água (IAA); e
- Y_9 = Suscetibilidade enzimática.

5. Torque

O torque foi calculado a partir dos gráficos obtidos durante o processo de extrusão, considerando-se o valor médio na fase mais estável. Os valores são expressos em gfm.

6. Propriedades físico-químicas dos amidos extrusados

(a) Expansão

Foi determinada, logo após a extrusão, tomando-se aleatoriamente de cada experimento, dez amostras, nas quais mediu-se o diâmetro. A expansão foi calculada, dividindo-se a média aritmética dos diâmetros das amostras de cada experimento pelo diâmetro da matriz empregada no respectivo experimento.

(b) Viscosidade

Foi determinada no viscoamilógrafo Brabender, equipado com um cabeçote de 350cmg. Os amilogramas foram obtidos empregando-se suspensões de amido a 10%, ou seja: 45g de amido (14% de umidade) em 450ml de água destilada. A temperatura aumentou de 30°C a 95°C a uma taxa de $1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, permanecendo nesta temperatura por 20 minutos, sendo depois diminuída para 50°C , também a uma taxa de $1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Do amilograma, que é o registro da variação da viscosidade em função da variação da temperatura obteve-se os seguintes parâmetros (53):

- Viscosidade inicial ou viscosidade a frio - é o valor da viscosidade em unidades amilográficas (UA) no início do ciclo de aquecimento a 30°C;

- Viscosidade a 95°C - é o valor da viscosidade em UA a 95°C no ciclo de aquecimento;

- Viscosidade após 20 minutos a 95°C - é o valor da viscosidade em UA após 20 minutos à temperatura de 95°C;

- Viscosidade final a 50°C - é o valor da viscosidade em UA à temperatura de 50°C no ciclo de resfriamento.

(c) Índices de solubilidade em água (ISA) e de absorção de água (IAA)

Foram determinados pelo método descrito por ANDERSON *et alii* (3) onde 1g (base seca) de amostra de amido extrusado e moído (partículas inferiores a 0,250mm) foi suspenso em 30ml de água destilada, em tubo de centrífuga de 50ml, previamente tarado. A suspensão foi mantida sob agitação constante por 30 minutos à temperatura de 30°C e, a seguir, centrifugada a 1000 x G (3000 rpm) por 10 minutos. O sobrenadante foi separado cuidadosamente e o peso de resíduo sólido determinado.

Posteriormente, retirou-se do sobrenadante uma alíquota de 10ml, que foi transferida para placa de Petri previamente tarada. Esta foi levada à estufa a 105°C e com circulação forçada de ar para facilitar a evaporação, onde foi mantida até

a obtenção de peso constante. Após resfriamento da placa em dissecadores, os sólidos existentes na mesma foram determinados por pesagem. O índice de solubilidade em água é a relação entre o peso do resíduo da evaporação e o peso seco da amostra e é expresso de acordo com a seguinte fórmula:

$$ISA = \frac{\text{peso do resíduo da evaporação}}{\text{peso da amostra}} \times 100 \times f$$

onde f é o fator de correção do volume, que neste caso é igual a 3.

O índice de absorção de água é a relação entre o peso do resíduo e o peso da amostra (base seca) menos o peso do resíduo de evaporação do sobrenadante, e é expresso de acordo com a seguinte fórmula:

$$IAA = \frac{\text{peso do resíduo da centrifugação}}{\text{peso da amostra} - \text{peso do resíduo da evaporação}}$$

(d) Suscetibilidade enzimática

Foi determinada segundo o método descrito por CHIANG & JOHNSON (7), o qual se baseia no princípio de que o amido gelatinizado é facilmente digerido pela glucoamilase formando glicose, a qual condensa com a orto-toluidina dando, em presença de ácido acético glacial, um cromógeno verde, cuja intensidade de cor foi medida através da absorbância a 630nm no espectrofotômetro Bausch & Lomb, modelo Spectronic 20.

Uma amostra A, de 20mg, foi totalmente gelatinizada com NaOH, enquanto que outra amostra B, também de 20mg, foi

apenas dispersa em água. Ambas foram digeridas com glucoamilase a 40°C, retirando-se alíquotas após 30 e 60 minutos, inativando a enzima com ácido tricloroacético (TCA) a 25%. A solução foi centrifugada a 1500 x G (3700 rpm) por 20 minutos. Do sobrenadante retirou-se uma alíquota de 0,5ml, ao qual foram adicionados 4,5ml de orto-toluidina, colocando-se, a seguir, em banho a 100°C por 10 minutos, com posterior resfriamento. Em seguida, adicionaram-se 5ml de ácido acético glacial, ocorrendo o desenvolvimento da cor, que foi medida através da determinação da absorbância a 630nm. Para determinar o grau de gelatinização (%), o qual corresponde à suscetibilidade enzimática (%), aplicou-se as fórmulas:

$$\% \text{ de gelatinização} = \frac{100 (B - k)}{A - k} \quad k = \frac{A (C - B)}{A + 2B + C}$$

onde:

- A = absorbância do amido totalmente gelatinizado (Amostra A);
- B = absorbância do amido parcialmente gelatinizado (Amostra B), após hidrólise de 30 minutos;
- C = absorbância do amido parcialmente gelatinizado (Amostra B), após hidrólise de 60 minutos; e
- k = absorbância de 1% de amido não gelatinizado digerido com glucoamilase durante 30 minutos.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Caracterização do amido

O amido utilizado neste trabalho foi obtido em duas etapas, isto é, através do descascamento dos grãos e posterior extração do amido (maceração, moagem, peneiragem).

Os dados relativos à obtenção do amido encontram-se no Quadro 4.

Os dados do Quadro 4 mostram que, de acordo com o processo utilizado, partindo-se de 100kg de grão em casca, obtém-se 29,84kg de amido.

Para se conhecer as características do amido obtido e também para avaliar a eficiência do método de obtenção empregado quanto ao grau de pureza do amido, determinou-se a composição química do mesmo, estando os resultados no Quadro 5.

Os dados do Quadro 5 mostram que o amido obtido apresentou teor de umidade compatível às condições normais de armazenamento, isto é, inferior a 14%. Também mostram que os teores de proteína, cinza, fibra e matéria graxa estão de acordo com aqueles obtidos por PALERMO (42). Entretanto, o dado mais expressivo se refere ao teor de amido em base seca (MS), o qual torna evidente ser o amido obtido de boa qualidade, apresentando um grau de pureza da ordem de 98,11%.

Ainda, por ser a viscosidade uma das mais importantes propriedades dos amidos e para melhor caracterizar o amido obtido, fez-se as curvas amilográficas que aparecem na Figura 3. Estas curvas mostram as mudanças da viscosidade em função do aquecimento para diferentes concentrações de amido. Servem,

QUADRO 4. Resultados relativos à obtenção de amido.

Material	Quantidades	
	kg	%
Grãos em casca	250,00	100,00
Grãos descascados	131,62	52,65
Amido	74,59	29,84

QUADRO 5. Composição química do amido.

Determinações	Resultados (%)	
	MO	MS
Umidade	8,12	-
Proteína (N x 6,25)	1,02	1,11
Cinza	0,08	0,09
Fibra	0,04	0,04
Matéria graxa	0,60	0,65
Amido (f = 5,64)	90,14	98,11

MO = matéria original

MS = matéria seca

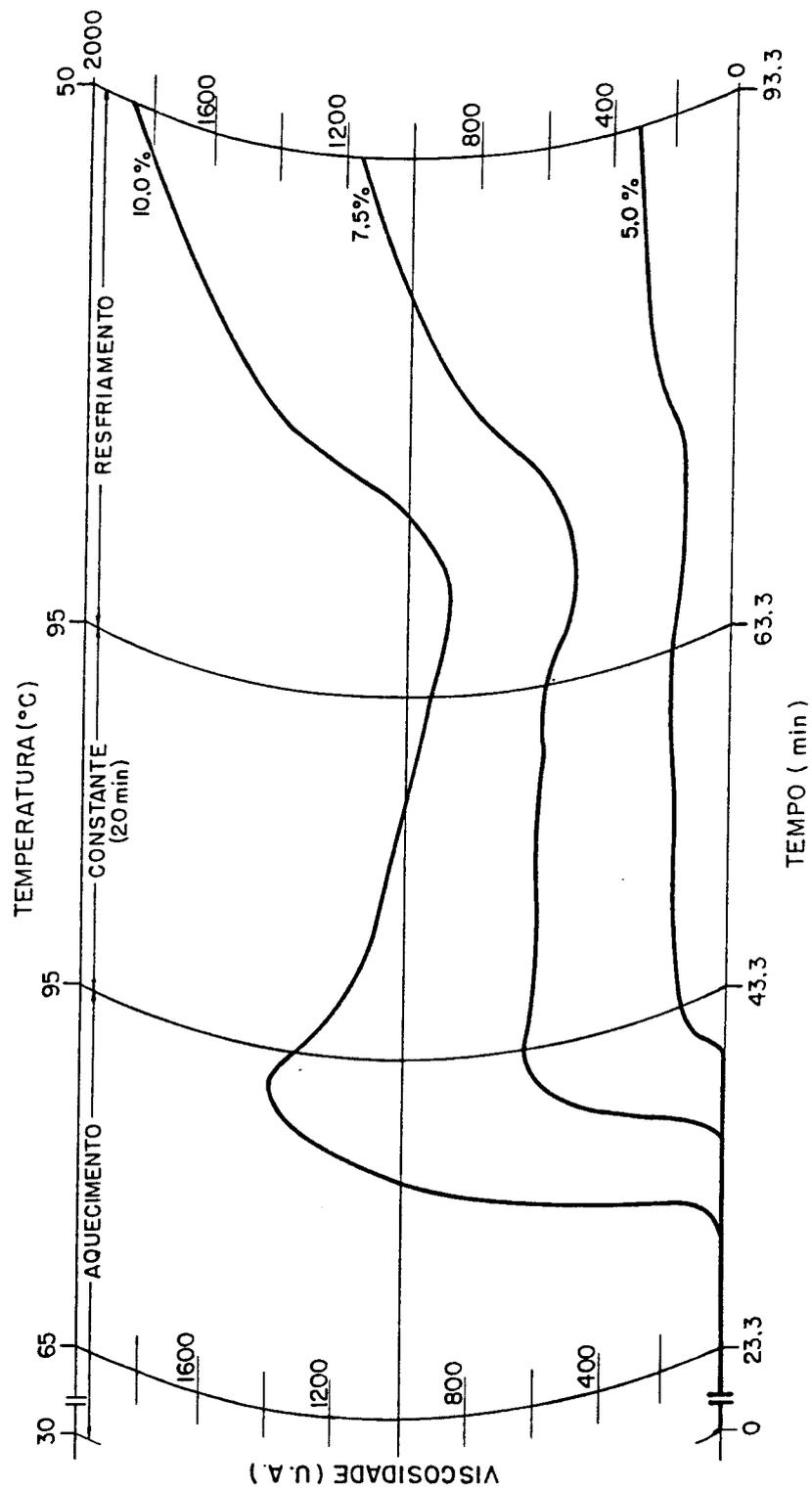


FIGURA 3. Curvas viscoamilográficas para diferentes concentrações de amido de sorgo.

também, como padrão para mostrar as mudanças de viscosidade devido à extrusão.

B. Torque (Y_1)

Os dados de torque para as condições experimentais deste trabalho se encontram no Quadro 6. A partir dos dados experimentais do Quadro 6, obteve-se o modelo preditivo que aparece na Equação 1.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_1 = & 1906,43 - 948,81 x_1 - 7,14 x_2 - 280,38 x_3 + 28,69 x_4 + \\ & + 323,10 x_1^2 + 311,85 x_2^2 + 30,60 x_3^2 + 374,35 x_4^2 - \\ & - 383,04 x_1 x_2 - 221,92 x_1 x_3 - 270,54 x_1 x_4 + 56,83 x_2 x_3 - \\ & - 489,29 x_2 x_4 + 294,33 x_3 x_4 \end{aligned} \quad (\text{Equação 1})$$

O modelo de regressão preditivo elaborado para a resposta Y_1 , Equação 1, é estatisticamente significativo ao nível de 1% ($p = 0,014$) e explica 77,40% da variação de Y_1 (Quadro 7).

A partir da ANOVA deste modelo, verifica-se que apenas os efeitos lineares são significativos ($p = 0,0019$) e entre estes, as variáveis x_1 (umidade da matéria-prima) com um valor de $p = 0,0023$ e x_4 (diâmetro da matriz) com um valor de $p = 0,1349$ deveriam ser considerados. Entretanto, observa-se que o diâmetro da matriz apresenta um nível de significância bastante inferior àquele obtido para umidade da matéria-prima. Decidiu-se, então, eliminar os termos com significância superior a 15% dando origem ao modelo reajustado, observando-se que, da mesma forma que no modelo anterior, esta não apresentou nenhuma alteração considerável.

Como somente a variável umidade da matéria-prima (x_1) foi significativa, reajustou-se o modelo em função dessa variável obtendo-se a Equação 2.

QUADRO 6. Influência das variáveis do processo de extrusão no torque.

Experimento	Variáveis da extrusão				Torque (gfm)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	2570
02	22,5	155	105	3	3930
03	17,5	205	105	3	5920
04	22,5	205	105	3	2640
05	17,5	155	155	3	2320
06	22,5	155	155	3	2040
07	17,5	205	155	3	4880
08	22,5	205	155	3	1320
09	17,5	155	105	5	4400
10	22,5	155	105	5	3000
11	17,5	205	105	5	3850
12	22,5	205	105	5	1020
13	17,5	155	155	5	5740
14	22,5	155	155	5	1200
15	17,5	205	155	5	3430
16	22,5	205	155	5	1540
17	15,0	180	130	4	4240
18	25,0	180	130	4	1350
19	20,0	130	130	4	2500
20	20,0	230	130	4	3000
21	20,0	180	80	4	1950
22	20,0	180	180	4	1300
23	20,0	180	130	2	2325
24	20,0	180	130	6	3675
25	20,0	180	130	4	1800
26	20,0	180	130	4	1450
27	20,0	180	130	4	1450
28	20,0	180	140	4	1675
29	20,0	180	130	4	2250
30	20,0	180	130	4	2520
31	20,0	180	130	4	2200

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

QUADRO 7. Análise de variância para $Y_1 =$ torque (gfm).

	GL	SQ	R^2	QM	F	p
Regressão						
Linear	4	25619315	0,4845		7,50	0,0019
Quadrática	4	9688715	0,1832		2,84	0,0648
Interação	6	5619818	0,1063		1,10	0,4109
Regressão	14	40927847	0,7740		3,42	0,0140
Resíduos						
Falta de ajuste	8	10887591		1360949	7,69	0,0114
Erro puro	6	1062236		177039		
Total	14	11949827		853559		
Variáveis						
x_1 (umidade)	5	28264019		5652804	6,62	0,0023
x_2 (temperatura)	5	7112128		1422426	1,67	0,2073
x_3 (vel.parafuso)	5	3803133		760626	0,89	0,5129
x_4 (\emptyset matriz)	5	8702357		1740471	2,04	0,1349
Média das respostas		2710,17				Coefficiente de variação 0,3409
Erro-padrão		923,88				R^2 0,7740

$$\hat{Y}'_1 = 2592,54 - 1046,87 x_1 + 267,95 x_1^2 \quad (\text{Equação 2})$$

A Equação 2 é estatisticamente significativa ao nível de 1% ($p = 0,0002$) e explica 48,99% da variação de Y'_1 . Entretanto, este reajuste no modelo reduziu o coeficiente de determinação múltipla (R^2) de 0,7740 para 0,4899.

Assim sendo, utilizou-se a Equação 1 para estabelecer a variação do torque em função de x_1 (umidade da matéria-prima) e x_2 (temperatura) mantendo x_3 (velocidade do parafuso) e x_4 (diâmetro da matriz) no nível do ponto central, isto é, 130 rpm e 4mm, obtendo-se as Figuras 4 (bidimensional) e 5 (tridimensional).

Verifica-se pela Figura 4 que, de modo geral, com o aumento da umidade ocorre a diminuição do torque. Isto é facilmente explicado pelo fato da água exercer uma função lubrificante e o fluxo se tornar mais fácil. Observa-se também que o menor torque ocorre na região de alta umidade e alta temperatura. Verifica-se, portanto, que a eficiência do processo, em termos de consumo de energia, aumenta com o aumento da umidade, ou seja, quanto maior for a umidade menor será o torque. Estes efeitos são visualizados de forma tridimensional na Figura 5.

C. Propriedades físico-químicas dos amidos extrusados

1. Expansão (Y_2)

Os dados relativos ao efeito das variáveis da extrusão sobre a expansão dos produtos extrusados encontram-se no Quadro 8. Por meio da análise estatística dos dados do Quadro 8, obteve-se o modelo de regressão completo preditivo que se encontra na Equação 3.

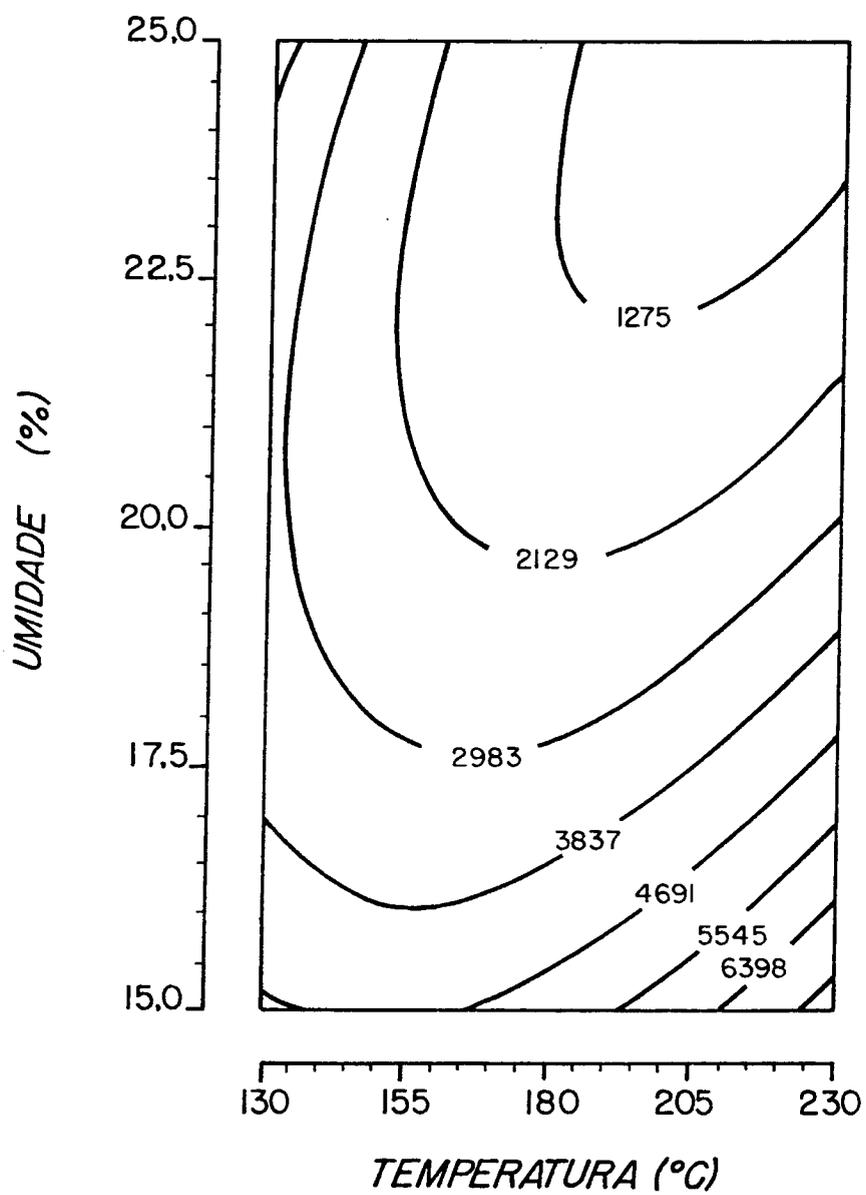


FIGURA 4. Efeito da umidade e temperatura no torque (vel. parafuso = 130 rpm e \emptyset matriz = 4mm).

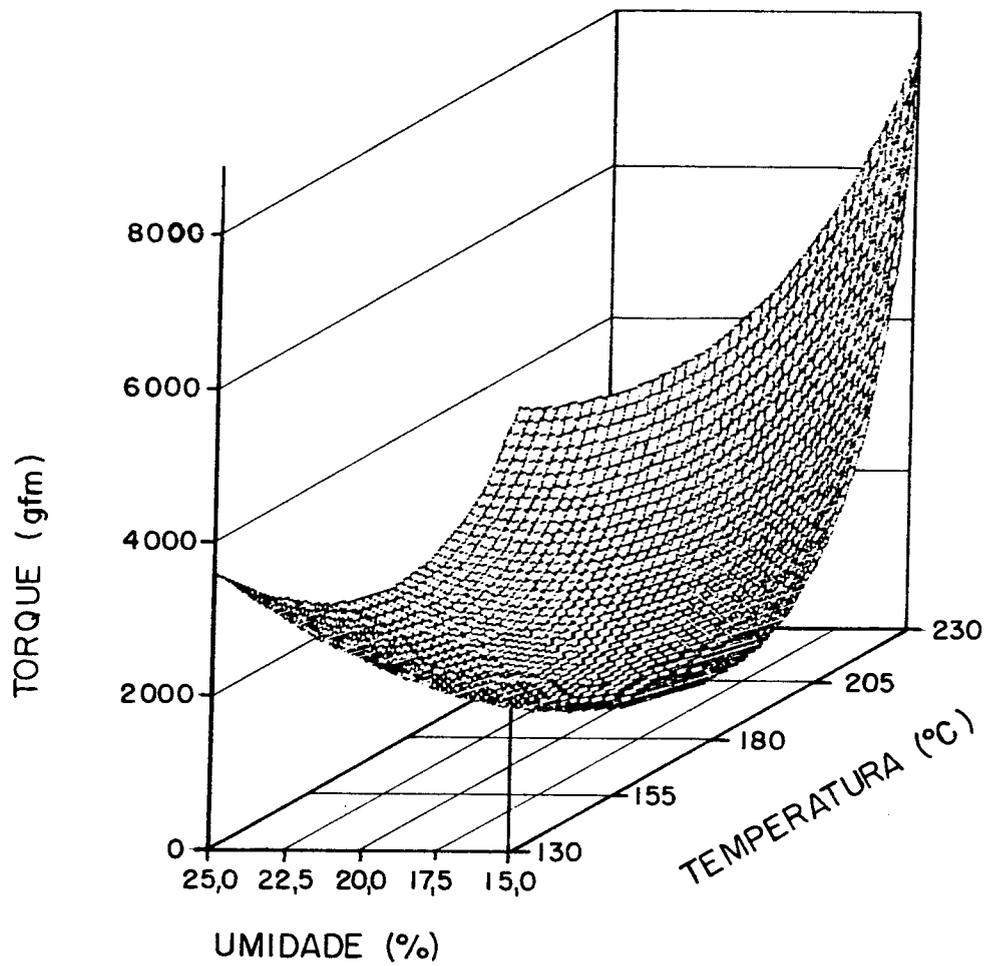


FIGURA 5. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura no torque (vel. parafuso = 130 rpm e \varnothing matriz = 4mm).

QUADRO 8. Influência das variáveis do processo de extrusão na expansão.

Experimento	Variáveis da extrusão				Expansão (\emptyset produto/ \emptyset matriz)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
01	17,5	155	105	3	2,42
02	22,5	155	105	3	2,06
03	17,5	205	105	3	2,41
04	22,5	205	105	3	1,37
05	17,5	155	155	3	2,66
06	22,5	155	155	3	1,97
07	17,5	205	155	3	2,89
08	22,5	205	155	3	1,26
09	17,5	155	105	5	2,34
10	22,5	155	105	5	1,94
11	17,5	205	105	5	1,50
12	22,5	205	105	5	1,21
13	17,5	155	155	5	2,44
14	22,5	155	155	5	2,23
15	17,5	205	155	5	1,47
16	22,5	205	155	5	1,18
17	15,0	180	130	4	2,45
18	25,0	180	130	4	1,72
19	20,0	130	130	4	2,01
20	20,0	230	130	4	0,83
21	20,0	180	80	4	2,06
22	20,0	180	180	4	1,99
23	20,0	180	130	2	2,12
24	20,0	180	130	6	1,62
25	20,0	180	130	4	2,25
26	20,0	180	130	4	2,16
27	20,0	180	130	4	2,22
28	20,0	180	130	4	2,13
29	20,0	180	130	4	2,20
30	20,0	180	130	4	2,18
31	20,0	180	130	4	2,30

x₁ = umidade (%)

x₂ = temperatura (°C)

x₃ = velocidade do parafuso (rpm)

x₄ = diâmetro da matriz (mm)

$$\begin{aligned} \hat{Y}_2 = & 2,21 - 0,27 x_1 - 0,30 x_2 + 0,03 x_3 - 0,16 x_4 - 0,01 x_1^2 - \\ & - 0,18 x_2^2 - 0,03 x_3^2 - 0,06 x_4^2 - 0,10 x_1 x_2 - 0,04 x_1 x_3 + \\ & + 0,16 x_1 x_4 - 0,01 x_2 x_3 - 0,15 x_2 x_4 - 0,01 x_3 x_4 \end{aligned}$$

(Equação 3)

O modelo explica 92,04% da variação de Y_2 que é estatisticamente significativa ao nível de $p = 0,0001$ (Quadro 9), verificando-se, ainda, que todas as variáveis são significativas, com exceção da variável x_3 (velocidade do parafuso).

Fez-se, então, um reajuste no modelo, obtendo-se a Equação 4.

$$\begin{aligned} \hat{Y}'_2 = & 2,18 - 0,27 x_1 - 0,30 x_2 - 0,16 x_4 - 0,01 x_1^2 - 0,17 x_2^2 \\ & - 0,06 x_4^2 - 0,09 x_1 x_2 + 0,17 x_1 x_4 - 0,14 x_2 x_4 \end{aligned}$$

(Equação 4)

A análise de variância do modelo reajustado que aparece no Quadro 10 indica que a Equação 4 é estatisticamente significativa ao nível de $p = 0,0001$ e explica 91,2% da variação da expansão. A "falta de ajuste" não é significativa ao nível de 1% ($p = 0,014$), o que possibilita a utilização deste modelo para fins preditivos.

Na Figura 6 tem-se os diagramas de superfície de respostas correspondentes ao modelo reajustado da Equação 4, que estabelece a variação da expansão em função do teor de umidade e temperatura para os diferentes diâmetros de matriz. Observando-se a Figura 6, verifica-se que numa dada temperatura, o grau de expansão diminui com o aumento da umidade. Resultados semelhantes foram obtidos por GROSSMANN (21) quando trabalhou com amido de mandioca.

Verifica-se, ainda, que com o aumento do diâmetro da matriz, o efeito da umidade torna-se menos intenso, resultando

QUADRO 9. Análise de variância para $Y_2 = \text{Expansão } (\varnothing \text{ do produto}/\varnothing \text{ da matriz})$.

	GL	SQ	R ²	QM	F	p
Regressão						
Linear	4	3,823456	0,6213		27,31	0,0001
Quadrática	4	0,927077	0,1506		6,62	0,0033
Interação	6	0,913418	0,1484		4,35	0,0110
Regressão	14	5,663951	0,9204		11,56	0,0001
Resíduos						
Falta de ajuste	8	0,470422		0,058803	18,03	0,0012
Erro puro	6	0,019571		0,003262		
Total	14	0,489993		0,035000		
Variáveis						
x_1 (umidade)	5	1,967879		0,393576	11,25	0,0002
x_2 (temperatura)	5	3,548442		0,709688	20,28	0,0001
x_3 (vel.parafuso)	5	0,051724		0,010345	0,30	0,9074
x_4 (\varnothing matriz)	5	1,410274		0,282055	8,06	0,0009
Média das respostas		1,95		Coeficiente de variação		0,9204
Erro-padrão		0,19		R ²		0,9060

QUADRO 10. Análise de variância para $Y'_2 = \text{Expansão } (\emptyset \text{ do produto}/\emptyset \text{ da matriz})$. Modelo reajustado.

	GL	SQ	R ²	QM	F	p
Regressão						
Linear	3	3,813415	0,6197		44,58	0,0001
Quadrática	3	0,911030	0,1480		10,65	0,0003
Interação	3	0,887782	0,1443		10,38	0,0003
Regressão	9	5,612228	0,9120		21,87	0,0001
Resíduos						
Falta de ajuste	4	0,295645		0,073911	4,50	0,0137
Erro puro	15	0,246072		0,016405		
Total	19	0,541717		0,028511		
Variáveis						
x_1 (umidade)	4	1,961165		0,490291	17,20	0,0001
x_2 (temperatura)	4	3,529372		0,882343	30,95	0,0001
x_4 (\emptyset matriz)	4	1,406566		0,351641	12,33	0,0001
Média das respostas		1,95		Coeficiente de variação		0,0867
Erro-padrão		0,17		R ²		0,9120

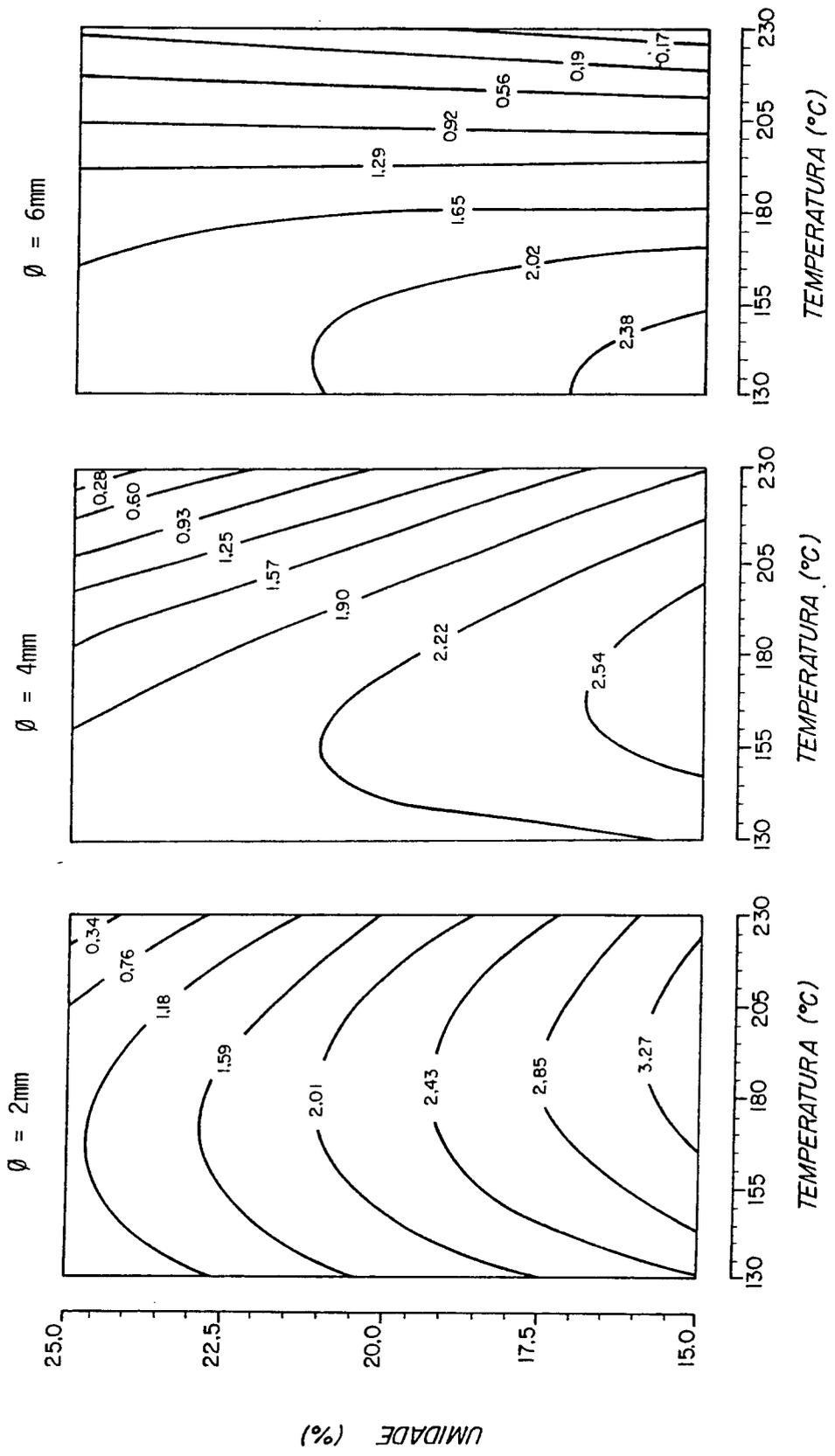


FIGURA 6. Efeito da umidade, temperatura e diâmetro da matriz na expansão do amido extrusado.

na redução do grau de expansão. Resultados semelhantes foram obtidos por GOMEZ & AGUILERRA (19) quando trabalharam com amido de milho. Observa-se, também, pela análise da Figura 6, que para matriz de diâmetro de 2mm a expansão aumenta com o aumento da temperatura até atingir um valor máximo, o que ocorre na faixa de 170° a 190°C, diminuindo a seguir. Resultados semelhantes foram obtidos por MERCIER *et alii* (33) e por GROSSMANN (21) quando trabalharam com amido de mandioca.

Verifica-se, também, que com diâmetros maiores e altas temperaturas a umidade da matéria-prima não exerce qualquer efeito no grau de expansão, sendo o mesmo influenciado somente pela temperatura. Estes efeitos são visualizados de forma tridimensional pelo diagrama de superfície de resposta apresentado na Figura 7.

É interessante destacar que a expansão de um produto extrusado é uma função complexa da interação de vários fatores, destacando-se entre eles a característica elástica do produto, o tempo que o produto permanece plástico dentro do extrusor e a intensidade e velocidade da evaporação da água.

Como a expansão é uma decorrência da evaporação da água, em virtude da descompressão que o produto sofre ao sair da matriz, quanto maior for a temperatura, maior será a evaporação e, conseqüentemente, a expansão. Contudo, em temperaturas muito elevadas a evaporação é intensa, rompendo a estrutura do produto, levando-o ao colapso.

Também no caso de se ter alto teor de umidade na matéria-prima, ocorre uma queda no grau de expansão pelo fato da água exercer uma maior lubrificação, resultando numa menor pressão na saída de produto e, conseqüentemente, diminuindo a intensidade de evaporação da água.

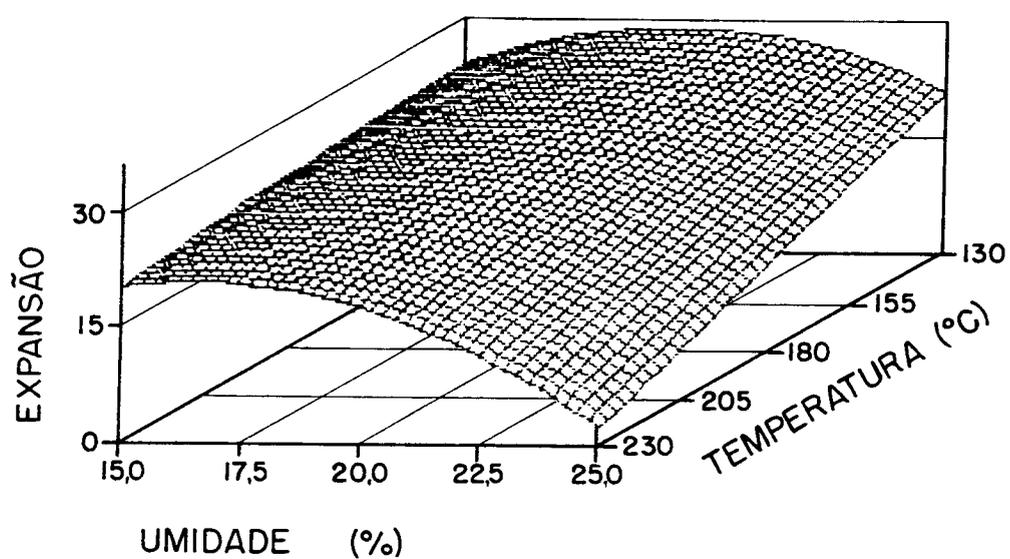


FIGURA 7. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura na expansão do amido extrusado (\emptyset matriz = 4mm).

2. Viscosidade inicial (Y_3)

A viscosidade inicial ou viscosidade a frio é uma importante propriedade do amido extrusado. Este, pelo fato de ter sofrido um certo grau de gelatinização, geralmente é caracterizado por apresentar uma determinada viscosidade à temperatura ambiente. Isto permite que os amidos pré-gelatinizados por extrusão sejam utilizados numa extensa variedade de produtos instantâneos. A extrusão é, portanto, um meio altamente eficiente disponível para o preparo destes amidos. De acordo com os dados experimentais de viscosidade inicial apresentados no Quadro 11, elaborou-se o modelo preditivo de regressão completo, obtendo-se a Equação 5.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_3 = & 381,43 + 86,67 x_1 + 49,17 x_2 + 20,00 x_3 - 0,83 x_4 + \\ & + 46,31 x_1^2 - 16,19 x_2^2 + 7,56 x_3^2 - 5,06 x_4^2 + \\ & + 126,25 x_1 x_2 + 16,25 x_1 x_3 - 75,00 x_1 x_4 - 22,50 x_2 x_3 - \\ & - 106,25 x_2 x_4 + 48,75 x_3 x_4 \end{aligned} \quad (\text{Equação 5})$$

A ANOVA deste modelo que aparece no Quadro 12, mostra que o modelo explica 68,59% da variação de Y_3 e os fatores que mais afetaram a viscosidade inicial foram a umidade da matéria-prima ($p = 0,0086$) e a temperatura ($p = 0,0158$).

Resultados semelhantes foram obtidos por OWUSU-ANSAH *et alii* (40) em experimentos com amido de milho. Também ANDERSON *et alii* (4) trabalhando com grits de sorgo obtiveram curvas amilográficas onde constataram que a viscosidade inicial era dependente, principalmente, das variáveis umidade e temperatura de extrusão. Portanto, a maioria dos autores que trabalharam com extrusão de amido ou de farinhas amiláceas chegaram

QUADRO 11. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade inicial.

Experimento	Variáveis da extrusão				Viscosidade inicial (UA)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	365
02	22,5	155	105	3	350
03	17,5	205	105	3	280
04	22,5	205	105	3	290
05	17,5	155	155	3	240
06	22,5	155	155	3	190
07	17,5	205	155	3	670
08	22,5	205	155	3	710
09	17,5	155	105	5	180
10	22,5	155	105	5	220
11	17,5	205	105	5	310
12	22,5	205	105	5	340
13	17,5	155	155	5	220
14	22,5	155	155	5	165
15	17,5	205	155	5	280
16	22,5	205	155	5	690
17	15,0	180	130	4	300
18	25,0	180	130	4	420
19	20,0	130	130	4	180
20	20,0	230	130	4	100
21	20,0	180	80	4	185
22	20,0	180	180	4	135
23	20,0	180	130	2	160
24	20,0	180	130	6	160
25	20,0	180	130	4	110
26	20,0	180	130	4	210
27	20,0	180	130	4	190
28	20,0	180	130	4	290
29	20,0	180	130	4	170
30	20,0	180	130	4	140
31	20,0	180	130	4	210

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

à conclusão que a principal variável responsável pela viscosidade inicial era a umidade da matéria-prima (4, 13, 21, 40).

Embora o modelo completo tenha apresentado uma "falta de ajuste", ele foi utilizado no sentido de estabelecer a tendência da resposta, sendo empregado para se traçar as curvas que permitem visualizar o efeito da umidade da matéria-prima e da temperatura de extrusão na viscosidade inicial dos produtos extrusados (Figuras 8 e 9).

Observa-se pela Figura 8 que para umidades superiores a 20% à medida que se aumenta a temperatura ocorre um aumento na viscosidade inicial, ocorrendo o inverso para umidades inferiores a 20%, isto é, à medida que se aumenta a temperatura tem-se um decréscimo na viscosidade inicial.

Para temperaturas superiores a 165°C, à medida que se aumenta a umidade da matéria-prima, tem-se um aumento da viscosidade inicial, ocorrendo o inverso para temperaturas inferiores a 145°C, isto é, à medida que se aumenta a umidade tem-se um decréscimo na viscosidade inicial.

Verifica-se ainda pela Figura 8, que os valores máximos de viscosidade inicial são obtidos quando a extrusão é feita com alto teor de umidade da matéria-prima e alta temperatura. Isto ocorre porque, com altas umidades a degradação mecânica é menor devido ao efeito lubrificante da água, resultando num menor cisalhamento mecânico no amido, obtendo-se assim, uma viscosidade mais alta. Portanto, quanto maior for o grau de gelatinização, maior será a absorção de água, causando um maior intumescimento do grânulo e por conseqüência, uma maior viscosidade inicial (15).

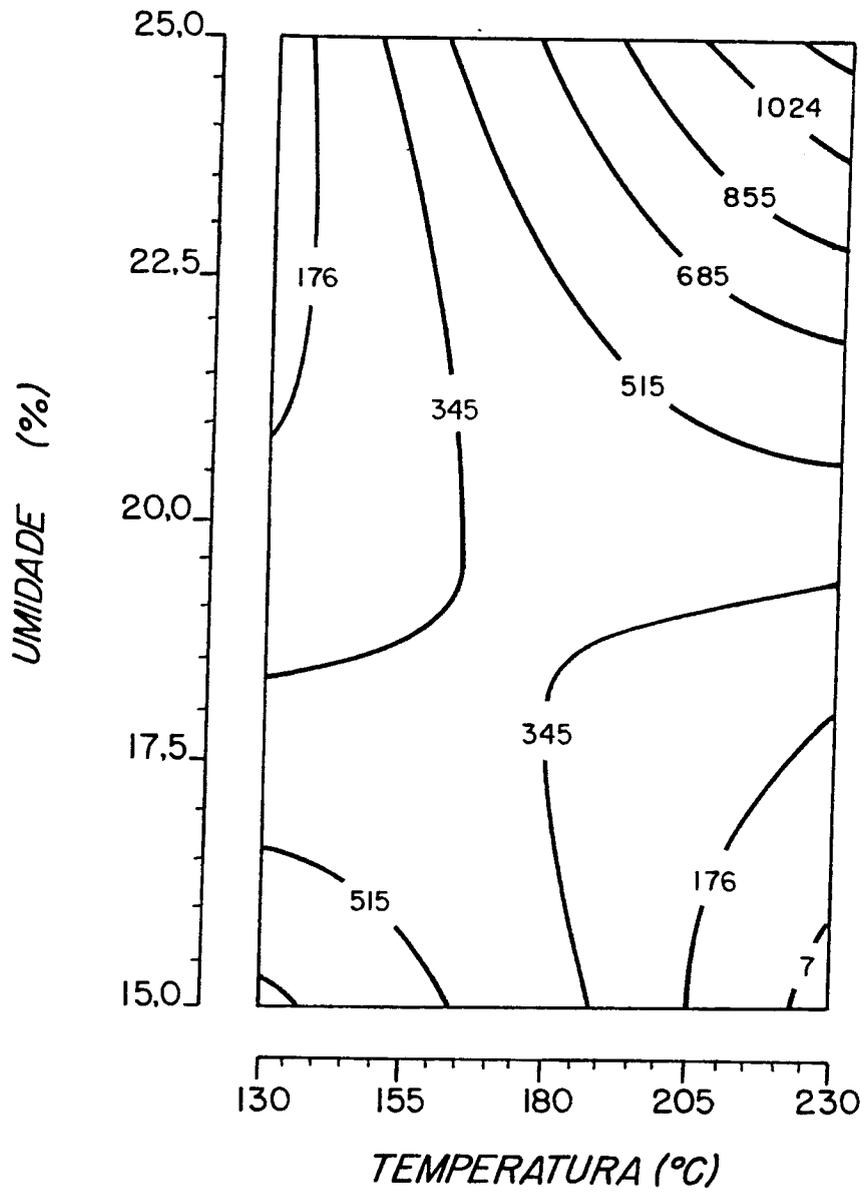


FIGURA 8. Efeito da umidade e temperatura na viscosidade inicial do amido extrusado (vel. parafuso = 130 rpm e \emptyset matriz = 4mm).

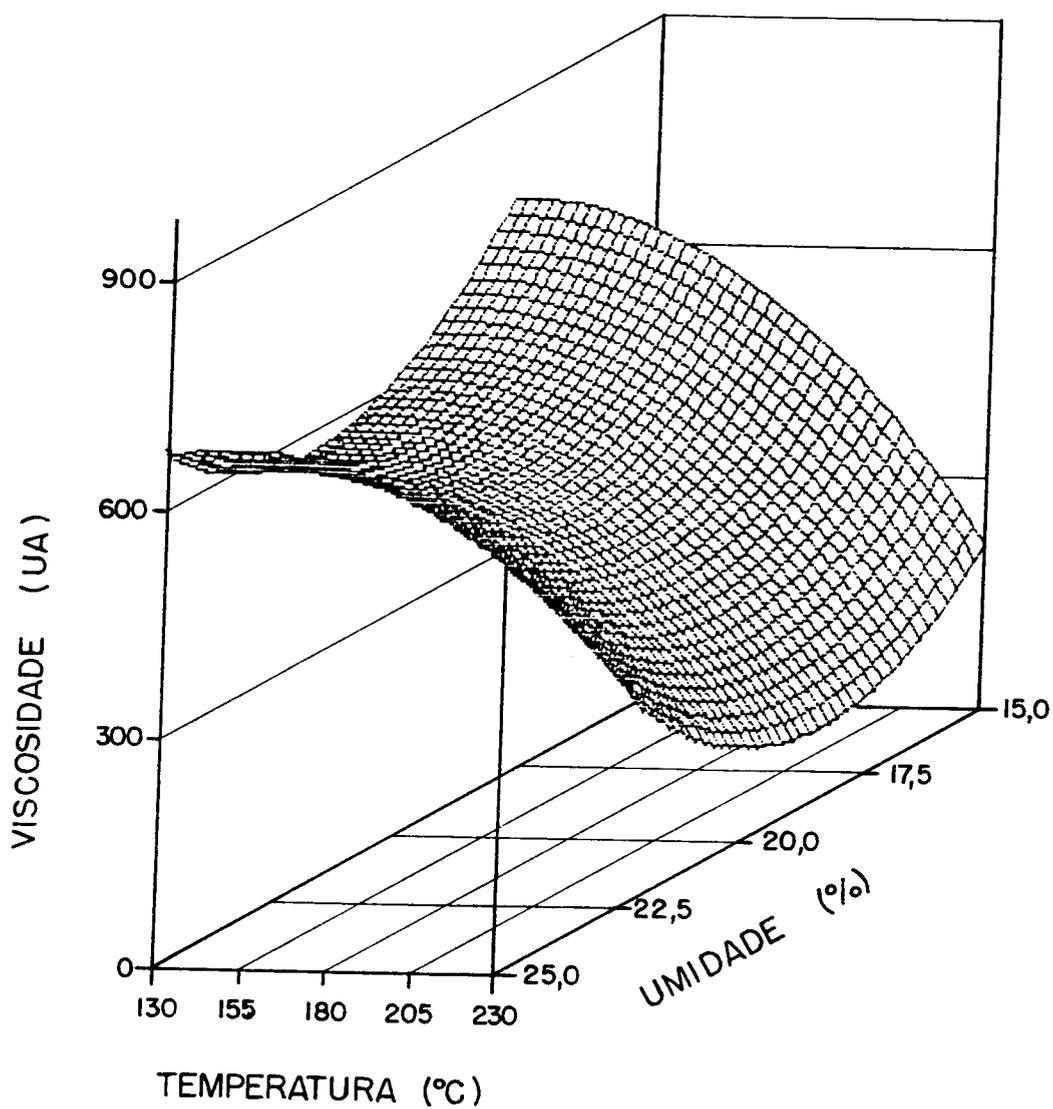


FIGURA 9. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura na viscosidade inicial do amido extrudado (vel. parafuso = 130 rpm e \emptyset matriz = 4mm).

Por outro lado, os valores mínimos de viscosidade foram obtidos com baixo teor de umidade da matéria-prima e com alta temperatura. Isto ocorre porque à medida que se diminui o teor de umidade da matéria-prima, aumenta o nível de degradação do amido em consequência do intenso atrito mecânico. Também, no presente caso, tem-se o efeito aditivo da degradação térmica. Ainda, se além da gelatinização ocorrer também a dextrinização do amido, a viscosidade irá diminuir, porque a capacidade de retenção de água apresenta uma relação inversa com o grau de dextrinização do amido (19).

3. Viscosidade a quente (Y_4)

A viscosidade a quente é uma propriedade que está relacionada com o nível de degradação sofrida pelo grânulo de amido. Assim, quanto maior for a degradação, menor será a viscosidade a quente e vice-versa.

Esta propriedade é importante quando se emprega amidos onde se deseja que estes apresentem alta viscosidade a quente, sendo, portanto, usados como agentes espessantes no cozimento, como é o caso de sopas ou vegetais enlatados, onde quanto maior a viscosidade a quente, menor será a concentração requerida. Por outro lado, há casos em que se deseja baixa viscosidade a quente. Isto ocorre principalmente com produtos que durante o processamento, em especial após o tratamento térmico, são transportados por bombeamento.

Empregando-se os dados experimentais apresentados no Quadro 13, estabeleceu-se o modelo de regressão preditivo completo, obtendo-se a Equação 6.

QUADRO 13. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade a 95°C.

Experimento	Variáveis da extrusão				Viscosidade a 95°C (UA)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	190
02	22,5	155	105	3	115
03	17,5	205	105	3	195
04	22,5	205	105	3	150
05	17,5	155	155	3	180
06	22,5	155	155	3	180
07	17,5	205	155	3	80
08	22,5	205	155	3	140
09	17,5	155	105	5	210
10	22,5	155	105	5	220
11	17,5	205	105	5	180
12	22,5	205	105	5	180
13	17,5	155	155	5	215
14	22,5	155	155	5	220
15	17,5	205	155	5	160
16	22,5	205	155	5	140
17	15,0	180	130	4	160
18	25,0	180	130	4	175
19	20,0	130	130	4	240
20	20,0	230	130	4	80
21	20,0	180	80	4	195
22	20,0	180	180	4	140
23	20,0	180	130	2	160
24	20,0	180	130	6	180
25	20,0	180	130	4	140
26	20,0	180	130	4	185
27	20,0	180	130	4	175
28	20,0	180	130	4	170
29	20,0	180	130	4	200
30	20,0	180	130	4	185
31	20,0	180	130	4	190

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

$$\begin{aligned}
 \hat{Y}_4 = & 178,33 - 1,19 x_1 - 25,77 x_2 - 9,81 x_3 - 14,23 x_4 - \\
 & - 1,79 x_1^2 - 3,66 x_2^2 - 1,78 x_3^2 - 1,16 x_4^2 + \\
 & + 3,04 x_1 x_2 + 9,71 x_1 x_3 + 3,04 x_1 x_4 - 15,28 x_2 x_3 - \\
 & - 6,96 x_2 x_4 + 0,96 x_3 x_4
 \end{aligned}
 \tag{Equação 6}$$

A análise de variância que aparece no Quadro 14, mostra que este modelo explica 73,30% da variação da viscosidade a quente e apresenta uma falta de ajuste não significativo ($p = 0,1752$), podendo ser considerado um modelo satisfatório. Ainda, de acordo com a ANOVA deste modelo, verifica-se que apenas a temperatura é variável significativa ($p = 0,0128$) e em relação a esta, só os efeitos lineares ($p = 0,0033$) devem ser considerados (Quadro 14).

Com base nos resultados do Quadro 14, o modelo foi empregado para visualizar o efeito da temperatura sobre a viscosidade a quente, sendo que as variáveis velocidade do parafuso (x_3) e diâmetro da matriz (x_4) foram mantidas ao nível do ponto central, isto é, 130 rpm e 4mm, respectivamente. Portanto, o modelo completo foi utilizado para estabelecer a tendência da viscosidade a quente, obtendo-se as Figuras 10 e 11.

Verifica-se pela Figura 10 que o aumento da temperatura ocasiona uma queda da viscosidade a quente. Observa-se, também, que em temperaturas superiores a 160°C a umidade da matéria-prima praticamente não exerce qualquer influência na viscosidade a quente, sendo a mesma influenciada somente pela temperatura. Estas observações são visualizadas no diagrama de superfície de resposta tridimensional apresentado na Figura 11 e coincidem com aquelas feitas por ANDERSON *et alii* (3), quando aqueles autores trabalharam com grits de milho.

QUADRO 14. Análise de variância para Y_4 = viscosidade a quente (UA).

	GL	SQ	R^2	QM	F	p
Regressão						
Linear	4	22933,18	0,5669		6,90	0,0033
Quadrática	4	433,65	0,0107		0,13	0,9685
Interação	6	6285,66	0,1554		1,26	0,3393
Regressão	14	29652,50	0,7330		2,55	0,0503
Resíduos						
Falta de ajuste	8	8566,85		1070,85	2,40	0,1752
Erro puro	5	2233,33		446,66		
Total	13	10800,18		830,78		
Variáveis						
x_1 (umidade)	5	1497,96		299,59	0,36	0,8664
x_2 (temperatura)	5	18901,26		3780,25	4,55	0,0128
x_3 (vel.parafuso)	5	7603,98		1520,79	1,83	0,1759
x_4 (\emptyset matriz)	5	4746,39		949,28	1,14	0,3869
Média das respostas		170,89	Coeficiente de variação			0,1686
Erro-padrão		28,82	R^2			0,7330

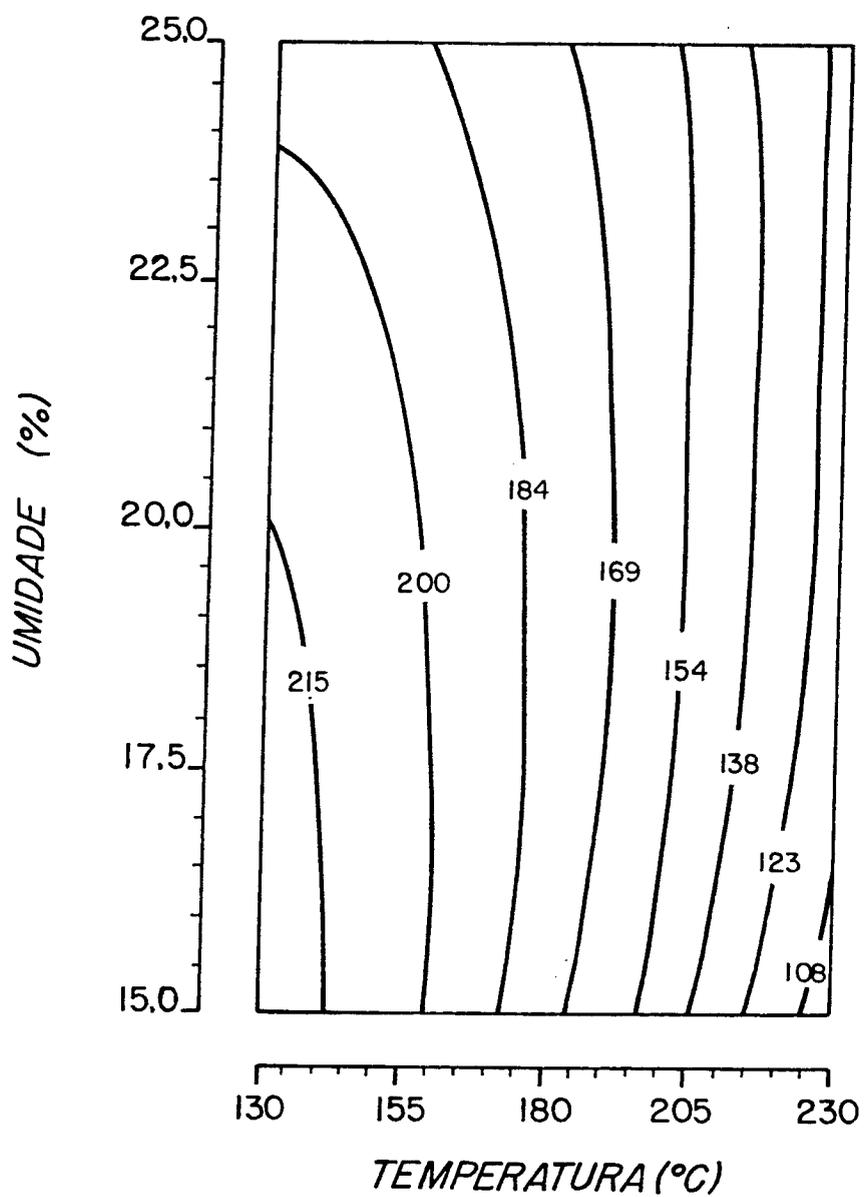


FIGURA 10. Efeito da umidade e temperatura na viscosidade a quente do amido extrusado (vel. parafuso = 130 rpm e \emptyset matriz = 4mm).

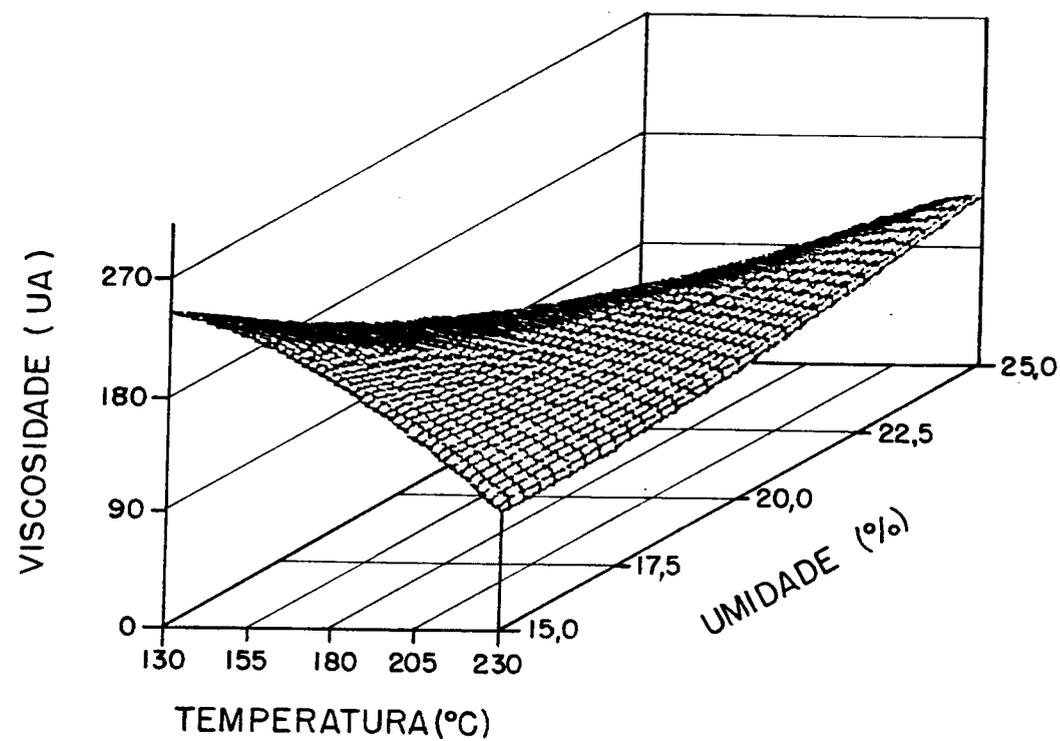


FIGURA 11. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura na viscosidade a quente do amido extrusado (vel. parafuso = 130 rpm e \varnothing matriz = 4mm).

O decréscimo da viscosidade a quente dos produtos extrusados a altas temperaturas é justificado pela perda da integridade do grânulo, resultando em uma maior dextrinização.

Assim, quando os grânulos de amido sofrem gelatinização térmica e mecânica, ocorre a quebra da estrutura dos mesmos, os quais perdem a capacidade de inchar quando aquecidos em água e, conseqüentemente, apresentam baixa viscosidade a 95°C.

4. Viscosidade após 20 minutos a 95°C (Y_5)

A viscosidade após 20 minutos a 95°C é um parâmetro que mede a resistência do grânulo ao colapso resultante do atrito mecânico. Durante este período, os grânulos intumescidos são submetidos a uma força de cisalhamento contínua. O fato dos grânulos de amido serem rompidos com maior ou menor facilidade é uma característica intrínseca do tipo de amido. Entretanto, certos fatores externos podem interferir neste parâmetro, tal como é a extrusão, onde os diferentes tratamentos podem ter efeitos de maior ou menor intensidade.

De acordo com os dados experimentais apresentados no Quadro 15, foi estabelecido o modelo de regressão completo, obtendo-se a Equação 7.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_5 = & 161,67 - 1,31 x_1 - 25,48 x_2 - 13,27 x_3 + 14,52 x_4 - \\ & - 3,21 x_1^2 - 3,21 x_2^2 - 3,21 x_3^2 - 1,96 x_4^2 - \\ & - 0,54 x_1 x_2 + 4,90 x_1 x_3 + 1,96 x_1 x_4 - 18,85 x_2 x_3 - \\ & - 10,54 x_2 x_4 + 2,40 x_3 x_4 \end{aligned} \quad \text{(Equação 7)}$$

O Quadro 16 mostra o efeito das variáveis da extrusão sobre a viscosidade após 20 minutos a 95°C. A análise estatística do modelo preditivo explica 76,64% da variação de Y_5 e

QUADRO 15. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade após 20 minutos a 95°C.

Experimento	Variáveis da extrusão				Viscosidade após 20 min a 95°C (UA)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	145
02	22,5	155	105	3	100
03	17,5	205	105	3	180
04	22,5	205	105	3	150
05	17,5	155	155	3	160
06	22,5	155	155	3	160
07	17,5	205	155	3	75
08	22,5	205	155	3	90
09	17,5	155	105	5	200
10	22,5	155	105	5	200
11	17,5	205	105	5	160
12	22,5	205	105	5	160
13	17,5	155	155	5	200
14	22,5	155	155	5	205
15	17,5	205	155	5	140
16	22,5	205	155	5	105
17	15,0	180	130	4	130
18	25,0	180	130	4	160
19	20,0	130	130	4	220
20	20,0	230	130	4	70
21	20,0	180	80	4	180
22	20,0	180	180	4	110
23	20,0	180	130	2	140
24	20,0	180	130	6	160
25	20,0	180	130	4	120
26	20,0	180	130	4	160
27	20,0	180	130	4	160
28	20,0	180	130	4	150
29	20,0	180	130	4	190
30	20,0	180	130	4	180
31	20,0	180	130	4	170

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

QUADRO 16. Análise de variância para Y_5 = viscosidade após 20 minutos a 95°C (UA). Modelo completo.

	GL	SQ	R^2	QM	F	p
Regressão						
Linear	4	25571,63	0,5835		8,12	0,0016
Quadrática	4	550,72	0,0126		0,17	0,9474
Interação	6	7463,11	0,1703		1,58	0,2299
Regressão	14	33585,46	0,7664		3,05	0,0262
Resíduos						
Falta de ajuste	8	7155,31		894,41	1,45	0,3545
Erro puro	5	3083,33		616,67		
Total	13	10238,64		787,59		
Variáveis						
x_1 (umidade)	5	692,99		138,60	0,18	0,9669
x_2 (temperatura)	5	21681,64		4336,33	5,51	0,0061
x_3 (vel.parafuso)	5	10657,52		2131,50	2,71	0,0688
x_4 (\emptyset matriz)	5	5307,37		1061,47	1,35	0,3054
Média das respostas		152,32				0,1842
Erro-padrão		28,06	R^2			0,7664

apenas os efeitos lineares são significantes ($p = 0,0016$) e, entre estes, a temperatura é a variável de maior significância ($p = 0,0061$), vindo a seguir a velocidade do parafuso ($p = 0,0688$).

Assim sendo, a análise de variância foi recalculada dando origem ao modelo reajustado, obtendo-se a Equação 8.

$$\begin{aligned} \hat{Y}'_5 = & 157,65 - 27,81 x_2 - 12,50 x_3 - 2,13 x_2^2 - 2,13 x_3^2 - \\ & - 20,00 x_2 x_3 \end{aligned} \quad (\text{Equação 8})$$

Os dados do Quadro 17 indicam que há um bom ajuste entre o modelo reajustado e os dados experimentais devido à significância da regressão e não significância da falta de ajuste ($p = 0,5687$). Portanto, o modelo reajustado ajusta-se aos dados experimentais, podendo ser utilizado para fins preditivos e sendo empregado para obter os diagramas de superfície de resposta bidimensional (Figura 12) e tridimensional (Figura 13).

Através da Figura 12 é possível estudar o efeito da temperatura e da velocidade do parafuso na viscosidade após 20 minutos a 95°C. Assim, observa-se na Figura 12 que para temperaturas superiores a 180°C, ocorre uma queda da viscosidade à medida que se aumenta a velocidade do parafuso, ocorrendo o inverso para temperaturas inferiores a 150°C. Verifica-se, também, que para uma determinada velocidade do parafuso à medida que se aumenta a temperatura ocorre uma queda da viscosidade, fato este que se torna mais acentuado no caso de altas velocidades do parafuso.

Os maiores valores de viscosidade após 20 minutos a 95°C são obtidos a baixas temperaturas e altas velocidades do

QUADRO 17. Análise de variância para Y'_5 = viscosidade após 20 minutos a 95°C (UA). Modelo reajustado.

	GL	SQ	R^2	QM	F	p
Regressão						
Linear	2	21514,48	0,4909		14,30	0,0001
Quadrática	2	230,50	0,0053		0,15	0,8589
Interação	1	5527,27	0,1261		7,35	0,0128
Regressão	5	27272,26	0,6223		7,25	0,0004
Resíduos						
Falta de ajuste	3	1628,52		542,84	0,69	0,5687
Erro puro	19	14923,33		785,44		
Total	22	16551,85		752,36		
Variáveis						
x_2 (temperatura)	3	22610,00		7536,67	10,02	0,0002
x_3 (vel.parafuso)	3	10165,98		3388,66	4,50	0,0131
Média das respostas		152,32	Coeficiente de variação			0,1800
Erro-padrão		27,43	R^2			0,6223

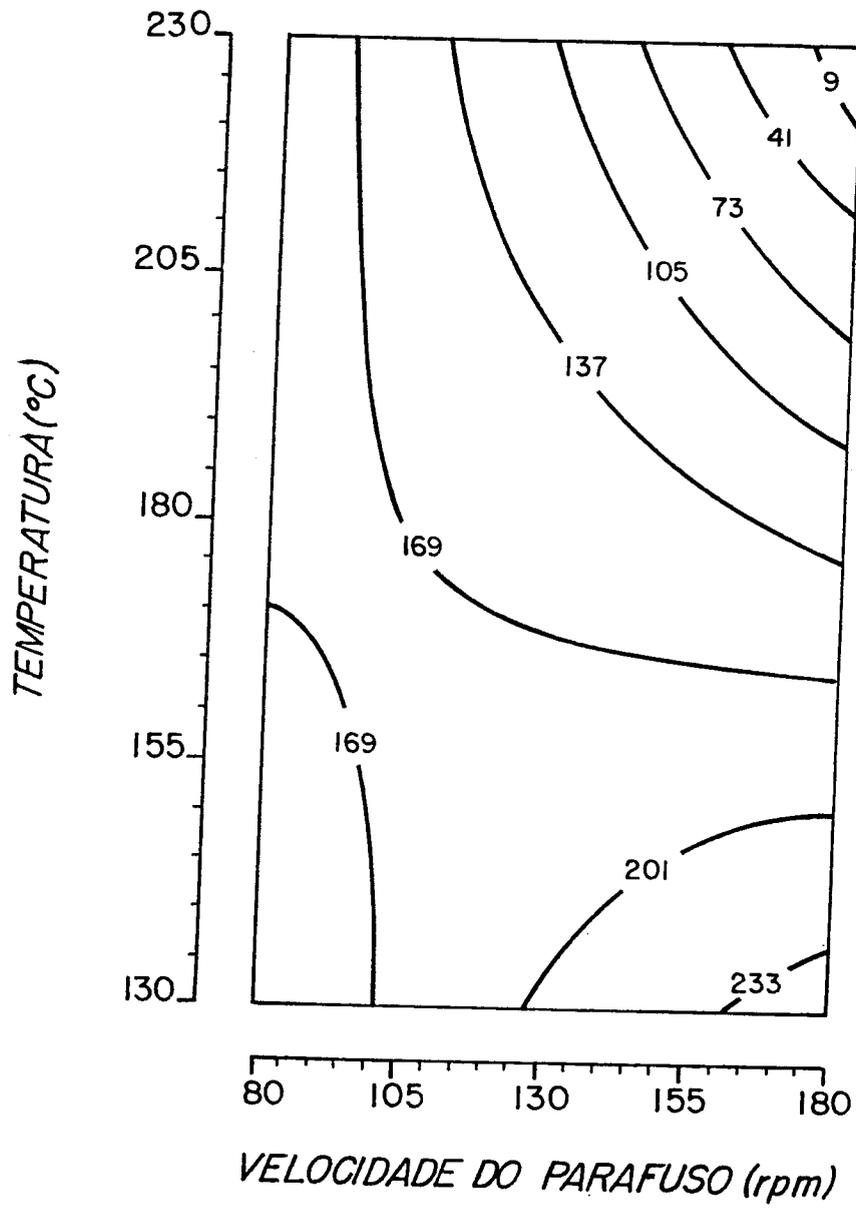


FIGURA 12. Efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade após 20 minutos a 95°C do amido extrusado.

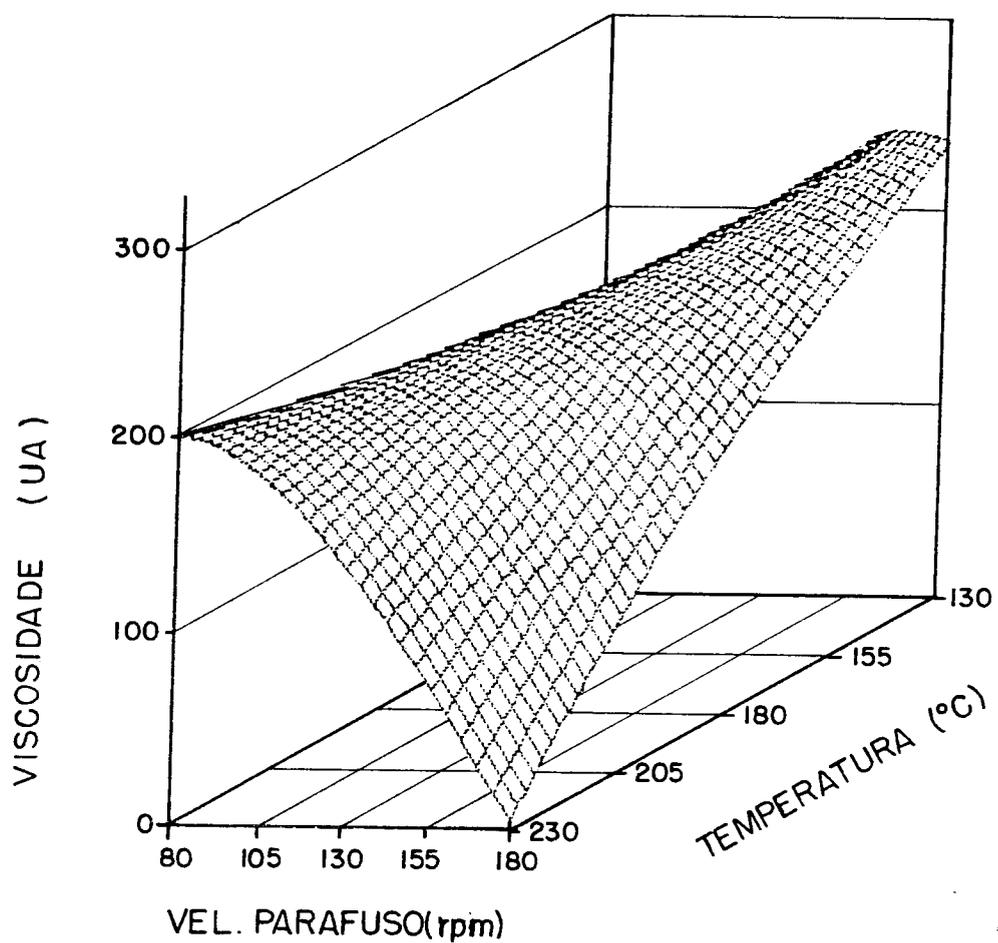


FIGURA 13. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade após 20 minutos a 95°C do amido extrusado.

parafuso. Isto ocorre porque, dentro do extrusor, a massa plástica resultante do produto fundido a temperaturas mais baixas apresenta maior viscosidade. Esta maior viscosidade impede uma maior exposição dos grânulos de amido à ação de cisalhamento, mesmo no caso de altas velocidades do parafuso. Este fato impede uma maior quebra dos seus grânulos (44).

Por outro lado, os menores valores de viscosidade são obtidos a altas temperaturas e altas velocidades do parafuso. Isto ocorre porque a altas temperaturas a massa plástica torna-se menos viscosa permitindo que as moléculas tornem-se mais suscetíveis à ação de cisalhamento decorrente das altas velocidades do parafuso. Desta forma, tem-se uma maior ação térmica e mecânica, resultando numa maior degradação do amido e, conseqüentemente, obtendo-se menores valores de viscosidade após 20 minutos a 95°C.

5. Viscosidade final (γ_6)

A viscosidade final, ou viscosidade a 50°C após o cozimento, é uma medida da retrogradação do amido e, em produtos extrusados, ela depende das modificações que ocorrem nas estruturas dos grânulos e das moléculas. Esta é uma importante propriedade, principalmente em produtos como pudins para sobremesa e recheios de torta, onde se deseja que estes amidos possuam alta viscosidade a frio e que sejam estáveis ao armazenamento, principalmente quanto à sinerese, quando conservados por refrigeração.

De acordo com os dados experimentais apresentados no Quadro 18, foi estabelecido o modelo preditivo de regressão completo, obtendo-se a Equação 9.

QUADRO 18. Influência das variáveis do processo de extrusão na viscosidade final.

Experimento	Variáveis da extrusão				Viscosidade final (UA)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	205
02	22,5	155	105	3	180
03	17,5	205	105	3	245
04	22,5	205	105	3	230
05	17,5	155	155	3	190
06	22,5	155	155	3	240
07	17,5	205	155	3	105
08	22,5	205	155	3	90
09	17,5	155	105	5	245
10	22,5	155	105	5	250
11	17,5	205	105	5	180
12	22,5	205	105	5	170
13	17,5	155	155	5	220
14	22,5	155	155	5	250
15	17,5	205	155	5	145
16	22,5	205	155	5	105
17	15,0	180	130	4	215
18	25,0	180	130	4	240
19	20,0	130	130	4	270
20	20,0	230	130	4	65
21	20,0	180	80	4	200
22	20,0	180	180	4	135
23	20,0	180	130	2	170
24	20,0	180	130	6	195
25	20,0	180	130	4	200
26	20,0	180	130	4	180
27	20,0	180	130	4	190
28	20,0	180	130	4	180
29	20,0	180	130	4	215
30	20,0	180	130	4	200
31	20,0	180	130	4	210

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

$$\begin{aligned} \hat{Y}_6 = & 197,50 + 1,19 x_1 - 38,39 x_2 - 20,29 x_3 + 5,36 x_4 + \\ & + 8,24 x_1^2 - 6,76 x_2^2 - 6,76 x_3^2 - 3,00 x_4^2 - 8,66 x_1 x_2 + \\ & + 4,18 x_1 x_3 - 0,53 x_1 x_4 - 25,19 x_2 x_3 - 13,66 x_2 x_4 + \\ & + 6,68 x_3 x_4 \end{aligned} \quad (\text{Equação 9})$$

O efeito das variáveis de extrusão sobre a viscosidade final é visto na análise estatística do modelo preditivo que é apresentado no Quadro 19.

A partir da ANOVA deste modelo, eliminou-se os termos não significativos, dando origem ao modelo reajustado, obtendo-se a Equação 10.

$$\begin{aligned} \hat{Y}'_6 = & 204,13 - 41,17 x_2 - 19,14 x_3 - 6,89 x_2^2 - 6,89 x_3^2 - \\ & - 26,91 x_2 x_3 \end{aligned} \quad (\text{Equação 10})$$

Assim, de acordo com a ANOVA deste modelo (Quadro 20), verifica-se que o modelo é estatisticamente significativo ao nível de $p = 0,0001$ e explica 79,80% da variação da viscosidade final, e a falta de ajuste não é significativa ($p = 0,4056$). Portanto, o modelo ajusta-se adequadamente aos dados experimentais, podendo ser utilizado para fins preditivos.

Observa-se, ainda, que os fatores que mais afetaram a viscosidade final foram a temperatura ($p = 0,0001$) e a velocidade do parafuso, além da interação entre a temperatura e a velocidade do parafuso.

O diagrama de superfície de resposta correspondente ao modelo reajustado (\hat{Y}'_6) aparece nas Figuras 14 e 15, através das quais é possível analisar os efeitos da temperatura e da velocidade do parafuso sobre a viscosidade final. Verifica-se

QUADRO 19. Análise de variância para Y_6 = viscosidade final (UA).

	GL	SQ	R^2	QM	F	p
Regressão						
Linear	4	47998,05	0,6362		17,05	0,0001
Quadrática	4	4974,89	0,0659		1,77	0,1956
Interação	6	13324,26	0,1766		3,16	0,0390
Regressão	14	66297,21	0,8787		6,73	0,0007
Resíduos						
Falta de ajuste	8	8061,72		1007,71	4,63	0,0540
Erro puro	5	1087,50		217,50		
Total	13	9149,22		703,79		
Variáveis						
x_1 (umidade)	5	3125,86		625,17	0,89	0,5164
x_2 (temperatura)	5	48430,77		9686,15	13,76	0,0001
x_3 (vel.parafuso)	5	22183,61		4436,72	6,30	0,0035
x_4 (\emptyset matriz)	5	3186,85		637,37	0,91	0,5065
Média das respostas		190,36	Coeficiente de variação			0,1394
Erro-padrão		26,53	R^2			0,8787

QUADRO 20. Análise de variância para Y'_6 = viscosidade final (UA). Modelo reajustado.

	GL	SQ	R ²	QM	F	p
Regressão						
Linear	2	47786,59	0,6334		34,49	0,0001
Quadrática	2	2413,00	0,0320		1,74	0,1986
Interação	1	10004,84	0,1326		14,44	0,0010
Regressão	5	60204,43	0,7980		17,38	0,0001
Resíduos						
Falta de ajuste	3	2115,33		705,11	1,02	0,4056
Erro puro	19	13126,67		690,88		
Total	22	15241,99		692,82		
Variáveis						
x_2 (temperatura)	3	48653,44		16217,81	23,41	0,0001
x_3 (vel.parafuso)	3	21605,48		7201,83	10,39	0,0002
Média das respostas		190,36	Coeficiente de variação			0,1382
Erro-padrão		26,32	R ²			0,7980

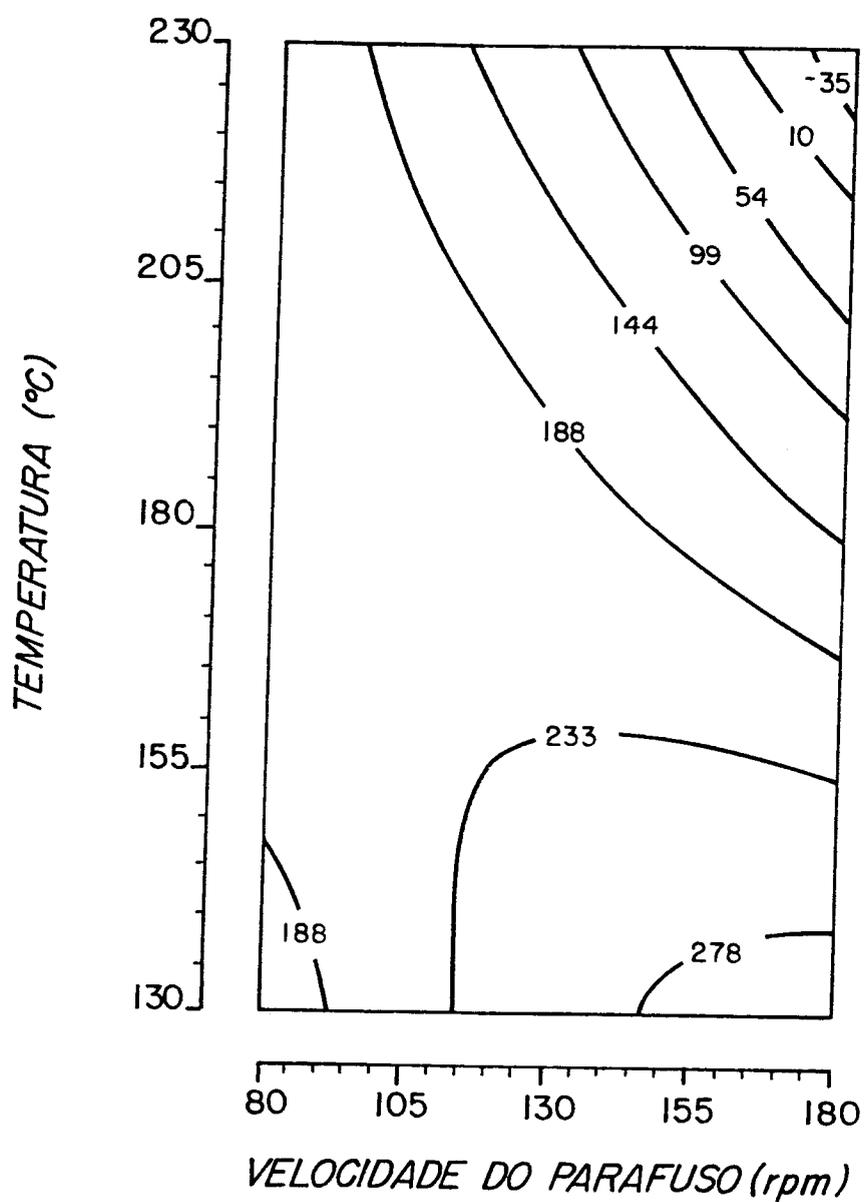


FIGURA 14. Efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade final do amido extrusado.

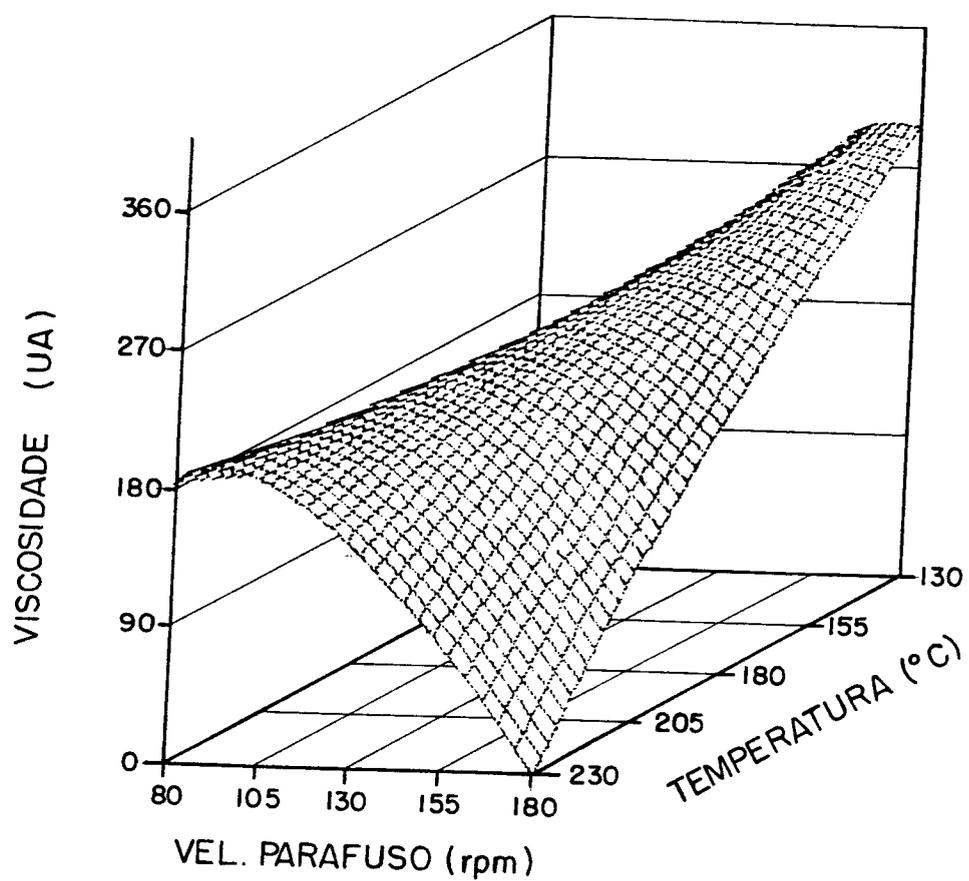


FIGURA 15. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e velocidade do parafuso na viscosidade final do amido extrusado.

pela Figura 14 que com baixas velocidades do parafuso, a temperatura praticamente não tem influência na viscosidade final. Observa-se, também, que para temperaturas superiores a 170°C, ocorre uma redução na viscosidade final à medida que se aumenta a velocidade do parafuso. Por outro lado, para temperaturas inferiores a 155°C, observa-se um aumento na viscosidade final com o aumento da velocidade do parafuso. Assim, os valores mais altos são obtidos a baixas temperaturas e altas velocidades do parafuso. Isto ocorre porque com baixas temperaturas o efeito da degradação térmica é menor e a viscosidade do produto no interior do extrusor é maior. Esta maior viscosidade do produto no interior do extrusor gera uma ação lubrificante, reduzindo a ação de cisalhamento resultante da alta velocidade do parafuso e causando uma menor quebra do grânulo, mostrando, assim, uma maior capacidade de retrogradação.

Por outro lado, os menores valores de viscosidade final são obtidos a altas temperaturas e altas velocidades do parafuso. Sob estas condições teve-se uma acentuada quebra dos grânulos de amido com rompimento de suas estruturas e redução do tamanho de suas moléculas a uma dimensão tal que causaram a perda da retrogradação das mesmas, diminuindo a viscosidade final.

Esta conclusão é semelhante àquela apresentada por EL-DASH (15) onde altas temperaturas de extrusão em combinação com altas velocidades do parafuso produziram extrudados com baixo grau de retrogradação. Observações semelhantes a estas foram apresentadas por MERCIER *et alii* (34) e ANDERSON *et alii* (4), quando trabalharam com grits de milho e sorgo, respectivamente.

6. Índice de Solubilidade em Água (Y_7)

O índice de solubilidade em água (ISA) é um parâmetro que reflete a degradação total sofrida pelo grânulo de amido, ou seja, a somatória dos efeitos da gelatinização e da dextrinização. De acordo com OLKKU *et alii* (39), o ISA aumenta com o aumento da "severidade" do tratamento.

Com base nos dados experimentais apresentados no Quadro 21, foi estabelecido o modelo de regressão completo obtendo-se a Equação 11.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_7 = & 45,31 - 1,60 x_1 + 9,95 x_2 + 0,22 x_3 + 4,46 x_4 - \\ & - 0,46 x_1^2 + 0,95 x_2^2 + 0,96 x_3^2 - 1,43 x_4^2 - 2,84 x_1 x_2 - \\ & - 1,60 x_1 x_3 - 1,05 x_1 x_4 + 0,60 x_2 x_3 - 0,38 x_2 x_4 + \\ & + 0,97 x_3 x_4 \end{aligned} \quad (\text{Equação 11})$$

A análise de variância (Quadro 22) indicou que a equação é estatisticamente significativa ao nível de $p = 0,0001$ e o modelo explica 92,83% da variação de Y_7 e desde que o desvio da regressão (falta de ajustamento) não é significativo ($p = 0,33$), ele poderia ser considerado como um modelo satisfatório.

Ainda de acordo com a ANOVA, verificam-se que as variáveis x_1 (umidade), x_2 (temperatura) e x_4 (diâmetro da matriz) são significativas ao nível de 5% e que apenas os efeitos lineares são significativos ($p = 0,0001$). Assim, fez-se um reajuste no modelo, obtendo-se a Equação 12,

$$\begin{aligned} \hat{Y}'_7 = & 46,27 - 1,52 x_1 + 10,04 x_2 + 4,54 x_4 - 0,58 x_1^2 + \\ & + 0,83 x_2^2 - 1,55 x_4^2 - 2,96 x_1 x_2 - 1,17 x_1 x_4 - \\ & - 0,50 x_2 x_4 \end{aligned} \quad (\text{Equação 12})$$

onde os termos lineares x_1 (umidade), x_2 (temperatura) e x_4

QUADRO 21. Influência das variáveis do processo de extrusão no índice de solubilidade em água.

Experimento	Variáveis da extrusão				ISA (%)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	27,98
02	22,5	155	105	3	34,25
03	17,5	205	105	3	48,64
04	22,5	205	105	3	47,63
05	17,5	155	155	3	28,49
06	22,5	155	155	3	25,38
07	17,5	205	155	3	56,02
08	22,5	205	155	3	47,13
09	17,5	155	105	5	34,93
10	22,5	155	105	5	41,15
11	17,5	205	105	5	65,64
12	22,5	205	105	5	51,82
13	17,5	155	155	5	43,86
14	22,5	155	155	5	42,05
15	17,5	205	155	5	67,91
16	22,5	205	155	5	53,75
17	15,0	180	130	4	46,59
18	25,0	180	130	4	43,53
19	20,0	130	130	4	30,58
20	20,0	230	130	4	69,83
21	20,0	180	80	4	52,05
22	20,0	180	180	4	48,45
23	20,0	180	130	2	35,30
24	20,0	180	130	6	46,06
25	20,0	180	130	4	47,81
26	20,0	180	130	4	50,31
27	20,0	180	130	4	44,73
28	20,0	180	130	4	45,49
29	20,0	180	130	4	46,63
30	20,0	180	130	4	40,86
31	20,0	180	130	4	41,33

ISA = Índice de Solubilidade em Água

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

(diâmetro da matriz) continuam sendo significativos ($p = 0,0001$), o mesmo acontecendo com a regressão ($p = 0,0001$), conforme aparece no Quadro 23.

A adequabilidade do modelo reajustado é dada pelo coeficiente de determinação múltipla $R^2 = 89,7\%$ e pela não significância da falta de ajustamento do resíduo ($p = 0,38$), portanto, o modelo ajusta-se adequadamente aos dados experimentais, podendo ser utilizado para fins preditivos.

Conclui-se pelos dados do Quadro 23, que as variáveis que mais influenciaram o ISA foram temperatura, diâmetro da matriz e umidade da matéria-prima.

A Figura 16 apresenta os diagramas de superfície de resposta correspondentes ao modelo reajustado (Y'_7), que estabelecem a variação do ISA em função do teor de umidade e temperatura, para os diferentes diâmetros da matriz. O efeito tridimensional da umidade e temperatura empregando-se matriz de 4mm é visualizado na Figura 17.

Verifica-se pela Figura 16 que com o aumento da temperatura ocorre um aumento do ISA. Observa-se, também, que a baixas temperaturas, à medida que se aumenta a umidade ocorre um aumento do ISA. Por outro lado, a altas temperaturas tem-se um efeito contrário, isto é, aumentos no teor de umidade resultam na redução do ISA. De modo geral, os valores mais altos de ISA são obtidos quando se procede a extrusão com baixo teor de umidade (15 a 17%) e altas temperaturas (230°C). Estes resultados estão de acordo com os observados por ANDERSON *et alii* (3, 4), quando trabalharam com extrusão de grãos de milho e sorgo. COLONNA *et alii* (9) observaram que amidos de trigo extrusados a altas temperaturas são altamente solúveis, ao contrário daqueles produzidos a temperaturas mais baixas.

QUADRO 23. Análise de variância para $Y'_7 = \text{ISA} (\%)$. Modelo reajustado.

	GL	SQ	R ²	QM	F	p
Regressão						
Linear	3	2347,27	0,8263		50,81	0,0001
Quadrática	3	98,38	0,0346		2,13	0,1301
Interação	3	102,33	0,0360		2,22	0,1196
Regressão	9	2547,98	0,8970		18,39	0,0001
Resíduos						
Falta de ajuste	4	67,68		16,92	1,13	0,3802
Erro puro	15	224,88		14,99		
Total	19	292,56		15,40		
Variáveis						
x_1 (umidade)	4	203,39		50,85	3,30	0,0325
x_2 (temperatura)	4	2027,30		506,83	32,92	0,0001
x_4 (\emptyset matriz)	4	452,27		113,07	7,34	0,0009
Média das respostas		46,51	Coeficiente de variação			0,0844
Erro-padrão		3,92	R ²			0,8970

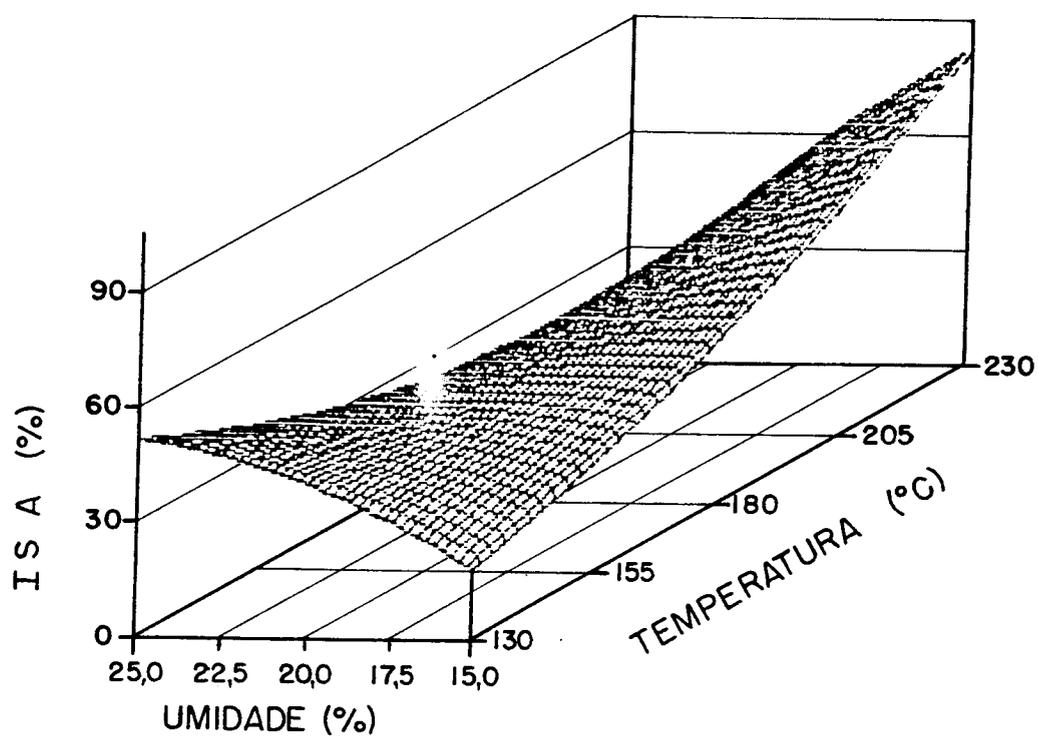


FIGURA 17. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da umidade e temperatura no ISA do amido extrusado (\emptyset matriz = 4mm).

O aumento da solubilidade, que é observado nos produtos extrusados em condições mais severas, isto é, de baixas umidades e altas temperaturas, é justificado como sendo decorrente da desintegração da estrutura molecular do amido devido ao alto grau de cisalhamento, obtendo-se produtos de peso molecular mais baixo, facilitando a sua solubilidade.

No que diz respeito ao efeito dos diferentes diâmetros de matriz, observa-se que o ISA aumenta com o aumento da matriz. Este efeito é mais intenso nas matrizes de diâmetro inferior a 4mm.

7. Índice de Absorção de Água (Y_8)

A partir dos resultados experimentais apresentados no Quadro 24 para o índice de absorção de água (IAA), foi estabelecido o modelo preditivo, obtendo-se a Equação 13.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_8 = & 16,94 - 0,12 x_1 - 0,96 x_2 - 0,10 x_3 + 1,35 x_4 - \\ & - 0,21 x_1^2 + 0,34 x_2^2 + 0,14 x_3^2 + 0,05 x_4^2 - \\ & - 0,03 x_1 x_2 - 0,47 x_1 x_3 - 0,38 x_1 x_4 + 0,11 x_2 x_3 - \\ & - 0,24 x_2 x_4 + 0,57 x_3 x_4 \end{aligned} \quad (\text{Equação 13})$$

A análise de variância do modelo preditivo (Quadro 25) mostrou que nenhuma das variáveis foi significativa.

De acordo com a ANOVA, verifica-se que no modelo de regressão apenas os efeitos lineares deveriam ser considerados ($p = 0,0563$), e assim tentou-se um novo modelo linear. Este modelo linear apresentou um $p = 0,1549$, que foi estatisticamente não significativa, o que impossibilitou o seu uso. Eliminou-se, então, os termos com significância inferior a 5%, dando origem a um modelo linear reajustado, obtendo-se a Equação 14.

QUADRO 24. Influência das variáveis do processo de extrusão no índice de absorção de água.

Experimento	Variáveis da extrusão				IAA (g gel/g mat. seca)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	14,72
02	22,5	155	105	3	15,28
03	17,5	205	105	3	15,90
04	22,5	205	105	3	20,34
05	17,5	155	155	3	14,10
06	22,5	155	155	3	11,79
07	17,5	205	155	3	18,01
08	22,5	205	155	3	17,51
09	17,5	155	105	5	15,98
10	22,5	155	105	5	16,27
11	17,5	205	105	5	20,75
12	22,5	205	105	5	18,34
13	17,5	155	155	5	17,14
14	22,5	155	155	5	18,01
15	17,5	205	155	5	21,54
16	22,5	205	155	5	18,88
17	15,0	180	130	4	16,55
18	25,0	180	130	4	16,01
19	20,0	130	130	4	19,70
20	20,0	230	130	4	17,24
21	20,0	180	80	4	18,14
22	20,0	180	180	4	17,25
23	20,0	180	130	2	14,03
24	20,0	180	130	6	20,62
25	20,0	180	130	4	17,83
26	20,0	180	130	4	17,35
27	20,0	180	130	4	17,17
28	20,0	180	130	4	17,12
29	20,0	180	130	4	19,07
30	20,0	180	130	4	15,25
31	20,0	180	130	4	14,77

IAA = Índice de Absorção em Água

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

$$\hat{Y}'_8 = 17,21 + 0,93 x_2 + 1,32 x_4 - 0,19 x_2 x_4 \quad (\text{Equação 14})$$

Empregando-se este último modelo, os dados obtidos foram analisados e mostraram que as variáveis temperatura e diâmetro da matriz afetavam o IAA e que, por outro lado, a interação entre essas duas variáveis não era significativa (Quadro 26).

Os diagramas de superfície de resposta, bidimensional e tridimensional, correspondentes ao modelo reajustado (\hat{Y}'_8) aparecem nas Figuras 18 e 19, respectivamente. Verifica-se pela Figura 18 que o IAA aumentou tanto com o aumento da temperatura (130° a 230°C), bem como com o aumento do diâmetro da matriz. Isto se deve ao fato de que com diâmetros maiores de matriz, a resistência imposta à saída do produto é menor, criando uma menor pressão interna e, conseqüentemente, causando uma menor ruptura do grânulo de amido, obtendo-se, assim, maiores índices de absorção de água. Conclusão semelhante foi obtida por MERCIER & FEILLET (34) quando extrusaram grits de milho em extrusor de dupla rosca trabalhando com umidade de 22% e a temperaturas entre 70° e 225°C. ANDERSON *et alii* (4) trabalhando com grits de sorgo também observaram que o IAA aumentava consistentemente com a elevação da temperatura até aproximadamente 190°C e que acima desta temperatura o IAA começava a diminuir.

Verifica-se, ainda, que os maiores valores de IAA são obtidos a temperaturas elevadas.

Os efeitos observados são visualizados no diagrama de superfície de resposta tridimensional, apresentado na Figura 19.

QUADRO 26. Análise de variância para $Y'_g = \text{IAA}$ (Modelo linear reajustado).

	GL	SQ	QM	F	p
Fonte					
Modelo	3	50,6112	16,8703	5,50	0,0048
Erro	25	76,6949	3,0677		
Total	28	127,3061			
Variáveis					
x_2 (temperatura)	1	18,4460		6,01	0,0215
x_3 (\emptyset matriz)	1	37,1674		12,12	0,0019
$x_2 \cdot x_4$	1	0,4903		0,16	0,6927
Média das respostas		17,37	Coeficiente de variação		10,0813
Erro-padrão		1,75	R^2		0,3975

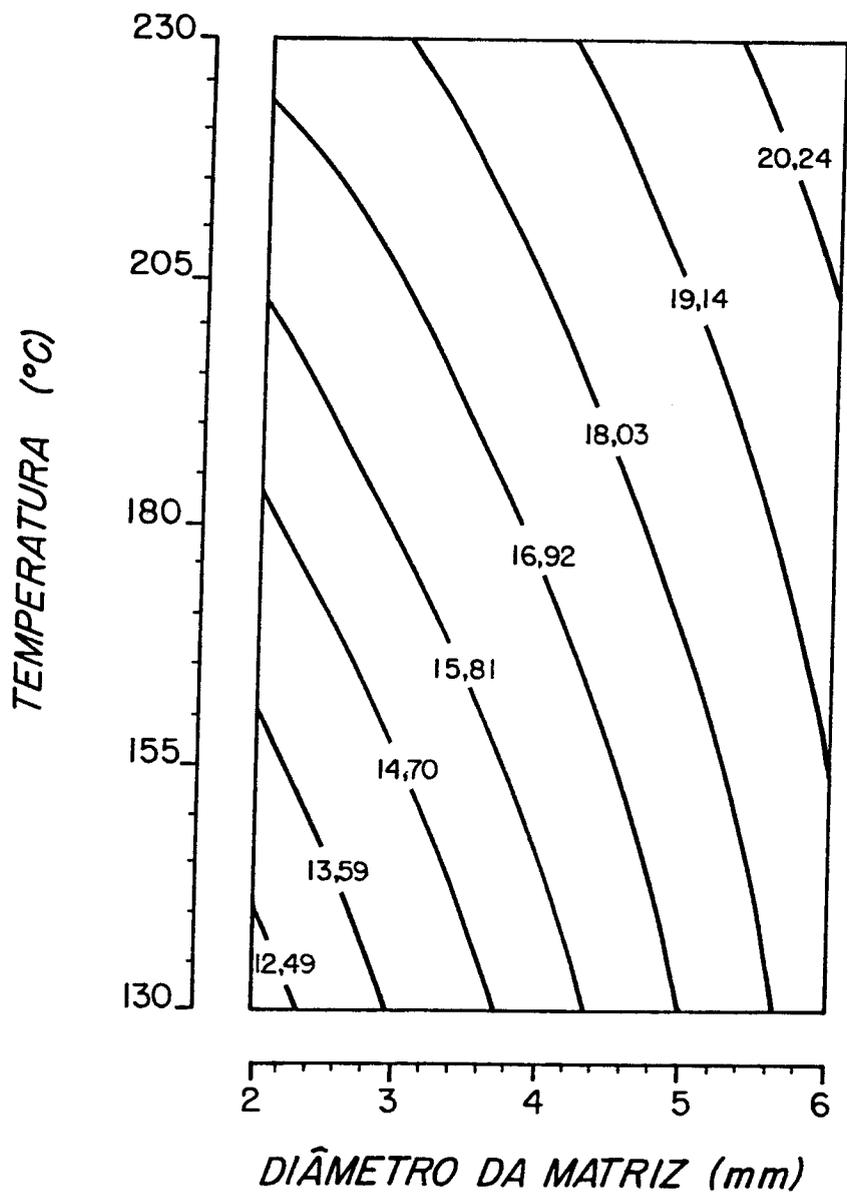


FIGURA 18. Efeito da temperatura e diâmetro da matriz no IAA do amido extrudado.

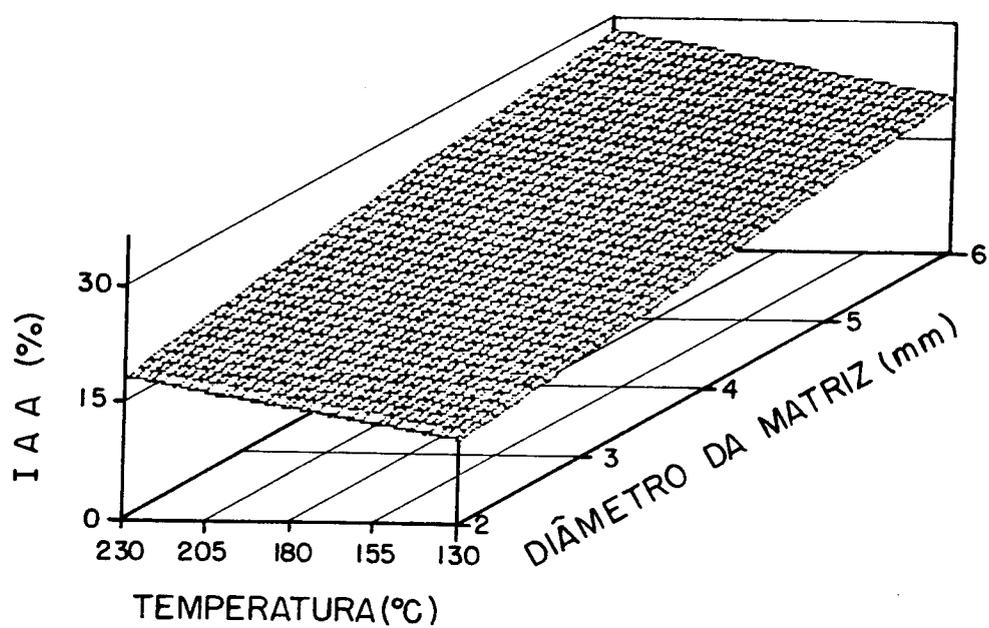


FIGURA 19. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e diâmetro da matriz no IAA do amido extrusado.

8. Suscetibilidade enzimática (Y_9)

A intensidade de desorganização da estrutura cristalina dos grânulos de amido decorrentes do processo de extrusão pode ser avaliada através da suscetibilidade enzimática. Portanto, a suscetibilidade enzimática serve para expressar a extensão de perda da integridade do grânulo de amido. De acordo com os dados experimentais apresentados no Quadro 27, foi estabelecido o modelo de regressão completo, obtendo-se a Equação 15.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_9 = & 92,70 + 1,95 x_1 + 3,86 x_2 - 1,08 x_3 + 1,73 x_4 - 1,46 x_1^2 - \\ & - 1,30 x_2^2 - 0,41 x_3^2 - 0,62 x_4^2 + 0,76 x_1 x_2 + 0,01 x_1 x_3 - \\ & - 1,39 x_1 x_4 + 3,02 x_2 x_3 - 5,11 x_2 x_4 + 1,36 x_3 x_4 \quad (\text{Equação 15}) \end{aligned}$$

A análise de variância que aparece no Quadro 28 mostra que este modelo explica 80% da variação de Y_9 e que a equação é estatisticamente significativa ao nível de $p = 0,0079$. Mostra, também, que existe um bom ajuste entre o modelo e os dados experimentais, pois o desvio da regressão (falta de ajuste) não é significativa ($p = 0,2824$). Ainda, de acordo com a ANOVA deste modelo, verifica-se que apenas a temperatura ($p = 0,0003$) e diâmetro da matriz ($p = 0,0115$) são variáveis significativas.

Com base nos resultados do Quadro 28, o modelo foi empregado para visualizar o efeito da temperatura e do diâmetro da matriz na suscetibilidade enzimática do amido extrusado, obtendo-se as Figuras 20 e 21.

Verifica-se pela Figura 20, que para diâmetro da matriz inferior a 5mm, à medida que se aumenta a temperatura tem-se um aumento na suscetibilidade enzimática, ocorrendo o

QUADRO 27. Influência das variáveis do processo de extrusão na suscetibilidade enzimática.

Experimento	Variáveis da extrusão				Suscetibilidade enzimática (%)
	x_1	x_2	x_3	x_4	
01	17,5	155	105	3	81,10
02	22,5	155	105	3	88,50
03	17,5	205	105	3	90,15
04	22,5	205	105	3	100,00
05	17,5	155	155	3	70,15
06	22,5	155	155	3	71,80
07	17,5	205	155	3	88,83
08	22,5	205	155	3	103,30
09	17,5	155	105	5	95,50
10	22,5	155	105	5	95,00
11	17,5	205	105	5	85,10
12	22,5	205	105	5	90,50
13	17,5	155	155	5	85,80
14	22,5	155	155	5	93,40
15	17,5	205	155	5	92,20
16	22,5	205	155	5	90,80
17	15,0	180	130	4	86,30
18	25,0	180	130	4	87,50
19	20,0	130	130	4	79,30
20	20,0	230	130	4	95,80
21	20,0	180	80	4	90,20
22	20,0	180	180	4	92,00
23	20,0	180	130	2	88,50
24	20,0	180	130	6	92,00
25	20,0	180	130	4	95,40
26	20,0	180	130	4	95,30
27	20,0	180	130	4	90,70
28	20,0	180	130	4	95,20
29	20,0	180	130	4	92,00
30	20,0	180	130	4	86,50
31	20,0	180	130	4	93,80

x_1 = umidade (%)

x_2 = temperatura (°C)

x_3 = velocidade do parafuso (rpm)

x_4 = diâmetro da matriz (mm)

QUADRO 28. Análise de variância para Y_9 = suscetibilidade enzimática.

	GL	SQ	R ²	QM	F	p
Regressão						
Linear	4	230,64	0,2297		3,94	0,0241
Quadrática	4	74,85	0,0746		1,28	0,3253
Interação	6	493,43	0,4914		5,61	0,0037
Regressão	14	798,92	0,7957		3,90	0,0079
Resíduos						
Falta de ajuste	8	140,67		17,58	1,64	0,2824
Erro puro	6	64,44		10,74		
Total	14	205,11		14,65		
Variáveis						
x_1 (umidade)	5	164,06		32,81	2,24	0,1077
x_2 (temperatura)	5	718,05		143,61	9,80	0,0003
x_3 (vel.parafuso)	5	148,50		29,70	2,03	0,1368
x_4 (\emptyset matriz)	5	332,00		66,40	4,53	0,0115
Média das respostas		90,74				0,0422
Erro-padrão		3,83				0,7957

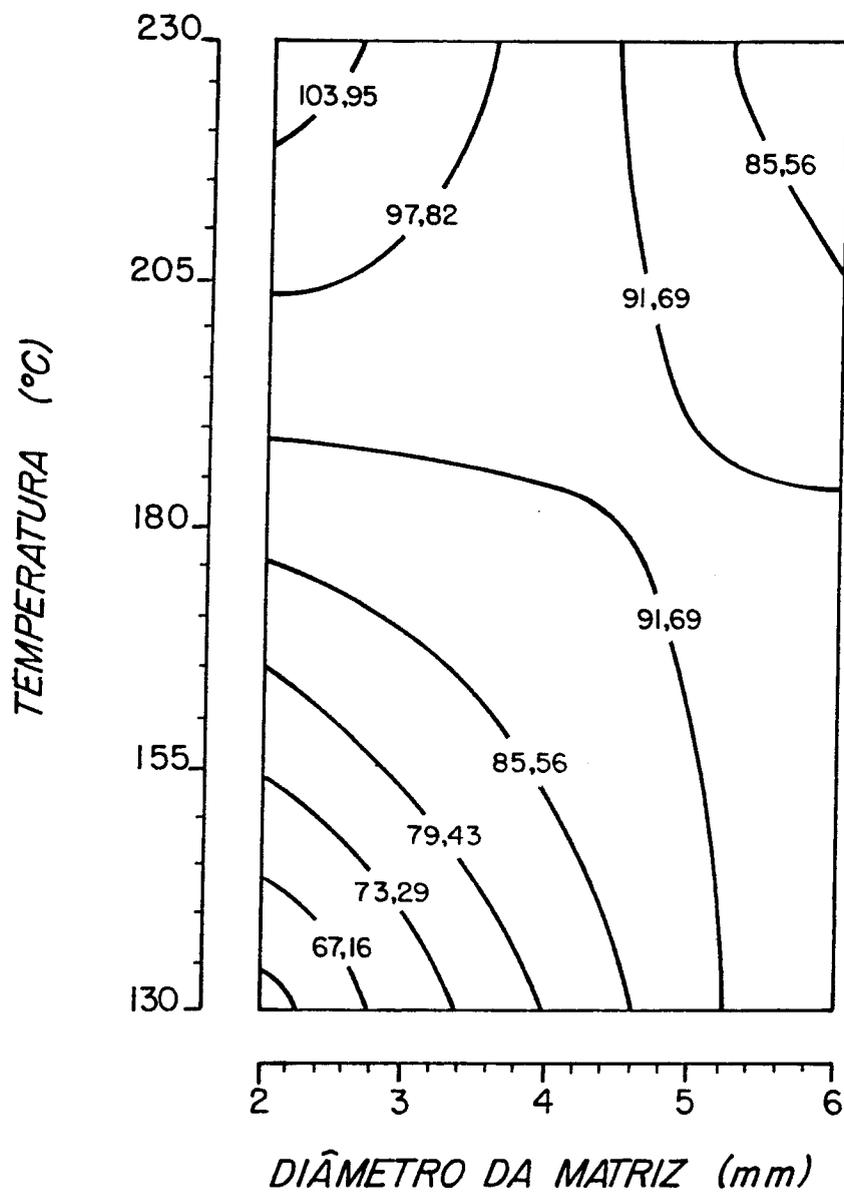


FIGURA 20. Efeito da temperatura e diâmetro da matriz na suscetibilidade enzimática do amido extrusado (umidade = 20% e vel. parafuso = 130 rpm).

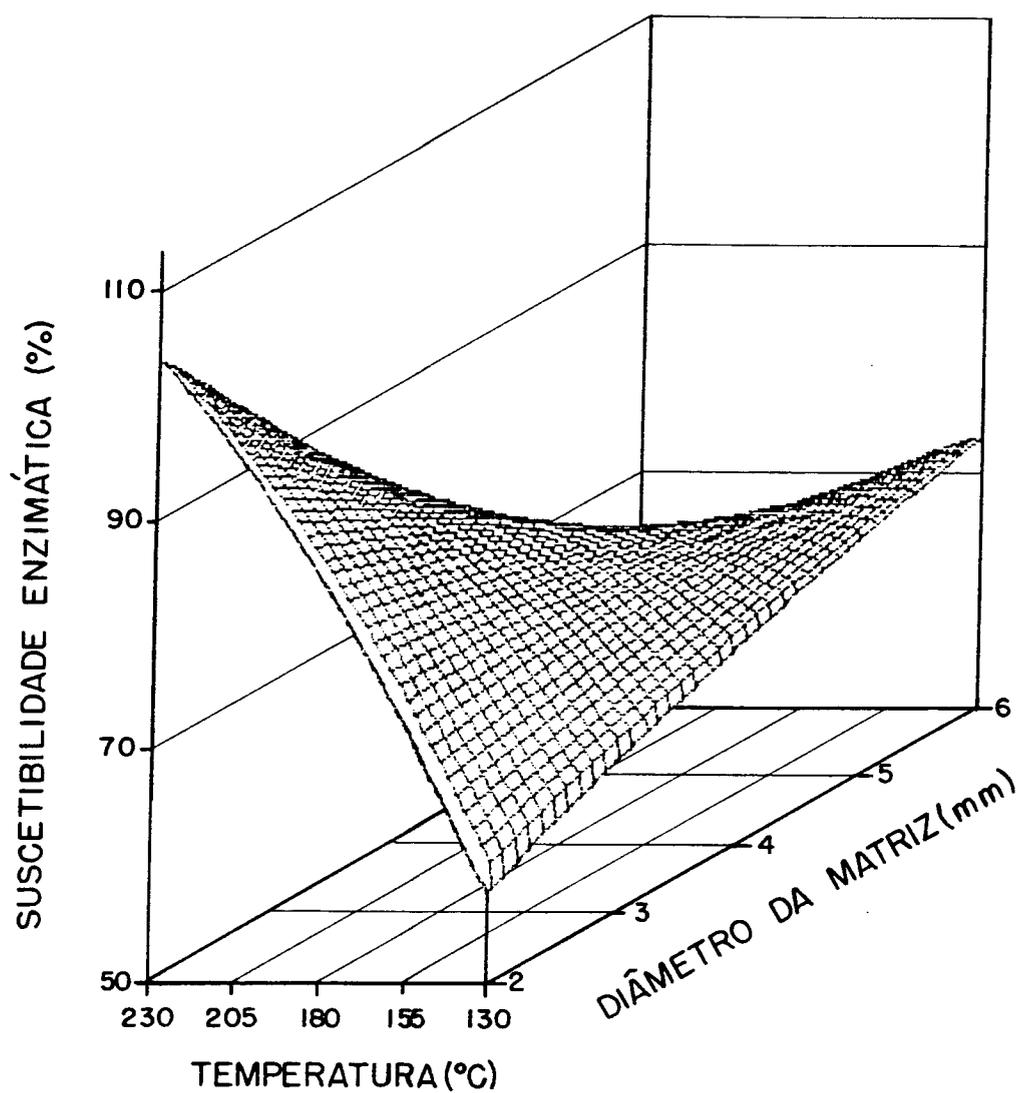


FIGURA 21. Diagrama de superfície de resposta tridimensional mostrando o efeito da temperatura e diâmetro da matriz na suscetibilidade enzimática do amido extrusado (umidade = 20% e vel. parafuso = 130 rpm).

inverso com diâmetro igual ou superior a 5mm. Observa-se, também, que para temperaturas inferiores a 180°C, ocorre um aumento na suscetibilidade enzimática à medida que se aumenta o diâmetro da matriz, ocorrendo o inverso para temperaturas superiores a 180°C. Os maiores valores de suscetibilidade enzimática são obtidos a altas temperaturas e com baixo diâmetro da matriz. Estes efeitos são visualizados de forma tridimensional na Figura 21 e são semelhantes àqueles obtidos por MERCIER & FEILLET (34), os quais verificaram que farinhas de milho extrudadas a altas temperaturas apresentavam maior suscetibilidade a alfa-amilase. GOMEZ & AGUILERRA (19) confirmaram os resultados de MERCIER & FEILLET.

A suscetibilidade ao ataque pela enzima aumenta com o aumento da temperatura, o que indica que a degradação é maior, tornando o grânulo de amido mais acessível às enzimas.

V. CONCLUSÕES

A análise dos dados obtidos permite concluir que:

1. A extrusão é um meio adequado de se obter amido de sorgo pré-gelatinizado e, em função das variáveis empregadas no processo, é possível obter amidos pré-gelatinizados com diferentes características, que poderão ser usados para diferentes fins.

2. Os efeitos das variáveis da extrusão, nas características do amido, consideradas nesse estudo, são os seguintes:

(a) a expansão é dependente das variáveis umidade, temperatura e diâmetro da matriz, sendo que para uma determinada temperatura, ela diminui com o aumento da umidade, efeito que se torna menos intenso com o aumento do diâmetro da matriz;

(b) a viscosidade inicial é dependente das variáveis umidade e temperatura. De modo geral, a viscosidade inicial aumenta com o aumento da temperatura para umidades superiores a 20%, ocorrendo o inverso para umidades inferiores a 18%. Também a viscosidade inicial aumenta com o aumento da umidade para temperaturas superiores a 165°C, ocorrendo o inverso para temperaturas inferiores a 145°C;

(c) a viscosidade a quente é dependente apenas da variável temperatura, diminuindo com o seu aumento;

(d) a viscosidade após 20 minutos a 95°C (resistência ao atrito mecânico) e a viscosidade final (retrogradação do amido) são dependentes das variáveis temperatura e velocidade do parafuso. De modo geral, essas viscosidades diminuem com o aumento da temperatura, fato que se torna mais acentuado com

altas velocidades do parafuso e altas temperaturas;

(e) o ISA \bar{e} dependente das variáveis umidade, temperatura e diâmetro da matriz, sendo os valores máximos obtidos com baixos teores de umidade e altas temperaturas, fato que se torna mais acentuado com o aumento do diâmetro da matriz;

(f) o IAA \bar{e} dependente das variáveis temperatura e diâmetro da matriz, aumentando com o aumento dessas variáveis;

(g) a suscetibilidade enzimática \bar{e} dependente das variáveis temperatura e diâmetro da matriz, aumentando com o aumento dessas variáveis até um máximo, diminuindo a seguir, o que ocorre com temperaturas superiores a 200°C e diâmetro de matriz superior a 5mm.

3. A variável temperatura \bar{e} a mais significativa, afetando todas as propriedades estudadas.

4. A variável velocidade do parafuso \bar{e} a menos significativa, afetando somente as viscosidades após 20 minutos a 95°C e final.

5. A variável diâmetro da matriz não afeta as viscosidades estudadas.

6. O torque \bar{e} dependente apenas da variável umidade, diminuindo com o seu aumento.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILERA, J.M. & KOSIKOWSKI, F.V. Extrusion and roll-cooking of corn-soy-whey mixtures. *J. Food Sci.*, 43 (1): 225-227, 230, 1978.
2. AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS - AACC. **Approved methods of the American Association of Cereal Chemists.** 7^a ed. rev. St. Paul, 1976 (AACC Methods, 08-17; 30-10; 46-12; 76-20).
3. ANDERSON, R.A.; CONWAY, H.F.; PFEIFER, V.V. & GRIFFIN Jr, E.L. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today*, 14 (1): 4-11, 1969
4. ANDERSON, R.A.; CONWAY, H.F.; PFEIFER, V.F. & GRIFFIN Jr, E.L. Roll and extrusion-cooking of grain sorghum grits. *Cereal Sci. Today*, 14 (11): 372-375, 381, 1969.
5. BRASIL. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Anu. Estat. Brasil*, Rio de Janeiro, v. 38/45, 1977/1984.
6. BOX, G.E.P. & WILSON, K.B. On the experimental attainment of optimum condition. *J. R. Statist. Soc.*, 13: 1-45, 1951.
7. CHIANG, B.Y. & JOHNSON, J.A. Gelatinization of starch in extruded products. *Cereal Chem.*, 54 (3): 436-443, 1977.
8. COLONNA, P.; BULEON, A. & MERCIER, C. Physically modified starches. *Crit. Rep. Appl. Chem.*, 13: 79-114, 1987.

9. COLONNA, P.; DOUBLIER, J.L.; MELCION, J.P.; de MONREDON, F. & MERCIER, C. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. I. Physical and macromolecular modifications. **Cereal Chem.**, 61 (6): 538-543, 1984.
10. CONWAY, H.F. Extrusion-cooking of cereals and soybeans, I. **Food Prod. Dev.**, 5 (2): 27-29, 1971.
11. AS CULTURAS DE A ATÉ Z; sorgo. *In*: **Guia Rural-Abril**, São Paulo, p. 376-377, 1986.
12. DAVIDSON, V.J.; PATON, D.; DIOSADY, L.L. & RUBIN, L.J. A model for mechanical degradation on wheat starch in a single-screw extruder. **J. Food Sci.**, 49 (4): 1154-1157, 1984.
13. DRAPER, N.R. & SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York, John Wiley & Sons Inc., 1966, 407 p.
14. EL-DASH, A.A. Application and control of thermoplastic extrusion of cereals for food and industrial uses. *In*: POMERANZ, Y. & MUNCH, L., eds. **Cereals; a renewable resource, theory and practice**. St. Paul, AACC, 1982, p. 1-52.
15. EL-DASH, A.A.; GONZALES, R. & CIOL, M. Response surface methodology in the control of thermoplastic extrusion of starch. *In*: JOWITT, R., ed. **Extrusion Cooking Technology**. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1984, p. 51-74.

16. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sorgo sacari-
no: uma opção para o álcool. **EMBRAPA Informativo**. Brasília,
(31): 3, 1978.
17. FAUBION, J.M. & HOSENEY, R.C. High-temperature short-time
extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect
of moisture and flour type on extrudate properties. **Ce-
real Chem.**, 59 (6): 529-533, 1982.
18. FAUBION, J.M.; HOSENEY, R.C. & SEIB, P.A. Functionability
of grain components in extrusion. **Cereal Foods World**. 27
(5): 212-216, 1982.
19. GOMEZ, M.H. & AGUILERA, J.M. Changes in the starch frac-
tion during extrusion-cooking of corn. **J. Food Sci.**, 48
(2): 378-381, 1983.
20. GOMEZ, M.H. & AGUILERA, J.M. A physicochemical model for
extrusion of corn starch. **J. Food Sci.**, 49 (1): 40-43,
63, 1984.
21. GROSSMANN, M.V.E. **Efeito da extrusão termoplástica na ge-
latinização do amido de mandioca, visando produção de
álcool**. Tese - Doutorado. Campinas, UNICAMP/FEA, 1986,
124 p.
22. HARMANN, D.V. & HARPER, J.M. Effect of extruder geometry
on torque and flow. **Trans. ASAE**, 16: 1175-1177, 1973.
23. HARPER, J.M. Extrusion texturization of foods. **Food Tech-
nol.**, 40 (3): 70-76, 1986.

24. JANSEN, G.R.; HARPER, J.M. & O'DEEN, L. Nutritional evaluation of blended food made with a low-cost extruder cooker. *J. Food Sci.*, 43 (3): 912-915, 1978.
25. KAMER, J.H. van de & GINKEL, L. van. Rapid determination of crude fiber in cereals. *Cereal Chem.*, 29 (4): 239-251, 1952.
26. LAUNAY, B. & LISH, J.M. Twin-screw extrusion cooking of starches: flow behavior of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates. *J. Food Eng.*, 2 (2): 159-165, 1983.
27. MATZ, S.A. *Snack Food Technology*. Westport, AVI, 1976. 349 p.
28. MENEZES, T.J.B. de. *Etanol: o combustível do Brasil*. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 1980. 233 p.
29. MENEZES, T.J.B. de; LAMO, P.R. de, TEIXEIRA, C.G. & PURCHIO, M.J. Possibilidades de produção de álcool a partir do sorgo sacarino. *In: SIMPÓSIO SOBRE PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NO NORDESTE*, 1, Fortaleza, 1977. *Anais...* Fortaleza, Banco do Nordeste do Brasil, 1977. p. 211-229.
30. MERCIER, C. Effect of extrusion - cooking on potato starch using a twin screw french extruder. *Starch/Stärke*, 29 (2): 48-52, 1977.

31. MERCIER, C. Structure and digestibility alterations of cereal starches by twin-screw extrusion cooking. *In*: LINKO, P. *et alii*, eds. **Food Process Engineering; food processing systems**. London, Applied Science Publishers Ltd., 1980, v. 1, p. 795.
32. MERCIER, C.; CHARBONNIERE, R.; GALLANT, D. & GUIBOLT, A. Structural modification of various starches by extrusion cooking with a twin-screw french extruder. *In*: BLANSHARD, J.M.V. & MITCHELL, J.R., eds. **Polyssacharides in food**. London, Butterworths, 1979. p. 153-170.
33. MERCIER, C.; CHARBONNIERE, R.; GREBAUT, J.; GUERIVIERE, J. F. de la. Formation of amilose-lipid complexes by twin-screw extrusion - cooking of manioc starch. **Cereal Chem.**, 57 (1): 4-9, 1980.
34. MERCIER, C. & FEILLET, P. Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. **Cereal Chem.**, 52 (3): 283-297, 1975.
35. MEUSER, von F. & LENGERICH, B.V. Possibilities of quality optimization of industrially extruded flat breads. *In*: CHEFTEL, J.C. *et alii*, eds. **Thermal processing and quality of foods**. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1984. p. 180.
36. MEUSER, von F.; LENGERICH, B.V. & KOHLER, F. The influence of extrusion parameters on the functional properties of wheat starch. **Starch/Stärke**, 34 (11): 366-372, 1982.

37. MUSTAKAS, G.C. Full-fat and defatted soy flours for human nutrition. *J. Amer. Oil Chem. Soc.*, 48 (12): 815-819, 1971.
38. MUSTAKAS, G.C.; GRIFFIN Jr, E.L.; ALLEN, L.E. & SMITH, O.B. Production and nutritional evaluation of extrusion-cooked full-fat soybean flour. *J. Amer. Oil Chem. Soc.*, 41 (9): 607-614, 1964.
39. OLKKU, J.; HAGQVIST, A. & LINKO, P. Steady-state modelling of extrusion cooking by RSM. *In: JOWITT, R., ed. Extrusion Cooking Technology.* London, Elsevier Applied Science Publishers, 1984. p. 27-50.
40. OWUSU-ANSAH, J.; van de VOORT, F.R. & STANLEY, D.W. Physicochemical changes in corn starch as a function of extrusion. *Cereal Chem.*, 60 (4): 319-324, 1983.
41. OWUSU-ANSAH, J.; van de VOORT, F.R. & STANLEY, D.W. Textural and microstructural changes in corn starch as a function of extrusion variables. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.*, 17 (2): 65-70, 1984.
42. PALERMO, J.R. **Gelatinização de amido e grão de sorgo pela radiação de microondas.** Tese - Mestrado. Campinas, UNICAMP. Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, 1982. 116 p.
43. PATON, D. & SPRATT, W.A. Simulated approach to the estimation of degree of cooking of an extruded cereal product. *Cereal Chem.*, 58 (3): 216-220, 1981.

44. RAMSEN, C.H. & CLARK, J.P. A viscosity model for a cooking dough. **J. Food Proc. Eng.**, 2 (1): 39-64, 1978.
45. RESPONSE SURFACE METHODOLOGY REVISITED. *In: Annual Meeting*, American Association of Cereal Chemists. New Orleans, AACC, 1976. 14 p.
46. ROONEY, L.W. & CLARK, L.E. The chemistry & processing of sorghum grain. **Cereal Sci. Today**, 13 (7): 258-265, 285, 1968.
47. ROONEY, L.W.; JOHNSON, J.W. & ROSENOW, D.T. Sorghum quality improvement: types for food. **Cereal Sci. Today**, 15 (8): 240-243, 1970.
48. ROSSEN, J.L. & MILLER, R.C. Food extrusion. **Food Technol.**, 27 (8): 46-53, 1973.
49. SEIB, P.A. **An introduction to food extrusion**. Manhattan, Kansas State University. Dept. of Grain Science & Industry, 1976. p. 1.
50. SMITH, O.B. Why extrusion cooking? **Cereal Foods World**, 21 (1): 4-8, 1976.
51. STANLEY, D.W. Chemical and structural determinants of texture of fabricated foods. **Food Technol.**, 40 (3): 65-68, 76, 1986.

52. SWEARINGIN, M.L.; FOLEY, J.R.; MORRIS, W.H.M. & NEVES, J.D. The market for grain sorghum. *In*: _____. **Grain sorghum for northeastern Brazil; A feasibility study.** Washington, Agency for International Development. Department of State, 1971. p. 52-57.
53. TIPPLES, K.H. Uses and applications. *In*: SHENEY, W.C. & TIPPLES, K.H., eds. **The Amylograph Handbook.** St. Paul, AACC, 1980. p. 12-22.
54. TROPICAL PRODUCTS INSTITUTE. Proceedings of a symposium on sorghum and millets for human food. *In*: DENDY, D.A.V., ed. ICC Study Group 32. London, 1977.
55. WALL, J.S. & BLESSIN, C.W. Composition & structure of sorghum grains. **Cereal Sci. Today**, 14 (8): 264-269, 276, 1969.
56. WALL, J.S. & ROSS, W.M. **Sorghum production and utilization.** Westport, AVI, 1970. 702 p.