



EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE AMIDOS E PRODUTOS AMILÁCEOS



Documentos Nº 19

ISSN - 0103 - 6068

Junho, 1997



EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE AMIDOS E PRODUTOS AMILÁCEOS

José Luís Ramirez Ascheri



Exemplares desta publicação podem ser solicitados à:

EMBRAPA/CTAA

Av. das Américas, 29.501 - Guaratiba

CEP: 23020-470 - Rio de Janeiro - RJ

Telefone: (021) 410-7400

Telex: 21 33267 EBPA BR

Fax: (021) 410-1090

Tiragem: 1.000 exemplares

Comitê de Publicações: Hilda da Rosa Rodrigues
Maria Helena Lopes Cruz
Regina Isabel Nogueira
Rogério Germani
Ronoel Luiz de O. Godoy
Rosa Rabinovitci Szpiz
Tânia B. S. Corrêa

Equipe de Apoio

Cláudia Regina Delaia e
Renata M. A. Paldês

ASCHERI, J. L. R. **Extrusão termoplástica de amidos e produtos amiláceos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CTAA, 1997. 43 p. (EMBRAPA-CTAA. Documentos; n. 19).

1. Amido - Extrusão termoplástica. I. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Tecnologia Agroindustrial de Alimentos. II. Título. III. Série.

AGRADECIMENTOS

O Comitê de Publicações da EMBRAPA Agroindústria de Alimentos registra seu especial agradecimento à **Secretaria de Desenvolvimento Rural - SDR**, do Ministério da Agricultura e do Abastecimento, pelo suporte financeiro que viabilizou a concretização dessa publicação.

Registra-se também seu agradecimento à **Delegacia Federal de Agricultura para o Estado do Rio de Janeiro - DFA-RJ**, pelo apoio administrativo à contratação dos serviços gráficos.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	5
2.	MODIFICAÇÕES MOLECULARES DO AMIDO	5
3.	MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DO AMIDO	8
4.	PROPRIEDADES FUNCIONAIS	9
4.1.	Expansão	10
4.2.	Coesividade e força mecânica	17
4.3.	Forma	18
4.4.	Solubilidade	19
4.5.	Espessamento	22
5.	EFEITO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE EXTRUSÃO NAS TRANSFORMAÇÕES (PROPRIEDADES FUNCIONAIS) DO AMIDO	25
5.1.	Influência das variáveis operacionais na transformação (propriedades funcionais) do amido	25
5.1.1.	Rotação da rosca	25
5.1.2.	Temperatura do extrusor	28
5.1.3.	Umidade inicial do produto	30
5.1.4.	Matriz	33
5.2.	Efeito dos parâmetros do sistema na transformação (pro- priedades funcionais) do amido	34
5.2.1.	Temperatura do produto	34
5.2.2.	Pressão	34
5.2.3.	Cisalhamento	35
5.2.4.	Tempo de residência	35

6.	OTIMIZAÇÃO DA EXTRUSÃO. ESCOLHA DAS CONDIÇÕES DO PROCESSO	35
6.1.	Estudo dos parâmetros	36
6.2.	Metodologia de superfície de resposta	36
6.3.	Modelo sistemático analítico: critério de introdução de energia	37
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE AMIDOS E PRODUTOS AMILÁCEOS

1. INTRODUÇÃO

O amido está contido em uma grande variedade de plantas, tais como os cereais (50-80%), leguminosas (25-50%) e tubérculos (60-95%).

Entre as novas técnicas físicas de processamento usadas em alimentos para materiais amiláceos, o cozimento por extrusão tem ganho notável importância por ser considerado como um processo versátil e de custo relativamente baixo. Desde 1930, a produção industrial por extrusão térmica e a frio foi desenvolvida em bases muito empíricas. Porém, a partir dessa data, a maioria dos estudos que têm sido desenvolvidos se referem principalmente ao efeito das variáveis do processo de extrusão nas propriedades funcionais do produto extrudado final. A maioria dos trabalhos científicos feitos sobre cozimento por extrusão estão publicados em jornais científicos. Entretanto, outra frente de conhecimento pertinente é a literatura de patentes, onde as informações estão disseminadas.

Em nossa abordagem serão discutidas as transformações dos materiais amiláceos, em função das características do extrusor e das condições de operação.

2. MODIFICAÇÕES MOLECULARES DO AMIDO

Os amidos nativos são misturas heterogêneas de no mínimo dois polímeros distintos da glicose: amilose e amilopectina. A *amilose*, é essencialmente linear e consiste em vários milhares de unidades de glicose ligadas por ligação alfa 1-4. A *amilopectina* é uma molécula ramificada semelhante a uma árvore, com maior grau de polimerização maior ($10^4 - 10^5$) (Whistler & Paschall, 1967).

Foi verificado em vários trabalhos que o monômero D-glucose e os dois tipos de ligações alfa (1-4) e alfa (1-6) não são modificados pela extrusão. Portanto a estrutura química primária do amido é preservada, demonstrando que nenhuma nova ligação é formada, mesmo em condições de alta temperatura que podem ocorrer na extrusão.

A transformação do amido em moléculas menores pelo processo de extrusão foi suspeitado desde os primeiros trabalhos, mas a sua extensão foi quantificada apenas recentemente. Mercier & Feillet (1975), estudando o material extrudado proveniente de grãos de milho e amido de vários cereais, usando um extrusor de rosca dupla (Clextral), verificaram a ausência de oligossacarídeos curtos ou glicose. Outros autores, usando diversos produtos amiláceos, assim como diversos extrusores, também verificaram a não formação de pequenos açúcares, pela extrusão. Em alguns casos foi observada uma liquefação parcial do amido e a formação de produtos de quebra de alto peso molecular.

Apesar de ser conhecida, a degradação térmica do amido (termólises) ocorre sob aquecimento prolongado (20 h à 80°C 8% de umidade), formando moléculas de baixo peso molecular (resíduos com 8- 12 glicoses). Porém, esse tipo de reação é de ocorrência pouco provável em extrusores, devido ao tempo muito curto de processamento. Entretanto, em alguns casos, um aumento nos teor de açúcares pode ocorrer, sendo atribuído à hidrólise enzimática de oligossacarídeos maiores, em condições de extrusão que não inativam completamente as enzimas amilolíticas. O interesse dado a esses açúcares pequenos é justificado pelo seu envolvimento nas reações de Maillard, e que levam ao desenvolvimento de coloração e "flavor" característicos.

A degradação molecular do amido foi demonstrada usando amidos puros. Para provar que os polímeros do amido são degradados em componentes moleculares menores, podem ser usados métodos de cromatografia de permeação em gel e medidas da viscosidade intrínseca. Além desses, podem ser usadas determinações comparativas da viscosidade do extrudado, bem como a determinação da quantidade de amilose solubilizada dos extrudados. Com o uso dessa metodologia é possível mostrar diferenças na distribuição do peso molecular dos componentes do amido, antes e após a extrusão. Como as estruturas químicas primárias não são modificadas pela extrusão, qualquer decréscimo na viscosidade intrínseca corresponde a um decréscimo no peso molecular. Desta forma, o nível de degradação pode ser expresso pela relação entre as viscosidades intrínsecas do produto final e da matéria prima.

As determinações diretas da viscosidade intrínseca, após fracionamento da amilose e amilopectina, demonstram claramente uma cisão de cadeia aleatória, que ocorre com a mesma acessibilidade para todas as ligações das cadeias, independentemente de suas localizações nas mesmas.

Os componentes do amido foram comparados após os processos de extrusão ou secagem em rolos. A secagem em rolos consiste basicamente no espalhamento de uma pasta de amido quente entre rolos, produzindo um produto floculado seco. Os flocos de amido instantâneos, obtidos por secagem em secadores de rolos, são conhecidos como amidos pré-gelatinizados, pelo fato de terem a propriedade de dispersão em água fria. Foi observado que o peso molecular da amilopectina diminuiu ligeiramente na amostra seca em rolos, enquanto que o mesmo decresceu grandemente nas amostras extrudadas, quando comparadas com o peso molecular da amilopectina nativa. Para amilose, os pesos moleculares decresceram apenas 3-10% para as amostras secas em rolos, e 33-48% para as extrudadas.

A extensão dessa degradação macromolecular, é função dos parâmetros de extrusão: temperatura, umidade e velocidade da rosca. Foi verificado por Davidson (1984), usando um extrusor Brabender de rosca única, que o número de ligações quebradas, na fração de maior peso molecular, aumentou com o aumento da temperatura de extrusão e com a diminuição do nível de umidade inicial. Diosady (1985) concluiu que a degradação é decorrente quase que exclusivamente do "shear stress" (tensão de cisalhamento) e do tempo gasto na zona ativa do extrusor, tendo conseqüentemente como variáveis a umidade de alimentação, temperatura de extrusão e rotação da rosca do extrusor.

Vários trabalhos concluíram que na despolimerização do amido, os efeitos mecânicos prevalecem sobre os efeitos térmicos.

A modificação molecular foi menor quando lipídeos estavam presentes, sugerindo que eles atuam como lubrificantes na extrusão, cada tipo de lipídeo apresentando um efeito distinto. Foi demonstrado o efeito lubrificante do óleo de coco e do ácido oleico no processo de extrusão, usando-se o amido de mandioca que apresenta um teor muito baixo de lipídeos (< 0,1%), por Colonna & Mercier (1983).

Enquanto o amido nativo é insolúvel em água, os amidos extrudados são parcialmente solúveis, fornecendo frações solúveis em água altamente turvas. Foi encontrado que a turbidez era devida a agregados de componentes amiláceos, ligados por ligações de hidrogênio, uma vez que desapareceu pelo aquecimento ou pela adição de álcali ou uréia. Esta liquefação do amido, sem hidrólise enzimática, pode também ocorrer sob pressão e cisalhamento. De acordo com Mercier & Feillet (1975), não é observada a formação de malto-dextrinas, mesmo se os amidos dos cereais se apresentem parci-

almente solúveis em água fria, após extrusão a 170 e 200°C, em extrusor com rosca dupla.

Carr *et al.* (1982), publicaram um processo de liquefação enzimático contínuo, no qual uma parte de amido de milho é pré-condicionado pela mistura a 95-100°C com uma parte de solução de alfa-amilase, sendo em seguida extrudado usando extrusor de rosca dupla Baker Perkins, e finalmente hidrolisado pela ação da alfa-amilase termo-estável e amiloglucosidase. A conversão de amido em glicose obtida foi de 80-86%.

Linko *et al.* (1984) descreveram o processo de liquefação do amido de cevada, usando extrusor Creusot-Loire BC 45 com duplo parafuso, em vários níveis de umidade e temperaturas, com adição de alfa amilase termo-estável *Termamil*. Para sacarificação à xarope de glicose, foi adicionada ao produto extrudado a glucoamilase de *Aspergillus niger*, e para xarope de maltose, adicionou-se beta-amilase e pululanase. Os maiores valores de Dextrose Equivalente (DE) no xarope de glicose após 24 horas de sacarificação, de 96 a 98, foram obtidos após extrusão-liquefação a 135°C, com conteúdo de umidade de 60% e 1,5% (p/p b.s) de alfa-amilase. O maior conteúdo de maltose, após 25 horas de sacarificação, de 87,5%, foi obtido após extrusão a 125°C, conteúdo de água de 19%, e sem adição de alfa-amilase. Todos esses processos apresentam algumas vantagens que estão geralmente associadas com a tecnologia de extrusão ou seja, reduções de gastos com energia, no consumo de água, na contaminação microbiana e no custo. Segundo alguns autores, poderiam ser integradas na produção de etanol.

3. MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS DO AMIDO

Durante o cozimento por extrusão, o amido que apresenta inicialmente uma forma granular, é progressivamente comprimido e transformado em um material denso, sólido e compacto, desaparecendo sua estrutura cristalina e granular.

O cozimento por extrusão pode destruir a estrutura cristalina organizada do amido, conforme demonstraram estudos feitos usando as técnicas de difração de raio X. Essa destruição poderá ser parcial ou completa, dependendo das variáveis de extrusão, tais como o teor de umidade e cisalhamento, e também da relação de amilose/amilopectina do amido em uso. É bem claro que os grânulos de amido podem resistir à "quebra" de sua estrutura típica na extrusão em condições de alta umidade e baixo grau de cisalhamento;

entretanto, aumentando a severidade do tratamento térmico, por exemplo à umidade de 19% e 150°C, os grânulos perdem suas estruturas organizadas. (Figura 1).

Com amidos de tubérculos, como batata e mandioca, os quais são praticamente isentos de lipídeos (<0,1%), e em amido de milho ceroso, que não apresenta amilose, a redução da cristalinidade foi observada a temperaturas tão baixas quanto 70°C. A temperaturas maiores, a estrutura foi completamente destruída, obtendo-se um difratograma de raio X típico de um estado amorfo (Charbonnière *et al.*, 1973). Segundo Mercier & Feillet (1975), a extrusão, de amido de mandioca, em extrusor de rosca dupla, desorganiza o grânulo, obtendo-se uma estrutura amorfa por difratometria de raio X, e tornando o amido de mandioca extrudado quase totalmente solúvel em água.

4. PROPRIEDADES FUNCIONAIS

Dependendo do tipo e grau de tratamento térmico, os produtos extrudados e secos podem ser caracterizados pela sua estrutura expandida, pela coesividade, pela forma e/ou sensação na boca. Após a moagem os produtos extrudados apresentam alguma solubilidade, que conduz a um comportamento espessante e a uma alta susceptibilidade à ação de enzimas amilolíticas. Essas propriedades são altamente influenciadas pela origem do amido e pelas condições do processo de extrusão.

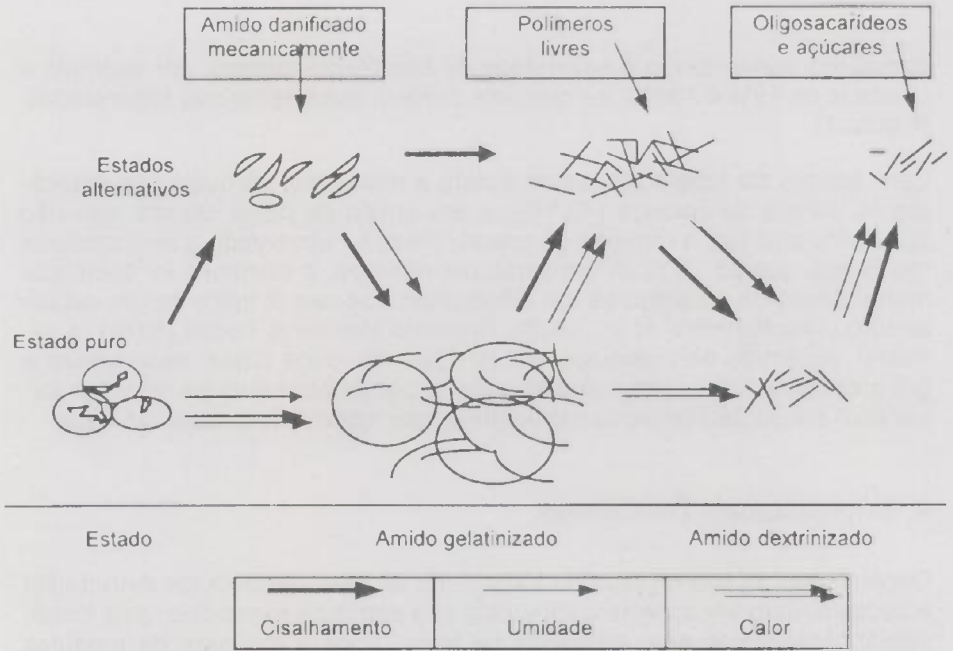


Figura 1. Modelo proposto para a degradação do amido durante a extrusão.

4.1. Expansão

A expansão conduz à maior família de produtos alimentícios extrudados, definida "snacks". A primeira geração de "snacks" é baseada na expansão direta na matriz do extrusor. A estrutura de produtos expandidos por extrusão depende, principalmente, da gelatinização do amido e da subsequente expansão do vapor de água originada pela queda de pressão na saída do material pela matriz do extrusor. A pressão dentro do corpo do extrusor aumenta devido à restrição na zona de descarga do mesmo, onde a pressão varia de 30 a 110 bar. Quando o amido fundido sai pela matriz, a passagem repentina da umidade interna para estado gasoso, devido à queda de pres-

são, causa uma expansão do produto. A perda de 3-5% de água na saída da matriz provoca um resfriamento substancial e rápido do produto. O resfriamento subsequente ocorre lentamente devido à baixa condutividade térmica do amido.

Na segunda geração de "snacks", os cereais são trabalhados na forma de uma massa, produzida com diferentes farinhas e/ou amidos de cereais e/ou tubérculos. A massa é formada em pequenas peças, usando um extrusor simples ou de duplo parafuso, seguindo-se a secagem e o armazenamento. Estes "snacks" geralmente são expandidos e prontos para o consumo. Os "snacks" de terceira geração, denominados também "half-products" ou "pellets" são feitos em condições similares aos da segunda geração, com a diferença de que os "pellets" não são expandidos. Ao saírem do extrusor, as peças elaboradas tem uma forma determinada pelas características da matriz, e seguem um controlado processo de secagem (Guy & Horne, 1988; Ascheri *et al.*, 1995). A expansão desses produtos ocorre posteriormente, através de fritura, aquecimento com ar quente ou por microondas.

A expansão do produto depende, principalmente, da composição do material e das condições de processamento, e resulta de expansão longitudinal, ou da expansão diametral, ou de ambas. A expansão do produto depende da intensidade de vaporização da água e das propriedades de fluxo do amido fundido. Segundo Launay (1983) e Lisch (1984), a água não é o fator limitante, sendo as propriedades reológicas do material fundido as variáveis principais, uma vez que as expansões, longitudinal e diametral, são dependentes da viscosidade e da elasticidade do material fundido, respectivamente.

Usualmente a expansão é expressa pela relação entre a área da seção transversal do extrudado e a área da matriz, ou pela relação entre os diâmetros do produto extrudado e da matriz.

Foi observado que nos produtos extrudados expandidos, o ar ocupa de 85 a 92% do volume total, exceto para amostras extrudadas à baixa temperatura. Desta forma, são obtidos extrudados com valores de densidade no intervalo de 0,04 a 0,38 g/cm³. O grau máximo de expansão pode ser previsto, com base no conteúdo de amido. Em amidos puros a expansão pode chegar a 500%, seguido pelos grãos integrais (400%), várias misturas ("pet food") para alimentação de animais (200-300%) e sementes oleaginosas (150-200%). O conteúdo de amido nesses materiais é de 100, 65-78, 40-50 e 0-10%, respectivamente. De acordo com algumas referências, o limite mínimo de amido num produto, para que ocorra a expansão é de 60 a 70%. O au-

mento no nível de amido danificado nos ingredientes crus conduz a produtos com poros, textura macia, maior solubilidade e caracter pegajosos quando comido.

O tamanho das partículas tem sido também apontado como um fator importante na expansão, principalmente quando se utiliza extrusores com rosca única. As partículas pequenas são mais rapidamente fundidas e a massa resultante, de viscosidade baixa, não é transportada apropriadamente. Este problema pode, nesses casos, ser eliminado pela redução de umidade. Em contraste, quando da utilização de um extrusor Clextral de rosca dupla, o tamanho de partícula foi considerado relativamente sem importância. Segundo alguns trabalhos, a relação amilose/amilopectina é relevante na determinação das propriedades dos produtos extrudados à base de amido (Figura 2). Misturas experimentais de amidos de milho ceroso e com alto teor de amilose mostraram que, a 130°C, o Índice de expansão diminuiu quando o conteúdo de amilose aumentou; a 225°C foi observada uma tendência oposta. A amilopectina produziu leveza, elasticidade, textura e superfície regulares, porém com características de pegajosidade. Em contraste, a amilose conduziu a produtos mais duros e menos expandidos. Por esta razão não recomendados amidos com nível de amilose de 5-20%, para obtenção de extrudados adequadamente crocantes e de textura aceitável.

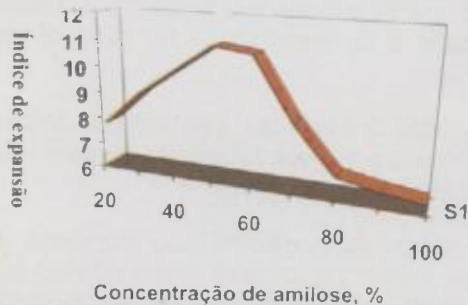


Figura 2. Efeito da concentração de amilose no índice de expansão. (Chinnaswamy & Hanna, 1988)

Por outro lado foi observado que a força de cisalhamento de amidos extrudado aumenta com o aumento dos níveis de amilose (Figura 3)

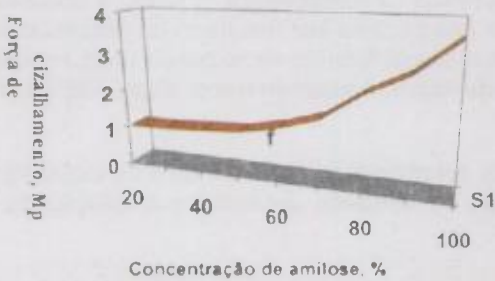


Figura 3. Efeito da concentração de amilose na força de cisalhamento. (Chinnaswamy & Hanna, 1988)

Quanto ao efeito dos lipídeos, a expansão aumentou com níveis crescentes de gordura até 5%, sendo observada uma rápida queda acima deste nível. Porém, o conteúdo de umidade e a temperatura final de extrusão podem ser apropriadamente balanceadas para minimizar o efeito adverso de lipídeos em materiais que apresentam altos teores. Em contraste, outros autores mostraram que a adição de lipídeos teve apenas uma pequena influência na expansão do extrudado.

A sacarose, em quantidades superiores a 15%, aumentou a expansão, e o efeito foi dobrado com a inclusão de 5% de cloreto de sódio.

Antila *et al.* (1984) encontraram que o enriquecimento protéico é em muitos casos benéfico, devido à estabilização da estrutura e melhoria na textura e gosto. A expansão das misturas extrudadas é modificada pela natureza da proteína adicionada. Se o produto final desejado for um cereal pronto de desjejum totalmente cozido e denso, a matéria-prima básica deverá ser uma farinha de trigo duro, farelo de trigo, e/ou "middlings" do trigo. Por outro lado, se for desejado um produto expandido, crocante e leve, deve ser usado farinha com baixa força de glúten (para facilitar a expansão) e baixo teor de gordura (para minimizar a dureza), tais como as farinhas de milho, arroz, trigo mole ou uma combinação delas.

A temperatura do produto imediatamente antes da expansão tem sido estudada amplamente. Foi observado que as amostras não começaram a expandir até que se atinja a temperatura de cerca de 100°C. O grau de expansão aumentou com o aumento da temperatura, quando o conteúdo de umidade foi inferior a 19,5%. Isto poderia ser resultado do decréscimo da viscosidade, permitindo que o material fundido se expanda mais rapidamente, ou do aumento na pressão de vapor, causando maior expansão no final da matriz.

Segundo vários trabalhos, foi constatado que o índice de expansão aumenta à medida que o conteúdo de umidade decresce e a rotação da rosca aumenta (Figuras 4 e 5).

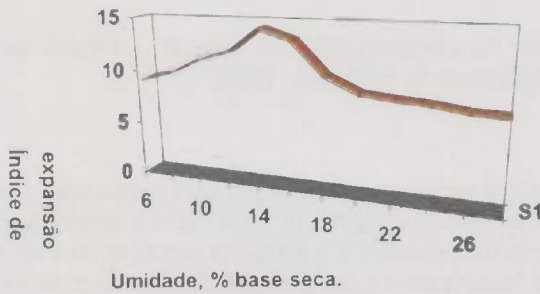


Figura 4. Efeito da umidade de processamento no índice de expansão. (Chinnaswamy & Hanna, 1988)

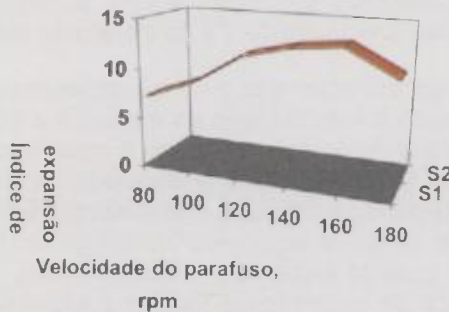


Figura 5. Efeito da velocidade do parafuso no índice de expansão.

A baixas temperaturas de extrusão, a expansão diametral é reduzida, porque o amido não é totalmente fundido, dando uma expansão longitudinal também reduzida. À medida que a temperatura aumenta, o grau de expansão atinge um máximo a cerca de 170°C, independentemente do equipamento usado. O decréscimo da expansão, a temperaturas maiores (Figura 6), é atribuído à dextrinização excessiva e ao enfraquecimento da estrutura do amido.

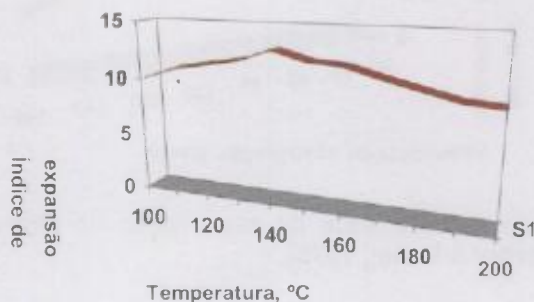


Figura 6. Efeito da temperatura no índice de expansão. (Chinnaswamy & Hanna, 1988).

O papel da matriz na definição da textura dos produtos extrudados é geralmente pouco considerado na literatura científica. O efeito da matriz pode ser considerado independentemente do tipo de extrusor usado. Uma matriz pequena em um extrusor de rosca única aparentemente aumenta a relação de expansão; expansão máxima foi obtida com amostras de umidade 19,5%, usando-se matriz com diâmetro de 12,7 mm.

Foi recentemente observado que um aumento no tamanho da matriz resultou no decréscimo da expansão e aumento da densidade do produto final, usando um extrusor de dupla rosca e amidos de milho e trigo. Isto estaria relacionado com redução nas forças de cisalhamento, diminuição da pressão de saída na matriz, e a um aumento na viscosidade devido ao baixo nível de cisalhamento e temperatura. Outros pesquisadores mostraram que as variáveis mais importantes no que se refere ao grau de expansão são a temperatura, conteúdo de umidade e geometria da matriz.

Por outro lado, tem-se verificado que em condições de temperatura e umidade constantes, o índice de expansão aumenta com o aumento da velocidade de alimentação até atingir um máximo e então declina consideravelmente (Figura 7).

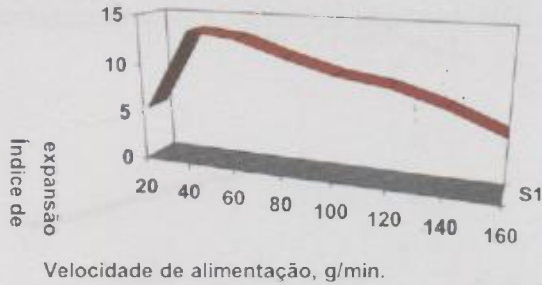


Figura 7. Efeito da velocidade de alimentação no índice de expansão (Mercier & Feillet, 1975).

As características de expansão de vários amidos extrudados a 135°C e 225°C, com 22% de umidade inicial e usando um extrusor de rosca dupla Clextral BC-45, é apresentada na Figura 8. Verifica-se nessa figura, que maiores percentagens de amilopectina nos amidos diminuem a expansão e que o efeito da temperatura é significativo para amidos com maior quantidade de amilose.

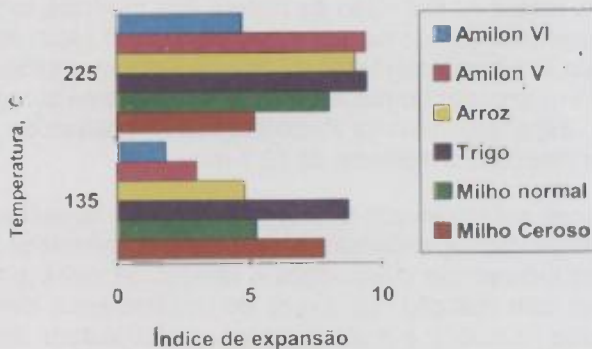


Figura 8. Índices da expansão de diferentes tipos de amidos à temperatura de 135°C e 225°C num extrusor de dupla rosca Clextral BC-45. (Mercier & Feillet, 1975).

4.2. Coesividade e Força Mecânica

As propriedades mecânicas dos produtos extrudados são geralmente caracterizadas usando testes de impacto mecânico como o "Kramer Shear Press" e o "Instron Universal" que medem a velocidade de deformação do produto extrudado. É chamada de "força de quebra", a energia necessária para induzir a quebra dos extrudados. A força (resistência) associada à textura pode ser descrita pela deformação compressiva de sólidos, quando submetidos à alta pressão (esforço). As propriedades mecânicas dos alimentos sob alto grau de esforço correspondem mais de perto às propriedades sensoriais de crocância ("crunchiness"), uma vez que a mastigação envolve uma deformação com alto grau de esforço, (Bhattacharya *et al.*, 1986a, 1987b).

Faubion (1982) estudou o efeito da adição de proteína na extrusão de amido e farinha de trigo. O efeito causado no produto extrudado dependeu do tipo e da concentração de proteína adicionada. O uso de 11% de glúten reduziu a expansão e a textura, enquanto que, em concentrações equivalentes, o isolado protéico de soja teve efeito inverso. As Figuras 9-a e 9-b mostram a variação da força de quebra de extrudados de amido de trigo com vários níveis de adição de isolado protéico de soja e glúten, respectivamente.

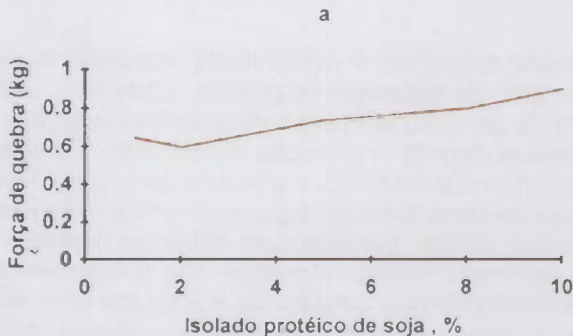


Figura 9a. Variação da força de quebra de extrudados de amido de trigo com vários níveis de isolado protéico e soja adicionado, Faubion (1982)



Figura 9b. Variação da força de quebra de extrudados de amido de trigo com vários níveis de glúten adicionado, Faubion (1982).

A extrusão em níveis crescentes de umidade parece ser prejudicial à capacidade do extrudado de resistir às forças de cisalhamento e de quebra.

4.3. Forma

A forma do produto extrudado é determinada basicamente pela geometria da matriz e pelo grau de expansão do produto. Entretanto, a reprodutibilidade da geometria de um extrudado depende principalmente das propriedades reológicas da massa durante o processo de extrusão. Foi observado que a forma da matriz influencia o formato e a textura do produto final. Os orifícios da matriz que apresentam diminuição gradual formam extrudados com uma superfície mais lisa; porém, matrizes com mudança brusca e comprimento curto, causam um maior estrago mecânico nos componentes do alimento (maior grau de cisalhamento), conduzindo a produtos com estrutura de célula mais finas, textura mais macia (aspecto esponjoso), poros pequenos, maior solubilidade e menor resistência mecânica.

4.4. Solubilidade

As principais propriedades funcionais dos amidos extrudados, quando dispersos em excesso de água, são a absorção de água e a solubilidade em água.

Como é conhecido, o amido nativo quase não absorve água à temperatura ambiente e sua contribuição para a viscosidade é praticamente zero. Entretanto, o amido extrudado absorve água rapidamente, formando uma pasta à temperatura ambiente, sem qualquer aquecimento. Esta pasta é formada pelas macromoléculas solubilizadas e também incluem partículas entumescidas por água (gel). Essas propriedades são fortemente influenciadas pelo tamanho de partícula: quanto menores as partículas, maiores serão a velocidade e o nível de solubilização. O Índice de Absorção de Água (IAA) é o peso do gel obtido por grama de amostra seca, e é geralmente determinado pelo método de Anderson *et al.* (1969). O valor do IAA correlaciona bem com a viscosidade da pasta a frio, porque apenas os grânulos de amido danificados absorvem água e incham à temperatura ambiente, resultando no aumento da viscosidade. Após atingir um máximo, com relação ao grau de amido danificado, o IAA diminui com o início da dextrinização.

O Índice de Solubilidade em Água (ISA) expressa a porcentagem da matéria seca recuperada após evaporação do sobrenadante da determinação de absorção de água (Anderson, 1969). O ISA está relacionado com a quantidade de moléculas solúveis na amostra seca e mede a dextrinização. A solubilidade em água do amido está também relacionada com a expansão e segue as mesmas variações com as condições de extrusão. A característica de "grudento" de alguns produtos extrudados de amido está relacionada com a sua alta solubilidade. Este problema pode ser reduzido complexando-se a amilose solúvel com ácidos graxos ou monoglicerídeos, os quais atuam simultaneamente no retardamento da retrogradação do material extrudado.

Foram observadas diferenças marcantes entre amidos extrudados quando foram usados amidos com relações diferentes de amilose/amilopectina.

Alguns autores têm mostrado que, durante o processo de extrusão, o amido forma novas estruturas, similares ao complexo amilose butanol. Esta estrutura aparece a 135°C para os amidos de milho normal, trigo e arroz (22-25% de amilose), à 90°C para Amylon V (52% de amilose) e a 70°C para Amylon VII (61% de amilose), e não foi observado para milho ceroso. Os efeitos do conteúdo de amilose do amido nas características dos produtos extrudados foram estudados à 135 e 225°C, e são representadas nas Figuras 10-a, 10-b, e 10-c. (Charbonniere *et al.*, 1973; Chinnaswamy e Hanna, 1988a,b).

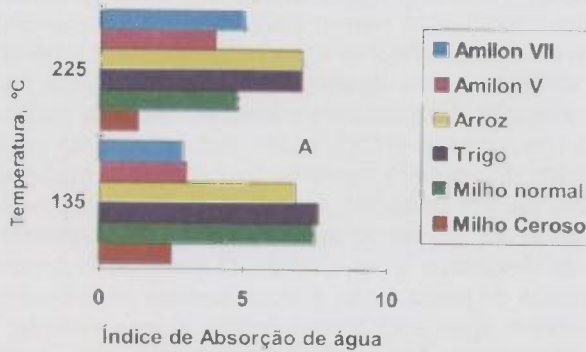


Figura 10a. Efeito do conteúdo de amilose na absorção de amidos extrudados a 135°C e 225°C, Charbonniere *et al.* (1973).

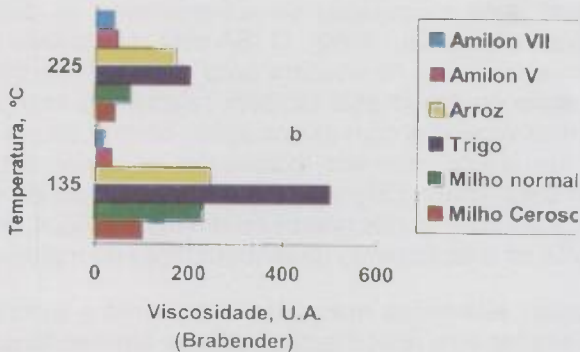


Figura 10b. Efeito do conteúdo de amilose na viscosidade de amidos extrudados a 135°C e 225°C, Charbonniere *et al.* (1973).

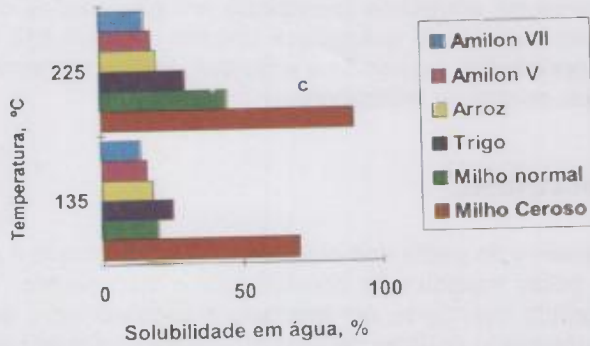


Figura 10c. Efeito do conteúdo de amilose na solubilidade em água de amidos extrudados a 135°C e 225°C, Charbonniere *et al.* (1973).

É bem aceito que o ISA aumenta com a severidade do tratamento térmico. Vários trabalhos usando grits de milho, amido de milho e amido de trigo, mostraram que o ISA aumentou com decréscimo do conteúdo de umidade.

Entretanto, observa-se que o nível de cisalhamento no corpo do extrusor também é um fator importante. Foi verificado que a redução do ISA da farinha de trigo, causado pelo aumento do conteúdo de umidade de 0 a 25% foi maior usando-se parafuso de alto cisalhamento (variando de 46,4% a 23,8%) que o de baixo cisalhamento (variando de 38,9 a 24,6%). Em relação à temperatura de extrusão, os ISA de vários produtos, (grits de milho e sorgo, arroz, farinhas de trigo, centeio, cevada e aveia, semolina de trigo) atingiram valores máximos a 180-200°C. Uma queda foi observada à temperaturas maiores devido à intensa degradação do amido. Tanto os valores de IAA como os de ISA podem ser interpretados com base nas interações amido-água, as quais são governadas pela estrutura da fase sólida do amido processado.

Baixos valores de IAA refletem o restrito acesso da água aos amidos extrudados, atribuída a uma estrutura compacta. Por outro lado, a solubilidade pode ser relacionada ao menor peso molecular dos componentes do amido, que podem ser separados muito facilmente uns dos outros devido à mais limitada interação entre eles.

Os valores de ISA e IAA podem ser utilizados para estimar a adequabilidade do uso de produtos amiláceos extrudados em suspensões ou soluções. As aplicações em meios com quantidade limitada de água são baseadas nessas duas propriedades funcionais e envolvem frequentemente a capacidade de ligação das pontes de hidrogênio.

4.5. Espessamento

O comportamento da pasta dos produtos à base de amido é geralmente caracterizado pelas medidas de consistência e viscosidade. A consistência pode ser medida usando-se por exemplo o consistômetro de Botwick, que mede o comprimento do fluxo de uma suspensão hidratada sobre um plano horizontal. Porém, a maioria dos resultados são expressos em termos de consistência Brabender, a uma determinada temperatura, ou pela curva de consistência versus temperatura, usando o viscoamilógrafo Brabender. Mais recentemente, os pesquisadores vem usando um novo viscosímetro: o Rapid Visco Analyzer (RVA) cujas vantagens na determinação da consistência são significativas, tanto em relação ao menor tempo da análise (aproximadamente 10-14 min.) quanto à pequena quantidade (1-3 g) de amostra necessária (Walker *et al.*, 1988).

O comportamento dos amidos extrudados durante o aquecimento, em excesso de água, como pode ser observado com o viscoamilógrafo Brabender, é caracterizado pela ausência de um pico de gelatinização durante o aquecimento, pela alta viscosidade a frio (antes do aquecimento), pelo declíneo contínuo da viscosidade de 50 a 96°C, e pelo forte decréscimo da viscosidade no intervalo de 90-96°C com um ponto de inflexão (Figura 11). A viscosidade da pasta a frio depende principalmente do grau de gelatinização dos grânulos de amido e da extensão de sua quebra molecular durante o processo de extrusão. A viscosidade da pasta a frio se refere à viscosidade da suspensão amido-água à temperatura ambiente, sem necessidade de aquecimento. Foi observado que a viscosidade inicial a frio aumentou até atingir um valor máximo, e então decresceu com o aumento da severidade da extrusão.

Analisando-se as curvas da Figura 11, observa-se que a viscosidade da pasta de amido extrudado decresce gradualmente com o aumento da temperatura; entretanto, à temperatura em torno de 85-90°C, ocorreu uma queda acentuada, sugerindo a ocorrência de uma transição estrutural. Essa transição seria análoga à que ocorre no segundo estágio de entumescimento-solubilização de amidos nativos de cereais e leguminosas, a qual é

baseada na transição estrutural que envolve a organização e distribuição do amido na suspensão. Portanto, o tratamento de suspensões aquosas e amidos modificados termicamente (extrudados, no caso) à temperatura inferiores à 85°C levaria a pastas com propriedades reológicas relacionadas com a absorção de água das partículas sólidas, que seriam determinadas principalmente pela porosidade das mesmas.

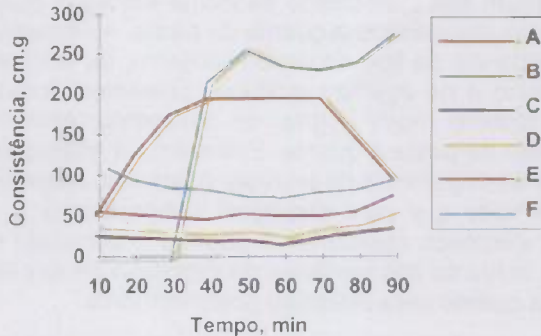


Figura 11. Influência das condições de extrusão nos viscoamilogramas dos amidos de trigo nativo e extrudados:

A= Curva da temperatura do viscoamilógrafo (Temp. máx. 95 °C)

B= Curva do trigo nativo

C= 180°C, 23,9% umidade

D= 130°C, 24,4% umidade

E= 180°C, 34,7% umidade

F= 125°C, 34,7% umidade, Walker *et al.* (1988).

Por outro lado, a formação da pasta do mesmo amido extrudado à temperatura superior a 90°C, levaria a suspensão com maior número de moléculas solubilizadas. Foi verificado que os valores da viscosidade a frio de pastas de amido extrudados dependem do conteúdo de umidade inicial do produto antes da extrusão, da temperatura do processo e também da rotação da rosca. Porém, o efeito das variáveis do processo nas características do produto extrudado será abordado posteriormente. Os valores máximos da viscosidade da pasta a frio foram obtidos quando o amido, na extrusão apresentava conteúdo de umidade inicial de 17-24% e temperaturas de 160 a 205°C, sendo usado amido de milho e extrusor Brabender de rosca única.

Fora dessas condições citadas observou-se uma redução dos valores da viscosidade a frio. A viscosidade da pasta a quente pode ser medida após o aquecimento de uma suspensão em um reator com termostato ou após o ciclo de aquecimento no viscoamilógrafo Brabender. Os grânulos de amido pré-gelatinizados na extrusão, que resultaram da quebra da estrutura e desintegração, perdem sua capacidade de inchar em água quente, o que causa a diminuição da viscosidade a quente da pasta. A intensidade dessa quebra do amido depende do tipo de amido (origem), da temperatura, do cisalhamento mecânico e de agentes químicos presentes durante a gelatinização do amido. Quanto maior o grau de cozimento (gelatinização), menor será a viscosidade da pasta a quente. Entretanto, a interação entre a velocidade da rosca e a temperatura do extrusor é também altamente significativa. Porém, foi observado que para quaisquer temperaturas, a viscosidade da pasta a quente decresce rapidamente quando o conteúdo de amilose aumenta. O efeito conjunto das variáveis do processo de extrusão nos valores da viscosidade a quente será discutido posteriormente.

Comparando-se com produtos obtidos por outros tratamentos, a principal diferença dos amidos extrudados foi sua reduzida viscosidade de pasta. Em contraste, eles mostraram baixa dispersão em água fria, porém rápida dispersão em água quente, formando produtos de várias consistências, o que permite seu uso industrial em alimentos instantâneos. Comparando-se amidos após a secagem em rolos, com amidos após o cozimento por extrusão, num mesmo nível de absorção de água, observou-se que a solubilidade em água tendeu a ser maior nos amidos que sofreram o cozimento por extrusão, porém suas viscosidades após cozimento foram normalmente inferiores.

Foi observado também que a retrogradação das pastas de amido extrudadas é função, principalmente, do conteúdo de umidade, temperatura e velocidade de rotação do extrusor. Amidos com altos conteúdos de umidade produziram extrudados com alta capacidade de retrogradação, usando-se rotação da rosca moderada; porém, os extrudados de amido com baixo conteúdo de umidade, apresentaram capacidade de retrogradação muito baixa.

5. EFEITO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE EXTRUSÃO NAS TRANSFORMAÇÕES (PROPRIEDADES FUNCIONAIS) DO AMIDO

As características funcionais dos amidos podem ser alteradas pelas condições de extrusão, dependendo dos parâmetros operacionais do processo (conteúdo de umidade inicial, temperatura do extrusor, rotação da rosca, diâmetro da matriz, fluxo de massa e configuração da rosca), dos parâmetros do sistema (grau de alinhamento, temperatura do produto, tempo de residência e pressão do sistema) e dos parâmetros estruturais (ligados à matéria prima). Essas variáveis são responsáveis pela extensão da quebra estrutural do amido, da qual depende, entre outros fatores, o comportamento de solubilidade e viscosidade do produto extrudado. Os parâmetros operacionais e estruturais do sistema, envolvidos no processo de extrusão, determinam reações muito complexas, que resultam numa diferenciação limitada da influência individual das variáveis, nas mudanças das características finais do amido extrudado.

5.1. Influência das variáveis operacionais na transformação (propriedades funcionais) do amido

A literatura científica sobre extrusão tem descrito até agora principalmente as propriedades físicas e químicas dos produtos extrudados, as quais resultam do uso de condições específicas de extrusão em diversos tipos de extrusores. Entre as condições operacionais de extrusão, são de fundamental importância no controle do processo especialmente a temperatura do extrusor, o conteúdo de umidade da matéria-prima e a rotação da rosca.

5.1.1. Rotação da rosca

O aumento da rotação da rosca tem como efeitos primeiramente o aumento do grau de cisalhamento e em segundo lugar o decréscimo do tempo de residência. Como esses dois efeitos são competitivos, os resultados experimentais não são muitas vezes óbvios.

O aumento da rotação da rosca, mantida a vazão de alimentação, diminui o volume do material no extrusor causando o decréscimo do tempo de residência. Alguns estudos mostraram que, quando a rotação da rosca foi

aumentada, observou-se pequena queda na pressão e temperatura, enquanto outros afirmam que elas permaneceram bem estáveis. Usando extrusor Brabender de rosca única, à temperatura constante de 250°C, e a um baixo conteúdo de umidade, as mudanças na rotação da rosca não resultaram em mudanças no grau de gelatinização do amido de milho; entretanto à medida em que o conteúdo de umidade da matéria-prima aumentou, o efeito da rotação da rosca tornou-se mais crítico, e aumentos relativamente pequenos na rotação resultaram no aumento no grau de gelatinização, evidenciado pelo abaixamento da viscosidade da pasta a quente. A baixas rotações foram obtidos graus de gelatinização mínimos, na faixa de temperaturas de 145-205°C. O trabalho feito por Chiang (1977), usando o extrusor Brabender de rosca única, mostrou que à medida em que a rotação da rosca aumentou, o grau de gelatinização do amido decresceu (Figuras 12-a, 12-b e 12-c).



Figura 12a. Efeito da rotação da rosca na gelatinização do amido (18% de umidade), Chiang (1977).

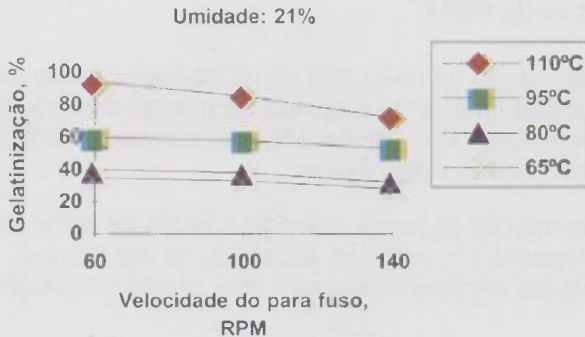


Figura 12b. Efeito da rotação da rosca na gelatinização do amido (21% de umidade), Chiang (1977).

O aumento da rotação da rosca diminuiu o tempo de retenção da amostra no extrusor, causando um decréscimo na gelatinização do amido.

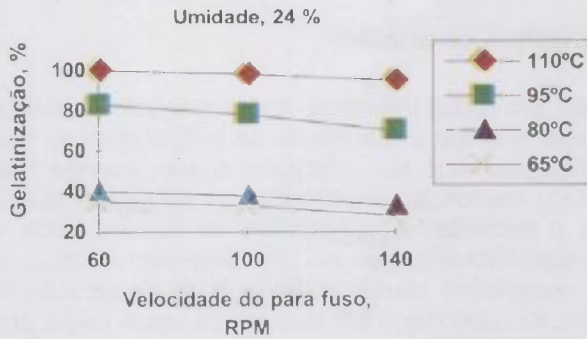


Figura 12c. Efeito da rotação da rosca na gelatinização do amido (24% de umidade), Chiang (1977).

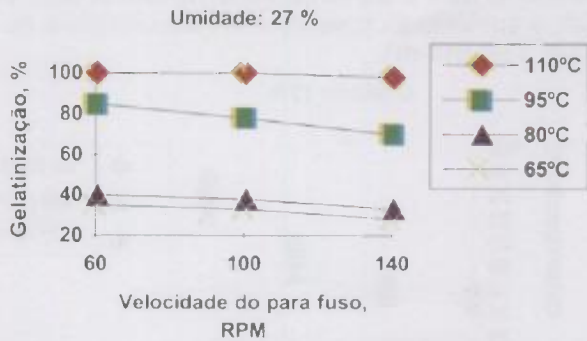


Figura 12d. Efeito da rotação da rosca na gelatinização do amido (27% de umidade), Chiang (1977).

Entretanto, alguns estudos recentes, também usando extrusor de rosca única, mostraram que a transformação do amido de trigo aumentou com o aumento da rotação da rosca. Conseqüentemente, a modificação na rotação

da rosca tem dois efeitos opostos: no grau de cisalhamento e no tempo de residência. Como consequência podem ser obtidos vários resultados com relação à transformação do produto e das características funcionais do amido.

5.1.2. Temperatura do extrusor

Foi confirmado, em vários trabalhos, que o aumento da temperatura da camisa do extrusor provoca um aumento na temperatura do produto na mesma ordem, principalmente por condução, o que acarreta o decréscimo na viscosidade sem mudanças importantes no tempo de residência. Consequentemente, o aumento na temperatura da camisa tende a produzir um produto mais transformado, mas em uma extensão limitada, pelo fato da diminuição da viscosidade causar o decréscimo na geração de calor. Esse comportamento foi confirmado em extrusor de rosca única, observando-se a diminuição da viscosidade intrínseca do amido de trigo com o aumento da temperatura da camisa. O trabalho feito por Chiang (1977), usando o extrusor Brabender de rosca única, mostrou que a gelatinização do amido aumentou bruscamente com o aumento de temperatura, para umidade de 24 ou 27%; porém, o aumento foi mais intenso para umidades de 18 e 21% (Figuras 13-a, 13-b, 13-c e 13-d).

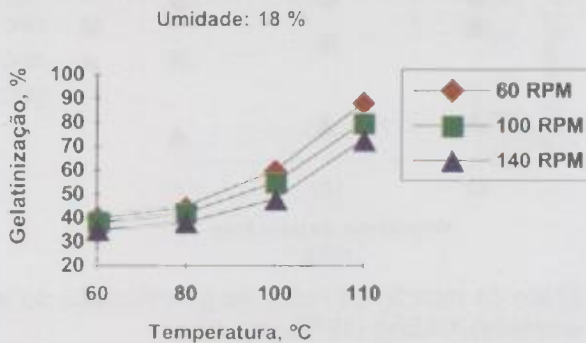


Figura 13a. Efeito da temperatura na gelatinização do amido (18% de umidade), Chiang (1977).

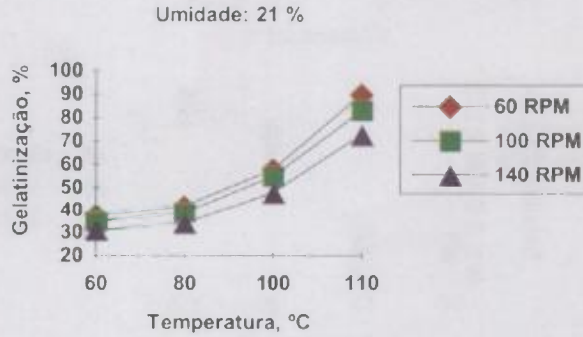


Figura 13b. Efeito da temperatura na gelatinização do amido (21% de umidade), Chiang (1977).

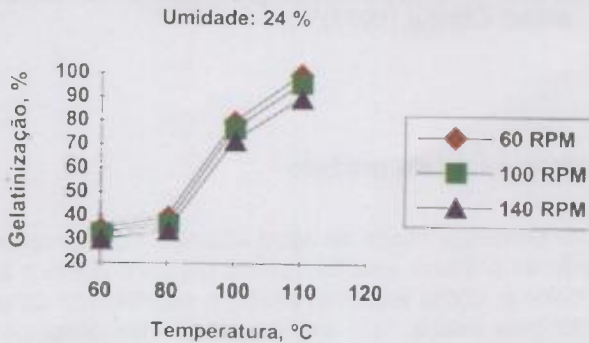


Figura 13c. Efeito da temperatura na gelatinização do amido (24% de umidade).

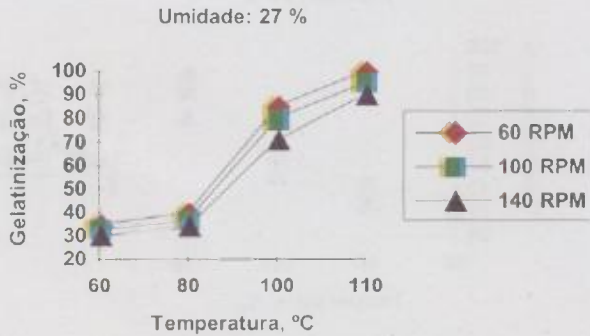


Figura 13d. Efeito da temperatura na gelatinização do amido (27% de umidade), Chiang (1977).

5.1.3. Umidade inicial do produto

O aumento do conteúdo inicial de água acarreta normalmente o decréscimo na viscosidade do produto, que tem como primeiro efeito o abaixamento da geração de calor e, como segundo efeito, o decréscimo da pressão do produto na saída pela matriz. Isto explica porque temperatura e pressão decrescem quando o conteúdo de água aumenta. Devido ao decréscimo na temperatura, a transformação do produto é geralmente também diminuída. O trabalho feito por Chiang (1977), usando extrusor Brabender de rosca única, mostrou que a gelatinização do amido decresceu ligeiramente com o aumento do conteúdo de umidade a baixas temperaturas de extrusão (65 e 80°C); porém, a temperaturas mais altas (95-110°C), o aumento do conteúdo de umidade aumentou significativamente a gelatinização do amido (Figuras 14-a, 14-b, 14-c e 14-d).

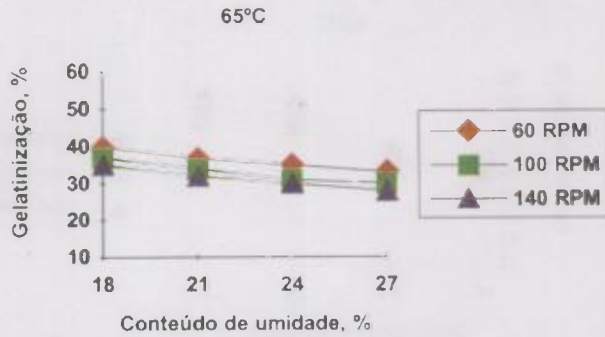


Figura 14a. Efeito do conteúdo de umidade inicial na gelatinização do amido (a 65°C).

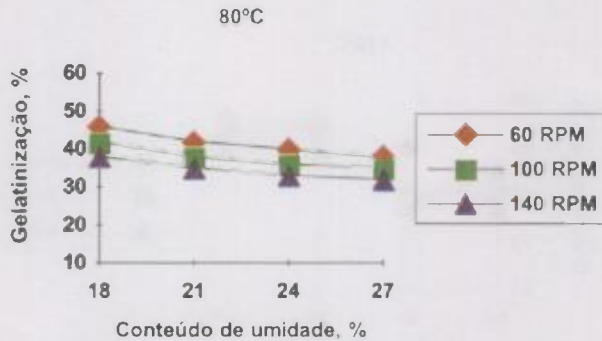


Figura 14b. Efeito do conteúdo de umidade inicial na gelatinização do amido (a 80°C).

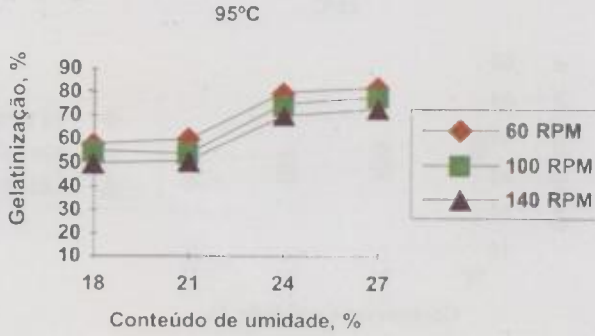


Figura 14c. Efeito do conteúdo de umidade inicial na gelatinização do amido (a 95°C), Chiang (1977).

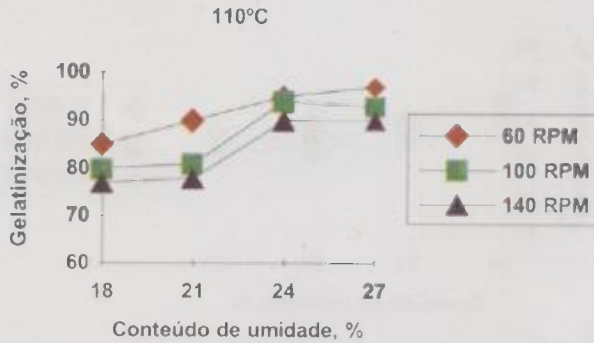
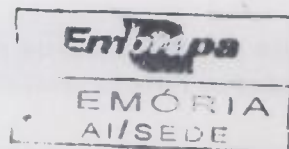


Figura 14d. Efeito do conteúdo de umidade inicial na gelatinização do amido (a 110°C), Chiang (1977).



5.1.4 Matriz

A matriz, além de responsável pelo formato final do extrudado, tem também a importante função de restringir (limitar) o fluxo do material em extrusão, causando o desenvolvimento de pressão e cisalhamento necessários antes da saída do produto. Esses efeitos produzidos pela matriz podem ser maiores ou menores, dependendo do tipo de produto que se deseja produzir. Para a produção de alimentos expandidos e secos para animais, a matriz final pode ser simples, composta de uma peça única contendo um número pré-determinado de orifícios. Entretanto, para a produção de "snacks" e "breakfast cereals", a matriz pode ser composta de duas ou mais peças, onde a primeira aumenta a resistência ao fluxo e ajuda a aumentar o cisalhamento do produto extrudado, e segunda tem a função de dimensionar e dar forma ao extrudado forçando-o a passar através de um número pré-determinado de orifícios. No trabalho feito por Chiang (1977), usando extrusor de rosca única, foi estudado o efeito do tamanho da matriz do extrusor na gelatinização do amido. Foi usada farinha de trigo condicionada a 20% de umidade, rosca com taxa de compressão de 3:1, 100 rpm e temperatura de 100°C. Nestas condições foi observado que, à medida que o tamanho da matriz aumentou, a gelatinização do amido diminuiu (Figura 15). Provavelmente os decréscimos na pressão e no grau de cisalhamento causaram diminuição da gelatinização do amido devido ao menor tempo de residência da farinha no extrusor.

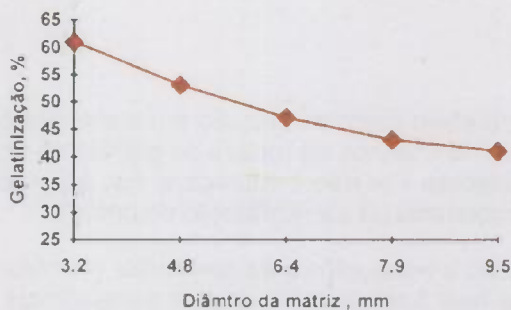


Figura 15. Efeito do diâmetro da matriz na gelatinização do amido, Chiang (1977).

5.2. Efeito dos Parâmetros do Sistema na Transformação (Propriedades Funcionais) do Amido

Os parâmetros do sistema que correspondem às variáveis operacionais que levam a introdução de energia, estas são: temperatura do produto, pressão do sistema, taxa de cisalhamento e tempo de residência.

5.2.1. Temperatura do produto

É conhecido que a temperatura da massa participa na ruptura dos grânulos de amido pelo processo da gelatinização. Este fenômeno ocorre a temperatura que depende do conteúdo de umidade: maiores teores de água possibilitam uma menor temperatura de gelatinização. A alteração na temperatura modifica as propriedades reológicas, as quais geralmente induzem mudanças no tempo de residência.

Em extrusores de rosca única, a temperatura do produto aumenta regularmente ao longo do extrusor: em caso de "grits" de milho, as temperaturas são de até 175-210°C. No caso de extrusores de rosca dupla (mesmo sentido), a temperatura do produto aumenta principalmente na última parte da rosca, anterior à matriz, e quando o produto sai pela matriz é então normalmente registrada um queda de temperatura de 10-20°C. Os valores máximos de temperatura estão entre 150 e 210°C dependendo do produto que está sendo extrudado (grits de milho, amido de trigo e amido de milho) : o valor mais baixo (100°C) foi citado para amido de batata.

5.2.2. Pressão

Nunca foi descrito o efeito direto da pressão em si em relação à transformação do produto, nem em termos da ruptura do grânulo de amido, nem como degradação da molécula. Por isso é improvável que a pressão tenha diretamente um efeito importante na transformação do produto.

Entretanto, a pressão é necessária para compactar o amido e para que possa ser obtida uma fase fundida contínua pela transferência e pela geração de calor, e uma mudança na pressão deve ser equilibrada pela mudança no comprimento da seção que contém o produto fundido, a qual induz uma mudança no tempo de residência.

5.2.3. Cisalhamento

Não é possível uma medida direta do cisalhamento. Porém, o efeito indireto de alto grau de cisalhamento é o aumento da temperatura pela alta geração de calor, devido à natureza macromolecular do amido.

5.2.4. Tempo de residência

A distribuição do tempo de residência é geralmente estudada pela adição de traços de corante no produto na etapa de alimentação. Em escala de laboratório, extrusores de rosca única usando produtos amiláceos, tem o tempo de residência médio de cerca de 30 a 80 segundos. Em extrusores de rosca dupla (que giram na mesma direção) e com produtos amiláceos, o tempo de residência médio variou de 10 a 40 segundos. Em máquinas maiores este valor pode ser entre 40 e 50 segundos (Clextral BC e BC 105). O efeito do tempo na transformação do produto é óbvio: quanto maior for o tempo, mais o produto é transformado, o que tem sido constatado por vários autores com diversos produtos.

6. OTIMIZAÇÃO DA EXTRUSÃO. ESCOLHA DAS CONDIÇÕES DO PROCESSO

A maioria dos estudos sobre otimização do processo e sobre os fenômenos básicos que ocorrem dentro do extrusor são recentes, particularmente dentro do campo da extrusão de rosca dupla. O grande desafio é ser capaz de escolher racionalmente as condições do processo, de modo que se obtenha o produto final com a qualidade desejada.

6.1. Estudo dos parâmetros

O primeiro caminho para se conhecer o efeito dos parâmetros do processo numa determinada propriedade funcional é processar as amostras em diversas condições diferentes e plotar a propriedade medida em função das variáveis modificadas. Este foi o primeiro caminho nos estudos sobre a extrusão e está ainda em uso atualmente, particularmente quando se deseja conhecer propriedades específicas. Como foi mostrado na parte prévia do trabalho, os resultados são geralmente difíceis de generalizar por não se considerar frequentemente a interação entre os parâmetros do processo.

6.2. Metodologia de superfície de resposta

Outro caminho que tem sido usado é a aplicação da metodologia de superfície de resposta, que possibilita observar as mudanças nas características do extrudado com mudanças em duas variáveis ao mesmo tempo. O princípio básico da metodologia de superfície de resposta é relacionar as propriedades do produto (mecânicas, funcionais, nutricionais e sensoriais) e as variáveis do processo (geometria do extrusor e da rosca, características da matéria-prima, variáveis de operação com o grau de alimentação, velocidade da rosca, temperatura da camisa do extrusor) por meio de equações de regressão multiquadráticas que possibilitam descrever as interrelações entre os parâmetros que apresentem uma formulação matemática simples (Cochran, & Cox, 1957). Os dados são geralmente obtidos após a concepção de um delineamento experimental, com o número mínimo de experimentos possível. Os resultados são representados pelo mapeamento da superfície de resposta que resume graficamente a evolução de uma propriedade com dois parâmetros do processo. As principais limitações desta metodologia são a pré-definição do intervalo de variáveis de estudo e a dependência dos resultados da equação modelo pressuposta. Além disso, não se tem informação sobre as variáveis do processo que não estão incluídas no delineamento experimental, mesmo que seus efeitos sejam importantes.

A partir da década de 70 têm sido publicados trabalhos sobre a extrusão de amidos e produtos amiláceos usando a metodologia de superfície de resposta. A maioria dos trabalhos tem mostrado os efeitos de variáveis de extrusão como (tais como temperatura, umidade de alimentação, rotação da rosca) nas características do produto final (tais como, Índice de absorção de água, índice de solubilidade em água, viscosidade após cozimento, susceptibilidade enzimática, textura no Instron Universal e sensorial, densidade aparente, índice de expansão, entre outros de particular interesse).

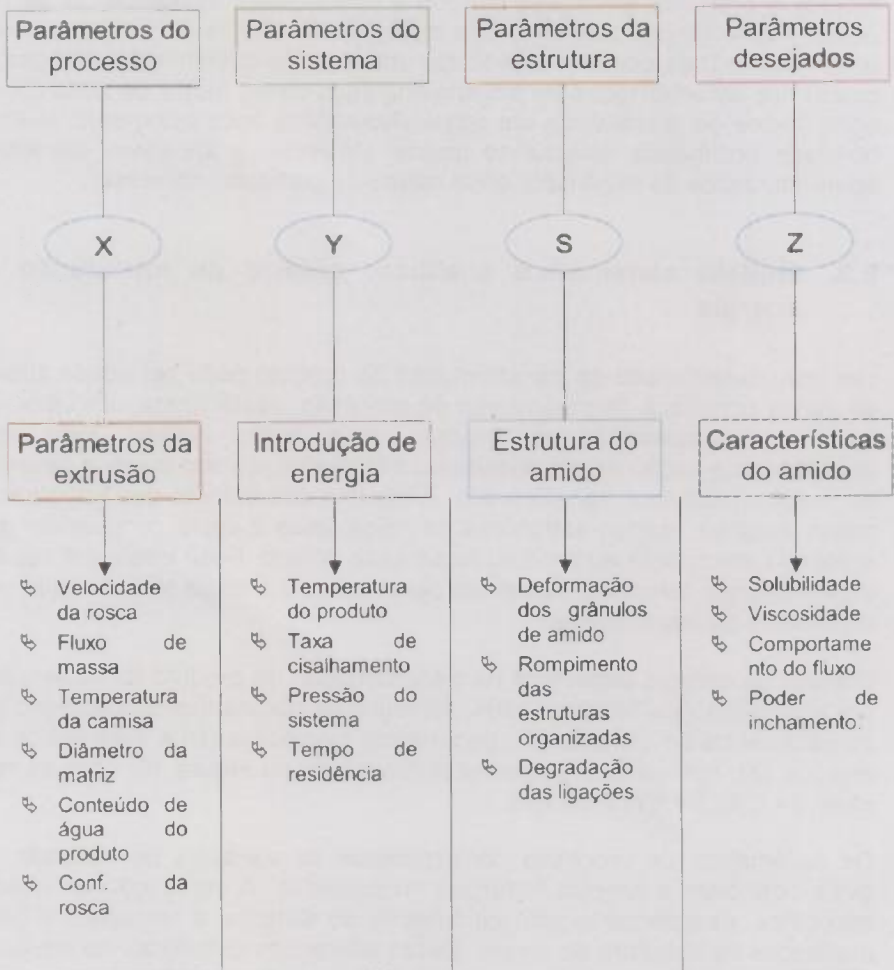
6.3. Modelo sistemático analítico: critério de introdução de energia

Um grau determinado de transformação do produto pode ser obtido através de vários conjuntos de parâmetros de processo, desta forma, um valor que reflita a transformação do produto seria muito valioso. Este valor quantificaria a noção de severidade do tratamento: quanto maior a severidade, mais o produto é transformado. A maioria dos autores que trabalharam nesse assunto, usando extrusores de rosca única e dupla, propuseram que a energia adicionada ao produto fosse esse critério. Essa energia é separada em energia mecânica (fornecida pelo motor) e energia térmica (que vem do sistema de aquecimento).

O efeito da energia específica na transformação do produto foi evidenciada por alguns autores. Meuser (1984) distingue os parâmetros do processo (X), os parâmetros do sistema (Y), parâmetros estruturais (S) e parâmetros desejados (Z), conforme o esquema apresentado na Figura 16, com as relações: $Z = f(S)$, $S = f(Y)$ e $Y = f(X)$.

Os parâmetros do processo correspondem às variáveis de extrusão, as quais controlam a energia fornecida no processo. A introdução da energia específica, caracterizada pelo parâmetros do sistema, é responsável pelas mudanças da estrutura do amido. Essas alterações estruturais do amido influenciam as suas características finais no produto extrudado.

Assim, é possível conhecer o efeito dos parâmetros de extrusão (diâmetro da matriz, temperatura da camisa e conteúdo de umidade) na energia mecânica específica fornecida ao sistema, e também o efeito da energia na solubilidade do amido extrudado.



Relações: $Z = F(S)$, $S = F(Y)$, $Y = F(X)$

Figura 16. Esquema do equacionamento dos parâmetros de extrusão e seus respectivos efeitos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ-MARTINEZ, L.; KONDURY, K.P.; HARPER, J.M. A General model for expansion of extruded products. **J. Food Sci.**, v.53, n 2, p. 609-15, 1988.
- ANDERSON, R.A.; CONWAY, H.F.; PFEIFER, V.F.; GRIFFIN, L. Jr. Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion-cooking. **Cereal Science Today**, v.14, n.1, 4-11, 1969.
- ANTILA, J.; PIPATTI, R.; LINKO, P. Process control and automation in extrusion cooking IN: THERMAL PROCESSING AND QUALITY OF FOOD. London: Elsevier Appl. Sci., 1984. p.44-8
- ASCHERI, J.L.R.; CIACCO, C.F.; RIAZ, M.N.; LUSAS, E.W. Efecto de la formulación sobre la expansión y viscosidad de "snacks" (pellets) producidos por extrusión termoplástica. **Alimentaria**, n. 268, n.12, p. 111-17, 1995.
- BEN-GERA, I.; KEARNS, J. Production of third generation snacks pellets through extrusion cooking. IN: SNACK EXTRUSION COOKING SEMINAR, 3-5 Nov. 1980, Solingen. **Proceeding**. Solinger: ZDS, 1980.
- BHATTACHARYA, M.; HANNA, M.A. Textural properties of extrusion cooked corn starch. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v. 20, n.4, p.195- 201, 1987b.
- BHATTACHARYA, M.; HANNA, M.A.; KAUFMAN, R.E. Textural properties of extruded plant protein blends. **J. Food Sci.**, v. 51, p. 988, 1986a.
- BURROS, B.C.; YOUNG, L.A.; CARROAD, P.A. Kinetics of corn meal gelatinization at high temperature and low moisture. **J. Food Sci.**, v. 52, p.1372, 1987.
- CAMIRE, M.E.; CAMIRE, A.; KRUMHAR, K. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 29, n.1, p. 35-57, 1990.
- CARR, M.E.; BLACK, L.T.; BAGBY, M.D. Continuous enzymatic liquefaction of starch for saccharification. **Biotechnol. Bioeng**, v. 24, p. 2441-9, 1982.

- CASE, S.E.; HAMANN, D.D.; SCHWARTZ, S.J. Effect of starch gelatinization on physical properties of extruded wheat- and corn-based products. **Cereal Chem.**, v. 69, n.4, p. 401-4, 1992.
- CHANDRASHEKAR, A.; KIRLEIS, A.W. Influence of protein on starch gelatinization in sorghum. **Cereal Chem.**, v. 65, p. 457, 1988.
- CHARBONNIERE, R.; DUPRAT, P.; GUILBOT, A. Changes in various starches by extrusion cooking II. Physical structures of extruded products. **Cereal Sci. Today**, v.18, p. 226, 1973
- CHEFTEL, J.C. Nutritional effects of extrusion-cooking. **Food Chem.**, v. 20, p. 263, 1986.
- CHIANG, B.Y.; JOHNSON, J.A. Gelatinization of the starch in extruded products. **Cereal Chem.**, v. 54, n. 3, p. 436-43, 1977.
- CHINNASWAMY, R.; HANNA, M.A. Optimum extrusion-cooking conditions for maximum expansion of corn starch. **J. Food Sci.**, v. 53, n. 3, p. 834-40, 1988a.
- CHINNASWAMY, R; HANNA, M.A. Relationship between amylose content and extrusion-expansion properties of corn starches. **Cereal Chem.**, v. 65, n. 2, p. 138-43, 1988.
- CLARK, J.P. Texturization process in the cereal foods industry. **Food Technol.**, March, p. 91-93, 1986.
- COCHRAN, W.G.; COX, G.M. **Experimental designs**. 2. ed. New York: Jonh Wiley & Sons, 1957. p. 396-99.
- COLONA, P.; MERCIER, C. Macromolecular modification of manioc starch componentes by extrusion-cooking with and without-lipids. **J. Carbohydrate Polymers**, v. 3, p. 87-108, 1983.
- De la GUERIVIERE, J.F.; MERCIER, C.; BAUDET, L. Incidences de la cuisson-extrusion sur certains parametres nutritionnels de produits alimentaires notamment cerealiers. **Cah. Nutr. Diet**, v. 20, p. 201, 1985.
- DONOVAN, J.W.; MAPES, C.J. Multiple phase transitions of starches and naegeli amyloextrins. **Starch**, v. 32, p. 190, 1980.

- EVANS, I.D.; HAISMAN, D.R. The effect of solutes on the gelatinization temperatures of starches in water. **Starch**, v. 34, p. 233, 1982.
- FALCONE, R.G.; PHILLIPS, R.D. Effects of feed composition, feed moisture, and barrel temperature on the physical and rheological properties of snacks-like products prepared from cowpea and sorghum flours by extrusion. **J. Food Sci.**, v. 53, n. 5, p. 1464-9, 1988.
- FAUBION, J. M.; HOSENEY, R.C.; SEIB, P.A. Functionability of grain components in extrusion. **Cereal Foods World**, v. 27, n.5, p. 212-16, 1982.
- GOMEZ, M.H.; AGUILERA, J.M. A Physicochemical model for extrusion of corn starch. **J. Food Sci.**, v. 49, p. 40, 1984.
- GOMEZ, M.H.; WANISKA, R.D.; ROONEY, L.W.; LUSAS, E.W. Extrusion-cooking of sorghum containing different amounts of amylose. **J. Food Sci.**, v. 53, n.6, p. 1818-22, 1988.
- GUY, R.C.E.; HORNE, A.W. Extrusion and Co-Extrusion of cereals. In: **FOOD STRUCTURE: its creation and evaluation**. s.l.:s.ed. 1988. 349 p.
- HARPER, J.M. Food extruders and their applications. In: MERCIER, C., LINKO, P., HARPER, J.M. **Extrusion cooking**. St. Paul: AACC, 1989.
- KIRBY, A.R.; OLLETT, A.L.; PARKER, R.; SMITH, A.C. An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion-cooking of maize grits. **Journal of Food Engineering**, v. 8, p. 247-72, 1988.
- KUBOTA, J.; HOSOKAWA, Y.; SUZUKI, K.; HOSAKA, H. Studies on the gelatinization rates of rice and potato starches. **J. Food Sci.**, v. 44, p. 1394, 1979.
- LAUNAY, B.; KONE, T. Twin screw extrusion cooking of corn starch: flow properties of starch pastes. IN: **THERMAL PROCESSING AND QUALITY OF FOOD**. London: Elsevier Appl. Sci., 1984. p. 54-6.
- LAUNAY, B.; LISCH, J.M. Twin-screw extrusion cooking of starches: flow behaviour of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates. **J. Food Eng.**, v. 2, n. 4, p. 259, 1983.
- LEACH, W.; Mc COWEN, L.D.; SCHOCH, T.J. Structure of the starch granule. **Cereal Chem.**, v.36, p. 534-44, 1959.

- MÄLKI, Y.; KERVINEN, R.; OLKKU, J.; LINKO, P. Effects of monoglycerides during cooking extrusion of wheat flour. IN: BAKING AND EXTRUSION LIPID FORUM. Goteborg: Marcuse, 1984, p. 130-7.
- MERCIER, C. Effects of extrusion-cooking on potato starch using a twin screw french extruder. **Starch/Stärke**, v. 29, n. 2, p. 48-52, 1977
- MERCIER, C.; CHERBONNIERE, R.; GREBAUT, J.; DE LA GUERIVIERI, J. F. de la. Formation of amilose-lipid complexes by twin-screw extrusion-cooking of cereal products. **Cereal Chem.**, v. 57, n. 1, p. 4-9, 1980.
- MERCIER, C.; FEILLET, P. Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. **Cereal Chem.**, v.52, n. 3, p. 283-97, 1975.
- MEUSER, F.; KRUGER, E.; VAN LENGERICH, B.; GRONEICK, E. The use of HTST extrusion cooking of malt in beer production. IN: THERMAL PROCESSING AND QUALITY OF FOOD. London, Elseiver Appl. Sci: 1984. p. 127-38
- NOGUCHI, A.; MOSSO, C.; AYMARD, C.; JEUNINK, J.; CHEFTEL, J.C. Maillard reactions during extrusion-cooking of protein-enriched biscuits **Lebensm. Wiss. Technol.**, v. 15, p. 105, 1982.
- ONWULATA, C.I., MULVANEY, S.J., HSIEH, F. e HEYMANN, H. Step changes in screw speed affect extrusion temperature and pressure and characteristics **J. Food Sci.**, v. 57, n. 2, p. 512-15, 1992.
- PATONS, D.; SPRATT, W.A. Component interactions in the extrusion cooking process: influence of process conditions on the functional viscosity of the wheat flour system. **J. Food Sci.**, v. 49, p. 1380-5, 1984.

- PHAM, C.B.; ROSARIO, R.R. del. Studies on the development of texturized vegetable products by the extrusion process. III. Effects of processing variables of tiamin retention **J. Food Technol.**, v. 21, p. 569, 1986.
- WALKER, C.E.; ROSS, A.S.; WRIGLEY, C.W.; McMASTER, G.J. Accelerated characterization of starch-paste viscosity and set-back with Rapid Visco-Analyzer. **Cereal Foods World**, v. 33, p.491, 1988.
- WHISTLER, R.L.; PASCHALL, E.F. **Starch chemistry and technology**. New York: Academic Press, 1967. 2v.
- YEN, G.C.; LEE, T.C.; CHICHESTER, C.O. Effect of maillard browning reaction on the chemical properties of various proteins. IN: **PROTEIN QUALITY AND THE EFFECTS OF PROCESSING**. New York: Marcel Dekker, 1988.



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Tecnologia Agroindustrial de Alimentos
Ministério da Agricultura e do Abastecimento*

APOIO:

