



LUIS FELIPE SILVA MUNIZ

Estudo do comportamento reológico e efeito da temperatura de sistemas espumantes com adição de extrato da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiniflorum*).

LUIS FELIPE SILVA MUNIZ

Estudo do comportamento reológico e efeito da temperatura de sistemas espumantes com adição de extrato da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*).

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Romildo Martins Sampaio.

São Luís
2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silva Muniz, Luis Felipe.

Estudo do comportamento reológico e efeito da temperatura de sistemas espumantes com adição de extrato da polpa de cupuaçu *Theobroma grandiflorum* / Luis Felipe Silva Muniz. - 2022.

57 f.

Orientador(a): Romildo Martins Sampaio.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2022.

1. Comportamento Reológico. 2. Energia de ativação. 3. Fluido Pseudoplástico. 4. Polpa de Cupuaçu. 5. Sistema espumante. I. Martins Sampaio, Romildo. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. MARCELO FÁBIO LEONARDO
DEEQ/CCET/UFMA

07 de fevereiro de 2022

DADOS CURRICULARES**Luis Felipe Silva Muniz**

NASCIMENTO	11/09/1995 – CODÓ/MA
FILIAÇÃO	Maria Dilva Leite Silva Luis Cláudio Mota Muniz
2016/2021	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho a minha família,
minha namorada e meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade chegar até esta etapa e ficar próximo de realizar um grande sonho

Toda a minha família por compartilharem comigo os bons e péssimos momentos durante toda esta trajetória.

A minha namorada e companheira Fabíola Costa, que desde o início do curso estava do meu lado me apoiando em tudo e dando os melhores conselhos.

A minha mãe Maria Dilva, minha avó Maria Raimunda e minha tia Elenilde pelo apoio incondicional que me fizeram não desistir desse sonho.

Aos meus amigos de 2015.2 que estão comigo desde o início, Everton Holanda, Aline Medeiro, Paulo Sergio, Kelle Jéssica, Fernanda Hellen, Nielson Brito e Nilton Mafra. A todos meus amigos de 2016.1, onde me acolheram de uma forma espetacular no pior momento da minha vida, meus amigos Ivailson Lobo, Vinicius Melo, Vanessa Sousa, Jéssica Silva, Glaubert, Lailson Sousa, Pedro Cunha. O companheirismo de vocês me fortaleceu nessa caminhada.

Aos professores que foram importantes de alguma forma ao longo da minha formação acadêmica e pessoal, Profa. Dra. Lâmia Z. Linan, Prof. Dr. Marcelo F. Leonardo, Prof. Dr. Jaiver Efren James Figueiroa. O professor que me acolheu no início do curso Prof. Dr. Harvey Alexander Vila-Vellez que me deu todo auxílio necessário para chegar aonde estou.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Romildo Martins, por todo auxílio, orientação, atenção e apoio. Por ter sido durante todo esse tempo um grande professor e amigo.

Ao grupo *Se tiltar é pior e Gostei não achei fácil*, pelos momentos de descontração, vocês me ensinaram que nenhuma dificuldade é maior quando se tem amigos ao lado que possa fazer superá-las.

À UFMA, pela oportunidade e por ter sido a minha segunda casa durante esses cinco anos.

MUITO OBRIGADO!

“Deixe que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim”

Nícolás Tesla (1856-1943)

MUNIZ, L.F.S. **Estudo do comportamento reológico e efeito da temperatura de sistemas espumantes com adição de extrato da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiniflorum*)**. 2021. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

RESUMO

Os materiais espumantes e as emulsões são sistemas importantes numa variedade de aplicações práticas, devido às suas propriedades reológicas, tais como alta viscosidade a determinada tensão de cisalhamento. Para melhor conhecer esses materiais e avaliar suas propriedades quando adicionados de polpas de frutas, este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento reológico de um sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu “*in natura*” em diferentes proporções polpa de fruta : sistema espumante (20:80; 40:60 e 60:40%, m/m) e em diferentes temperaturas (10, 20 e 60°C). Para ajustar os dados experimentais de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação, empregou-se o modelo reológico de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), comumente utilizado para o ajuste de polpas de frutas. Os sistemas que apresentaram os melhores resultados tiveram sua composição em termos de teor de umidade, de proteína, de lipídeos, de cinzas e de carboidratos determinados. O modelo reológico ajustou bem os dados experimentais, possibilitando a obtenção de valores de coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,97 e Erros Relativos Médios (MRE) inferiores a 9,92%. O sistema espumante adicionado de polpa apresentou tendência de diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação, comportamento que se assemelha ao de um fluido não-newtoniano do tipo pseudoplástico, com índice de comportamento variando entre $0,0001 < n < 0,30$ e índice de consistência na faixa de $3,53 < K < 9,53 \text{ Pa.s}^n$. O efeito da temperatura sobre o sistema espumante adicionado de polpa foi avaliado através da equação de Arrhenius, gerando valores de energia de ativação de 1.245,9; 6.626,5 e 20.575,8 J/mol para as proporções de polpa/sistema espumante de 20:80; 40:60 e 60:40%, m/m, respectivamente. O sistema espumante adicionado com 60% de polpa de cupuaçu, apresentou a seguinte composição: 20,56% de umidade, 3,52% de lipídeos, 10,62% de proteínas, 2,76% de cinzas e 62,54% de carboidratos.

Palavras-chave: Sistema espumante. Polpa de Cupuaçu. Energia de ativação. Comportamento Reológico. Fluido Pseudoplástico.

MUNIZ, L.F.S. **Study of the rheological behavior and temperature effect of foaming systems with the addition of cupuaçu pulp extract (*Theobroma grandiniflorum*).** 2021. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

ABSTRACT

Foaming materials and emulsions are important systems in a variety of practical applications due to their rheological properties, such as high viscosity at a given shear stress. To better understand these materials and evaluate their properties when added fruit pulp this work aimed to study the rheological behavior of a foaming system added with “in natura” cupuaçu pulp in different proportions of fruit pulp: sparkling system (20: 80; 40:60 and 60:40%, m/m) and at different temperatures (10, 20 and 60°C). To adjust the experimental data of shear stress versus strain rate, the Ostwald-de-Waele (Power Law) rheological model, commonly used for the adjustment of fruit pulps, was used. The systems that presented the best results had their composition in terms of moisture content, protein, lipids, ash and carbohydrates determined. The model presented good adjust to the experimental data, making it possible to obtain values of coefficient of determination (**R²**) above 0.97 and Mean Relative Errors (MRE) below 9.92%. The foaming system added with pulp showed a tendency to decrease the apparent viscosity with the increase of the deformation rate, a behavior that is similar to that of a non-Newtonian fluid of the pseudoplastic type, with a behavior index varying between 0.0001 <n< 0.30 and consistency index in the range of 3.53<K<9.53 Pa.sⁿ. The effect of temperature on the foaming system added with pulp was evaluated through the Arrhenius equation, generating activation energy values of 1,245.9; 6,626.5 and 20.575,8 J/mol for the pulp/foaming system proportions of 20:80; 40:60 and 60:40%, w/w, respectively. The sparkling system added with 60% of cupuaçu pulp had the following composition: 20.56% of moisture; 3.52% of lipids; 10.62% of proteins (10.62%); 2.76% of ash and 62.54% of carbohydrates.

Keywords: Foaming system. Cupuaçu pulp. Activation energy. Rheological behavior. Pseudoplastic fluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Árvore cupuaçuzeiro	4
Figura 2 – Estrutura do cupuaçu.....	5
Figura 3 – Viscosímetro de brookfield	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição e Características físico-químicas da polpa de cupuaçu <i>in natura</i>	13
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão de cisalhamento (Pa)
τ_0	Tensão inicial (Pa)
λ	Taxa de deformação (s ⁻¹)
η_a	Viscosidade plástica (Pa.s)
K	Índice de consistência (Pa.sn)
n	Índice de comportamento de fluxo (adimensional)
R	Constante universal dos gases
η	Viscosidade aparente (Pa.s)
η_0	Constante empírica
μ	Viscosidade dinâmica (Pa.s)
A_0	Constante empírica
E_a	Energia de ativação (J/mol)
R^2	Coefficiente de determinação
MRE	Erro médio relativo
Y_i	Valores experimentais
\bar{y}	Média dos valores experimentais
y_i^*	Valores estimados
N	Quantidade de valores experimentais
T	Temperatura

SUMÁRIO

FICHA CATALOGÁFICA	II
FOLHA DE APROVAÇÃO	III
DADOS CURRICULARES	IV
DEDICATÓRIA	V
AGRADECIMENTOS	VI
EPÍGRAFE	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
SUMÁRIO	
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Cupuaçuzeiro	4
3.2 Cupuaçu	5
3.3 Polpa de cupuaçu	6
3.4 Sistema espumante	6
3.5 Reologia	7
3.6 Modelos reológicos	9
3.6.1 Modelo de Bingham	10
3.6.2 Modelo de Herschel-Bulkley	10
3.6.3 Modelo de Casson	11
3.6.4 Modelo de Ostwald-de Waele, ou Lei da Potência	11
3.7 Efeito da temperatura sobre o comportamento reológico	12
3.8 Caracterização físico-química	13
3.8.1 Umidade	14
3.8.2 Cinzas	14
3.8.3 Proteínas	14
3.8.4 Lipídios	15
3.8.5 Carboidratos	15
4 MATERIAS E MÉTODOS	16
4.1 Matéria-prima e preparação das amostras	16
4.1.1 Formulação do sistema espumante	16
4.1.2 Polpa de cupuaçu	16
4.2 Estudo reológico e modelagem matemática	16
4.3 Efeitos da temperatura e cálculo da energia de ativação	18
4.4 Caracterização físico-química do sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu	18
4.4.1 Umidade	18
4.4.2 Cinzas	19
4.4.3 Proteínas	19

4.4.4 Lipídios	20
4.4.5 Carboidratos	20
5 RESULTADOS E DISCUSÃO	21
6 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

As frutas tropicais possuem grande destaque na indústria de alimentos, em grande parte, pelas características de sabor, aroma e possibilidades de utilização doméstica e agroindustrial de suas polpas (BORGES et al., 2017). Nesse contexto, o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), que pertence ao mesmo gênero do cacau (*Theobroma cacao*), possui alto valor nutricional e excelentes características de aroma, sabor e textura, sendo bastante utilizado na produção de sucos, sorvetes, doces, iogurtes e produtos de confeitaria.

O fruto do cupuaçuzeiro, também chamado de cupuaçu, mede de 12 a 25 cm de comprimento e 10 a 12 cm de diâmetro, apresentando forma elipsoide ou oblonga, com extremidades arredondadas, variando de 10 a 12 cm de diâmetro, podendo pesar de 500 a 4.500 g (MARTINS, 2008). A polpa do cupuaçu é fibrosa, de cor branca amarelada e sabor ácido, aroma forte e agradável. O fruto cupuaçu é constituído por 39 a 52 % de casca, 24 a 50 % de polpa, 10 a 29% sementes e 2 a 4% de placenta (fibra) (CALZAVARA, 1970).

O cupuaçu apresenta alto teor de pectina, uma fibra dietética solúvel, que tem demonstrado redução dos níveis sérios de colesterol e triglicérides em ratos e humanos (FIETZ et al., 1999). Além de ser fonte de muitos nutrientes, o cupuaçu possui uma grande importância econômica, sendo largamente consumido em muitas regiões do país, o que justifica a necessidade de estudos que possibilitem conhecer melhor suas propriedades e parâmetros de engenharia. Quando postos em movimento os fluídos tendem a oferecer resistência, essa resistência recebe o nome de viscosidade. Apesar de não poder ser medida diretamente, a viscosidade de um fluído pode ser determinada através de equações e grandezas apropriadas.

A reologia é a ciência que estuda a resposta de um material à aplicação de uma tensão ou deformação externa (TOLEDO, 1991). A análise reológica de um material consiste, de algum modo, na medida da sua consistência. Ao impor uma taxa de cisalhamento e medir sua tensão resultante, direta ou inversamente, as características reológicas do material podem ser determinadas. As relações entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento são os objetos dos estudos reológicos. Quando a relação é linear, o fluido é dito newtoniano e sua viscosidade é constante. Entretanto, em muitos casos, essa relação é não linear e o fluido é classificado como não-newtoniano (MATHIAS et al., 2013).

A escolha do modelo reológico é feita a partir das características do fluido. O modelo da lei da potência tem se mostrado, em muitos casos, adequado para os cálculos de engenharia e devido à sua simplicidade, tem sido amplamente utilizado nesta área (RAO; PALOMINO, 1974). Assim, o modelo da lei da potência foi o escolhido para o ajuste dos dados experimentais neste trabalho.

Os materiais espumantes e as emulsões são sistemas importantes numa variedade de aplicações práticas, devido as suas propriedades reológicas peculiares, tais como alta viscosidade a uma tensão de cisalhamento elevada e alta resistência à compressão quando sólidos (PRINCEN, 1983). Espumas usam proteínas como gelatina e albumina para estabilizar a rede formada ao redor das bolhas, criando condições para prevenir os fenômenos de coalescência. A adsorção espontânea das proteínas da solução na interface ar/água contribui para a dispersão e organização do ar, melhorando seu desempenho levando a espumas mais estáveis com bolhas de ar de diâmetro menor (FOEGEDING et. al, 2006; CHAVEZ-MONTES et al., 2007). O conhecimento da reologia e das mudanças reológicas pelas quais passa o produto é importante para controlar e aperfeiçoar processos, aumentando a qualidade (PERESSINI et al., 2002).

Em relação as características físico-químicas o cupuaçu é particularmente rico em potássio, fósforo e magnésio. É importante no controle do balanço de sais nos tecidos humanos, agindo sobre as trocas iônicas da membrana celular (ALVES, 2013). A polpa do cupuaçu é rica em compostos voláteis, sais minerais, cálcio, fósforo, ferro e vitaminas A, B1, B2 e C. Além de ser fonte de muitos nutrientes, o cupuaçu possui uma grande importância econômica, sendo largamente consumido em muitas regiões do país, o que justifica a necessidade de estudos que possibilitem conhecer melhor suas propriedades e parâmetros de engenharia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento reológico de um sistema espumante adicionado com polpa de cupuaçu a diferentes concentrações e temperaturas.

2.2 Objetivos específicos

- Formular sistemas espumantes utilizando ingredientes de grau alimentício como: albumina, maltodextrina e amido;
- Determinar o comportamento reológico dos sistemas espumantes com adição de polpa de cupuaçu a diferentes temperaturas (10, 20 e 60°C) e concentrações mássicas de polpa de cupuaçu:sistema espumante (20:80; 40:60 e 60:40%, m/m);
- Modelar o comportamento reológico dos sistemas espumantes com adição de polpa de cupuaçu;
- Determinar a composição química (teor de lipídeos, proteínas, cinzas, umidade e carboidratos) do sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu.

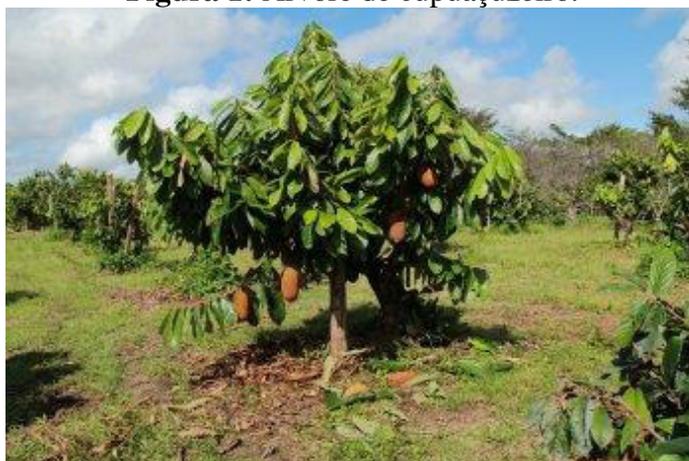
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cupuaçuzeiro

O cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*) é uma fruteira pertencente à família *Malvaceae*, nativa da região Amazônica, estando dispersa em toda Amazônia, mais diretamente do Estado do Pará e região “pré-amazônica” do Estado do Maranhão (DUCKE, 1946).

Trata-se de uma planta perene, que em condições naturais e propagação por sementes é retilínea com ramificação tricotômica. O cupuaçuzeiro em cultivos racionais variam de 4 a 8 m de altura, com copa chegando a 7 m de diâmetro, em andares, porém nas condições de bosque tropical úmido atinge até 20 m de altura e 45 cm de diâmetro de caule (VENTURIERI et al., 1985). A figura 1 mostra em detalhes o cupuaçuzeiro.

Figura 1: Árvore de cupuaçuzeiro.



Fonte: Portal Embrapa.

O gênero *Theobroma* foi dividido em 22 espécies, todas distribuídas no continente americano. Das 22 espécies-existent, nove ocorrem na Amazônia brasileira: *T. bicolor*, *T. cacao*, *T. canumanense*, *T. grandiflorum*, *T. microcarpum*, *T. obovatum*, *T. speciosum*, *T. subincanum* e *T. sylvestre* (CUATRECASAS, 1964). Destas, as cultivadas comercialmente no Brasil são *T. cacao* e *T. grandiflorum*, conhecidas popularmente como cacau e cupuaçu.

O cupuaçuzeiro é uma planta que passou por um processo de substituição do extrativismo para a forma domesticada, considerando o aumento da demanda nacional e internacional, principalmente para o comércio de polpa, que nos últimos anos vem crescendo gradativamente (GONDIM, 2001). Sendo uma espécie de boa adaptação à

sombra, o cupuaçuzeiro propicia a formação de consórcios com outras plantas de porte florestal, permitindo resultados econômicos e ecológicos satisfatórios (MULLER et al., 1995).

3.2 Cupuaçu

O cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) é uma fruta tropical que apresenta excelentes características de aroma, sabor e textura, tendo adquirido grande aceitação no mercado nacional e internacional, apresentando grande potencial econômico no que se diz à industrialização e comercialização (VRIESMAN et al., 2009).

O fruto é do tipo drupáceo (que tem bagas), de forma alongada e com as extremidades arredondadas. A casca epicarpo é rígida e lenhosa, recoberta por uma camada de pó ferrugíneo que, quando raspada, expõe a epiderme de coloração verde. A casca também é constituída do endocarpo (camada mais interior), de cor branco-amarelada, com aproximadamente sete milímetros de espessura. O comprimento dos frutos varia de 12 a 25 cm, com diâmetro de cerca de 10 cm. O peso, segundo o tipo, pode alcançar 4 kg (COHEN, 2003). A Figura 2 mostra o fruto e detalhes de sua estrutura.

Figura 2: Estrutura do cupuaçu



Fonte: mundo brasileiro (2021).

Em termos ecológicos, o cupuaçu é uma excelente espécie frutífera para a recuperação de capoeiras e áreas devastadas, fato que ocorreu principalmente nos fluxos migratórios para a região Amazônica nas décadas de 70 e 80 (VENTURIERI, 1993 citado por VILALBA, 2003).

3.3 Polpa de cupuaçu

O procedimento tradicional para separação da polpa é realizado manualmente com tesouras, mas esse processo artesanal está sendo substituído por despolpadeiras mecânicas de médio e grande porte, proporcionando maior produtividade e melhoria dos padrões de qualidade do produto, especialmente no quesito higiene. Várias empresas nacionais e internacionais já comercializam esses produtos em grandes quantidades (PEREIRA, 2003).

A polpa de cupuaçu possui importantes características como flavo acentuado e agradável, alto rendimento, acidez elevada e elevado fator de diluição, ou seja, com pouca quantidade de polpa obtém-se maior quantidade de suco, quando comparado com outras frutas. No segmento de alimentos a polpa é usada para produção de néctares, sorvetes, iogurtes, balas, doces, pudim, pizza e é ingrediente de diversas sobremesas (SOUZA et al., 2017).

A polpa do cupuaçu é rica em compostos voláteis, sais minerais, cálcio, fósforo, ferro e vitaminas A, B1, B2 e C, que aumentam a eficiência física, aceleram a cicatrização, combatem infecções e resfriados, aumentam a eficiência do sistema imunológico e favorecem a elasticidade da pele prevenindo rugas. É uma fruta calórica, com um alto teor de carboidratos. Além disso, o cupuaçu apresenta alto teor de pectina, uma fibra dietética solúvel, que tem demonstrado redução dos níveis séricos de colesterol e triglicerídeos em ratos e humanos. (FIETZ et al., 1999).

3.4 Sistema espumante

Espumas são sistemas dispersos de duas fases distintas, onde uma delas líquida, circunda uma fase dispersa constituída de bolhas de ar. As proteínas podem agir como estabilizantes desse sistema, acumulando-se na interface ar-água, alterando as propriedades de superfície. As bolhas são separadas por uma camada de líquido, denominada de lamela, formando uma interface gás-líquido de elevada proporção, resultando num filme adsorvido nesta região que previne a coalescência das bolhas de ar (HALLING, 1981).

As espumas podem ser classificadas como sólidas ou líquidas. As sólidas são materiais plásticos ou elásticos no qual seu comportamento reológico depende principalmente das propriedades físicas da fase sólido e da densidade do material. As

espumas líquidas são mais difíceis de caracterizar, em geral constituem de uma fase de ar descontínua que se dispersa em uma fase contínua de líquido, essas são instáveis requerendo o uso de agentes espumante e estabilizantes para manter a estabilidade mediante a redução da tensão superficial (PERNELL et al., 2002).

As variáveis que afetam a formação de espuma, a densidade e a estabilidade incluem a natureza química dos frutos, teor de sólidos solúveis totais, a fração de celulose, tipo de concentração de agente espumante, tipo de concentração do estabilizador de espuma (KARIM; WAI, 1999).

De acordo com Mcpherson (1997), a adição de agentes espumantes e estabilizantes ajuda a aumentar a estabilidade da espuma durante a secagem, a albumina do ovo em pó é um alimento hiperprotéico, à base exclusivamente de proteínas de alto valor biológico, as maltodextrinas são biopolímeros originados da hidrólise parcial do amido e tem extensa utilização como ingrediente por proporcionar características desejáveis a alimentos processados. Maltodextrinas são classificadas pelo seu grau de hidrólise, expresso em dextrose equivalente (DE), que é a porcentagem de açúcares redutores calculados como glicose em relação ao peso seco do amido. Esses polímeros são metabolizados de forma lenta e constante o que pode ajudar a sustentar os níveis de energia durante atividades que necessitam de resistência.

É necessário o estudo das concentrações ideais dos aditivos utilizados para formação da espuma de polpa de frutas, pois são determinantes no processo, sendo a massa específica e estabilidade as propriedades mais relevantes. Devem ser capazes de suportar as condições a qual são submetidas como o espalhamento, batimento e a secagem em si (CRUZ, 2013).

3.5 Reologia

A reologia, definida como a ciência do escoamento e da deformação dos materiais, é fundamental e interdisciplinar, pois vem ganhando importância dentro da engenharia de processos, na qual inclui o estudo das deformações e do escoamento das matérias-primas, dos produtos intermediários e finais das indústrias alimentícias (GABAS et al., 2012). O conhecimento dos parâmetros reológicos obtidos com o ajuste das equações matemáticas às propriedades de fluxo é fundamental nos cálculos para dimensionamento de equipamentos e processos, além de ser de grande interesse no controle de qualidade (CAPELLI, 2012).

A reologia tem por finalidade prever a força necessária para causar uma deformação ou escoamento em um corpo ou, reciprocamente, prever a deformação ou o escoamento resultante da aplicação de um dado sistema de forças em um corpo (CASTRO, 2007). Essas forças podem ser de compressão, tração ou cisalhamento.

A análise reológica de um material consiste, de algum modo, na medida da sua consistência. Ao impor uma taxa de cisalhamento e medir sua tensão resultante, direta ou inversamente, as características reológicas do material podem ser determinadas. As relações entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento são os objetos dos estudos reológicos. Quando a relação é linear, o fluido é dito newtoniano e sua viscosidade é constante. Entretanto, em muitos casos, essa relação é não linear e o fluido é classificado como não-newtoniano (MATHIAS et al., 2013).

A reologia abrange diferentes propriedades associadas à deformação da matéria, entre as quais: extrusibilidade, compressibilidade, ductibilidade, espalhabilidade, elasticidade, fluidez e viscosidade (VRIESMANN, 2008).

A reologia tem desempenhado papel fundamental no desenvolvimento, fabricação e processamento de produtos alimentícios, permitindo que haja uma completa caracterização do material e otimização de processos com redução de custos e melhoria na eficiência.

A maioria dos alimentos fluidos requer modelos complexos para sua caracterização (TABILO-MUNIZAGA; BARBOSA-CÁNOVAS, 2005). Para caracterizar um fluido, existem vários modelos e os mais comumente utilizados são: Ostwald-de-Waele, Plástico de Bingham, Hershel-Bulkley, Casson e Newton (STEFFE, 1996). O modelo de Ostwald-de-Waele ou Lei da Potência é um dos mais utilizados para adequar os dados de viscosidade dos materiais viscoplásticos (GUEDES et al., 2010).

Na área de alimentos, o conhecimento das propriedades reológicas dos materiais é essencial no controle de qualidade do produto final ou controle intermediário, avaliação da textura do alimento, projeto de equipamentos como tubulações, bombas, trocadores de calor, evaporadores, etc, definição de vida de prateleira do produto, desenvolvimento de produto, determinação da estrutura do alimento, incluindo mudanças físico-químicas que ocorrem durante o processamento e armazenamento (BOURNE, 1992; GUERRERO; ALZAMORA, 1997; ALVARADO; AGUILERA, 2001).

Segundo Costell e Duran (1982), os principais responsáveis pelo comportamento reológico dos produtos derivados de frutas são: o tipo da fruta, temperatura e teor de sólidos. Uma vez que os sucos, polpas e néctares de frutas são sistemas bifásicos constituídos por partículas sólidas dispersas em meio aquoso, o seu comportamento reológico também será influenciado pela concentração, composição química, tamanho, forma e distribuição das partículas que compõem a fase dispersa. Macosco (1994) salienta a importância do conhecimento do comportamento reológico dos derivados de frutas, que deve ser utilizado nos parâmetros de qualidade, de avaliação e operação dos equipamentos processadores de alimentos.

A viscosidade, por exemplo, é a propriedade física de um líquido de resistir ao fluxo induzido pela tensão aplicada (cisalhamento). Ela é dependente da natureza físico-química da substância, da temperatura, da pressão, da taxa de cisalhamento e do tempo e para definir a viscosidade em função de um desses fatores os outros devem ser mantidos constantes e bem definidos (SCHRAMM, 2006 citado por CASTRO, 2007).

O corpo viscoso mais simples é o fluido Newtoniano, para o qual a viscosidade é constante. Já para os fluidos não-newtonianos a viscosidade pode variar em muitas magnitudes com a mudança da taxa de cisalhamento ou a tensão de cisalhamento para as diversas formas de fluidos (CASTRO, 2007).

3.6 Modelos Reológicos

A principal função de um modelo reológico é representar matematicamente a relação entre os valores experimentais da tensão de cisalhamento e taxa de deformação, para um determinado fluido e assim permitir o tratamento analítico do escoamento desses materiais. Esses modelos baseiam-se em aspectos fenomenológicos ou teóricos relacionados com a estrutura do fluido. São úteis para relacionar propriedades reológicas de um fluido com grandezas práticas como: concentração, temperatura etc. Esse conhecimento é indispensável no controle de qualidade, controle de processos e no projeto e dimensionamento de equipamentos e processos (VIEIRA, 1995).

A modelagem provê meios para representar uma larga quantidade de dados reológicos em termos de uma simples expressão matemática. Muitas formas de equações são possíveis, no entanto, um modelo geral que se aplique a todas as situações não existe. Dentre os modelos matemáticos existentes, alguns dos mais aplicados para

sistemas de alimentos são: Plástico de Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) (TONELI, 2005).

3.6.1 MODELO DE BINGHAM

São fluidos que inicialmente necessitam de uma tensão de cisalhamento, para que haja fluxo ou movimentação do material. Uma vez atingida essa tensão, o fluido passa a apresentar um comportamento newtoniano sendo chamado de plástico de Bingham ou plástico ideal. Como exemplos desse comportamento, tem-se o purê de batata, mostarda, creme batido (GONÇALVES, 1989). Primeiro a ser utilizado nas equações que descrevem o comportamento reológico do chocolate, pode ser caracterizado pela viscosidade plástica e tensão de cisalhamento residual (CHEVALLEY, 1974). A equação que descreve este tipo de comportamento é apresentada a seguir:

$$\tau = \tau_0 + \eta_a \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

onde: τ = tensão de cisalhamento (Pa); $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s⁻¹); τ_0 = tensão inicial (Pa); η_a = viscosidade plástica (Pa.s).

3.6.2 MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY

Assim como o modelo de Bingham, o modelo de Herschel-Bulkley é uma extensão do modelo Lei da Potência, utilizado para fluidos com tensão inicial de escoamento (MACHADO, 2012). A representação matemática dos fluidos que apresentam esse comportamento é dada através da equação (2):

$$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (2)$$

onde: K = índice de consistência (Pa.s); τ_0 = tensão inicial (Pa); τ = tensão de cisalhamento (Pa); $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s⁻¹); n = índice de comportamento de fluxo (adimensional).

O modelo de Herschel-Bulkley é muito útil, porque o comportamento newtoniano ($\tau_0 = 0$ e $n = 1$), Lei da Potência ($\tau_0 = 0$) e de Bingham ($\tau_0 \neq 0$) podem ser considerados casos particulares do mesmo.

3.6.3 MODELO DE CASSON

O modelo de Casson é bastante similar ao modelo de Plástico de Bingham, pois ambos apresentam uma tensão de cisalhamento inicial. No entanto, os valores dos parâmetros do fluido são diferentes, dependendo dos limites dos dados da análise matemática. É um modelo bastante utilizado para descrever o comportamento do chocolate (STEFFE, 1996). O modelo de Casson é apresentado através da equação (3):

$$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + k (\dot{\gamma})^{0,5} \quad (3)$$

onde: τ - tensão de cisalhamento; τ_0 - tensão de cisalhamento inicial; $\dot{\gamma}$ - taxa de deformação; k - índice de consistência.

Lannes et al. (2002), utilizaram o modelo de Casson para descrever os dados reológicos do produto líquido de chocolate de cupuaçu.

3.6.4 MODELO DE OSTWALD-DE-WAELE OU LEI DA POTÊNCIA

O modelo de Ostwald-de Waele, também conhecido como Lei da Potência, é um dos modelos mais utilizados para descrever o comportamento reológico de fluidos devido a sua fácil aplicação (BIRD, 1960). A representação matemática do modelo é dada pela equação (4):

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad (4)$$

A avaliação do parâmetro n da equação (4) define o comportamento do fluido em newtoniano ou não-newtoniano. Para os valores de $n < 1$ a viscosidade aparente decresce com o aumento do gradiente de velocidade, caracterizando o fluido como pseudoplástico, para $n > 1$, é caracterizado como fluido dilatante e para $n = 1$ o fluido é classificado como

newtoniano. O modelo Lei da Potência é similar ao Newtoniano, portanto o valor de k é o valor da viscosidade do fluido (BRANCO, 1995).

3.7 Efeito da Temperatura Sobre o Comportamento Reológico

Para uma concentração constante, o efeito da temperatura na viscosidade newtoniana ou na viscosidade aparente não newtoniana, pode ser usualmente correlacionado com uma equação do tipo Arrhenius (SARAVACOS, 1995; HOLDSWORTH, 1971; RAO, 1996, RAO et al., 1984; GRIGELMO et al., 1999), como apresentado na equação (5):

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

onde η é a viscosidade aparente (Pa.s); η_0 é uma constante empírica, E_a é a energia de ativação (J/mol), R é a constante universal dos gases (8.314 J/mol K) e T é a temperatura (K) (SARAVACOS, 1995).

Como pode ser verificado pela equação (5), o aumento da temperatura tem o efeito de diminuir a viscosidade do fluido. Já a ordem de grandeza da energia de ativação indica a dependência da viscosidade de um fluido à temperatura, assim, fluidos com alta energia de ativação apresentam grande variação na viscosidade em função da temperatura e vice-versa (FLAUZINO, 2007).

Segundo Krokida et al. (2001), a temperatura tem maior efeito no índice de consistência (K) em fluidos alimentícios não-newtonianos, do que no índice de comportamento (n). O conhecimento da energia de ativação (E_a) e o parâmetro de ajuste (η_0) permite modelar o comportamento reológico, bem como verificar os efeitos da temperatura sobre a viscosidade (GRATÃO; SILVEIRA JÚNIOR, 2004). A energia de ativação (E_a), segundo Pereira e Figueiredo (2003) indica a sensibilidade da viscosidade devido à mudança de temperatura, em que maiores valores da energia de ativação significam que a viscosidade é relativamente mais sensível à mudança de temperatura.

Holdsworth (1971), examinou os valores da energia de ativação para sucos e purês de frutas pseudoplásticos, concluindo que quanto menor o valor do índice de comportamento do fluido, menor é o efeito da temperatura na viscosidade do fluido.

3.8 Caracterização Físico-Química

As características físico-químicas exercem um papel fundamental no comportamento reológico das polpas de frutas, visto que este comportamento é resultado das interações químicas ocorridas entre os elementos presentes no produto.

O cupuaçu é particularmente rico em potássio, fósforo e magnésio. É importante no controle do balanço de sais nos tecidos humanos, agindo sobre as trocas iônicas da membrana celular (ALVES, 2011).

Para o cupuaçu, o rendimento dos frutos varia de acordo com o tamanho, a procedência, o período de safra e o método de extração (CARVALHO, 2004). Os frutos pesam em média 1,275 kg e têm cerca de 43% de casca, 38,5% de polpa, 17,19% de semente e 2,85% de placenta (FRANCO, 1999 citado por FERREIRA, 2008). Na Tabela 1 são mostradas algumas composições e características físico-químicas da polpa do cupuaçu.

Tabela 1 - Composição e características físico-químicas da polpa de cupuaçu *in natura*.

Componentes	Teor
Umidade	86,6%
Proteínas	0,8%
Lipídios	0,6%
Colesterol	Não Disponível
Carboidratos	11,4%
Fibra alimentar	1,6%
Cinzas	0,6%
Cálcio	5,0 mg/100g
Magnésio	14,0 mg/100g
Fósforo	14,0 mg/100g
Ferro	0,3 mg/100g
Potássio	291,0 mg/100g
Vitamina C	10,5 mg/100g

Fonte: Adaptado da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TACO (2011, p. 36)

Chitarra e Citarra (1990) afirmaram que os dados sobre a composição química dos frutos são bastante variáveis, em decorrência de numerosos fatores de influência, como diferença de cultivares, grau de maturidade, estação de colheita, local e clima de produção.

3.8.1 UMIDADE

A umidade no alimento está relacionada com a quantidade de água disponível existente no produto. Quando um produto é aquecido em condições que permitem a remoção da água, ocorrerá perda de peso a qual corresponde a umidade do produto. O resíduo obtido no aquecimento direto é chamado de resíduo seco (LARA et al., 1976).

Avaliando a composição físico-química e química da polpa integral do cupuaçu, BARBOSA et al. (1978), encontraram valores para a umidade em torno de 89%.

3.8.2 CINZAS

Os elementos minerais se apresentam na cinza sob a forma de óxidos, sulfatos, fosfatos, silicatos e cloretos, dependendo das condições de incineração e da composição do alimento. A composição da cinza vai depender da natureza do alimento e do método de determinação utilizado (ARAÚJO et al., 2021).

A determinação do teor de cinzas (resíduo mineral fixo ou minerais totais) fornece uma indicação de riqueza da amostra de matéria inorgânica, sendo este obtido por aquecimento, em temperatura controlada, da matriz orgânica por um determinado tempo (VICENZI, 2008; GREENFIELD; SOUTHGATE, 2003).

3.8.3 PROTEÍNAS

Segundo Aquarone et al. (2008), através da determinação de proteína, classifica-se os teores dos aminoácidos essenciais que estão presentes em um alimento, para que assim possa ser mantido um equilíbrio nutricional. As proteínas são uma das responsáveis pelas atividades biológicas vitais e estão associadas às funções biológicas

e nutricionais. Em sua maioria a presença da proteína nos alimentos está combinada com lipídios e carboidratos (CECCHI, 2003).

3.8.4 LIPÍDIOS

Os lipídios formam, juntamente com carboidratos e proteínas, o grupo de compostos mais importantes nos alimentos e mais frequentemente encontrados na natureza, tanto nos animais como nos vegetais. Desempenham papéis muito importantes em diversas funções biológicas e ainda se fazem presentes na composição de estruturas celulares (Bobbio & Bobbio, 2003). A fim de oferecer pilares básicos de nutrição, o cupuaçu apresenta alto teor lipídico em sua semente, que é utilizado em produtos de beleza, cremes e sabonetes, explorando o apelo de produto natural de origem amazônica (LUCCAS, 2001).

3.8.5 CARBOIDRATOS

Carboidratos abrangem um dos maiores grupos de compostos orgânicos encontrados na natureza e juntamente com as proteínas formam os constituintes principais do organismo vivo, além de serem a mais abundante e econômica fonte de energia para o homem (Bobbio & Bobbio, 2003).

4. METODOLOGIA

4.1 Matéria-Prima e Preparação das Amostras

4.1.1 FORMULAÇÃO DO SISTEMA ESPUMANTE

Com base em estudos anteriores conduzidos pelos autores envolvendo a formulação de sistemas espumantes com outros tipos de polpa de fruta, o sistema aqui utilizado foi composto de amido de milho (Maizena, São Paulo, Brasil), albumina de ovo em pó (Povos, Mogi das Cruzes, Brasil), maltodextrina (Neonutri, São Paulo, Brasil) e água. Para preparação do sistema espumante, pesou-se em balança semi-analítica (Modelo UX220H, Shimadzu, Japão), 20g de albumina, 5g de maltodextrina e 5g de amido. Mediu-se 80mL de água destilada em uma proveta graduada de 100mL. Em um recipiente de plástico, adicionou-se a albumina junto com a água e misturou-se vigorosamente por cerca de 4 minutos com auxílio de um mixer de cozinha (Modelo 2615R, Oster, USA), até que fosse obtido uma mistura com consistência. Em seguida, adicionou-se a maltodextrina e o amido, seguido de nova agitação por cerca de 3 minutos., até que se alcançasse a consistência desejada e a estabilização do sistema. Em seguida, o sistema espumante previamente preparado recebeu a adição de diferentes quantidades de polpa de cupuaçu, de forma a obter as diferentes concentrações do sistema espumante adicionado de polpa (20:80; 40:60 e 60:40%, m/m).

4.1.2 POLPA DE CUPUAÇU

Na pesquisa foi utilizada polpa de cupuaçu adquirida em um mercado local da cidade de São Luís - MA. Após a aquisição, a polpa in natura sem adição de água ou de conservantes, foi imediatamente armazenada em freezer até o momento das análises e ensaios aos quais foi submetida.

4.2 Estudo Reológico e Modelagem Matemática

O Sistema espumante com adição de polpa foi avaliado a diferentes proporções sistema espumante/ polpa (80:20, 60:40 e 40:60% (p/p) e temperaturas (10, 20 e 60 °C), com taxas de deformação variando de 0,333 a 3,333 s⁻¹. Para determinação dos parâmetros reológicos, empregou-se um viscosímetro Brookfield (modelo DV-II + Pro,

Brookfield, USA), utilizando um spindle LV4 (64) (Figura 3), acoplado a um banho termostático (modelo ALB 250 C, Tecnal, Brasil) para controle das temperaturas de trabalho.

Figura 3: Viscosímetro Brookfield



Fonte: www.medicao.net.com.br/servico/viscosimetro-de-brookefield (acesso em (24/01/2022)).

Para obtenção dos parâmetros reológicos e para determinação do comportamento reológico do fluido, utilizou-se o modelo da Lei da Potência (Equação 4) e a viscosidade para fluidos não newtonianos (Equação 6).

$$\mu = k(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (6)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento (Pa), μ é a viscosidade dinâmica (Pa.s), n é o índice de comportamento (adimensional), $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s^{-1}) e, k é o índice de consistência (Pa.s) (STEFFE, 1996; GENOVESE; LOZANO; 2007).

O modelo foi ajustado aos valores experimentais de viscosidade aparente em função da taxa de deformação, utilizando-se para a modelagem matemática a ferramenta Solver do software Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, EUA). Foram utilizados como critério de determinação de melhor ajuste do modelo aos dados experimentais o coeficiente de determinação R^2 e o Erro Relativo Médio (MRE) Equação (7).

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^m \frac{|Y_i - Y_i^*|}{Y_i^*} \quad (7)$$

onde, Y e Y^* representam os valores experimentais e calculados, respectivamente, e m é o número de valores experimentais.

4.3 Efeito da Temperatura e Cálculo da Energia de Ativação

Para a avaliação do efeito da temperatura sobre os valores da viscosidade aparente da polpa de cupuaçu foi utilizada a equação de Arrhenius (Equação 8), que relaciona a viscosidade aparente (Pa.s) em função do inverso da temperatura (T^{-1}), permitindo, a partir dos coeficientes da equação, calcular a energia de ativação.

$$\eta = A_0 \exp\left(\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (8)$$

onde η é a viscosidade aparente (Pa.s); A_0 é uma constante empírica, E_a é a energia de ativação (J/mol), R é a constante universal dos gases (8.314 J/mol K) e T é a temperatura (K) (SARAVACOS, 1995).

4.4 Caracterização Físico-Química do Sistema Espumante Adicionado de Polpa de Cupuaçu

A composição centesimal do sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu, nas diferentes proporções testadas, foi determinada em termos de umidade, proteína, cinzas, lipídeos e carboidratos, segundo os métodos descritos por Adolfo Lutz (2008). Após a formulação, o sistema espumante recebeu a adição da polpa de cupuaçu, sendo então seco a 60 °C por 24h, em uma estufa. Após, a alíquota resultante foi moída, e então, utilizada para as análises físico-químicas.

4.4.1 UMIDADE

Inicialmente, as cápsulas de porcelana foram identificadas e colocadas em estufa a 105 °C por 1 hora. As cápsulas foram então pesadas em balança analítica e a massa de cada uma foi anotada. Após, pesou-se, aproximadamente, 5,0 gramas da amostra nas cápsulas e as mesmas foram aquecidas em estufa a 105 °C por 4 horas. Decorrido o tempo de secagem, as cápsulas foram esfriadas em dessecador e, após seu

resfriamento, foram pesadas novamente. O percentual de umidade foi calculado a partir da equação 9:

$$\% \text{Umidade} = \frac{(\text{peso da cápsula} + \text{massa úmida}) - (\text{peso da cápsula} + \text{massa seca})}{\text{peso da amostra úmida}} \times 100 \quad (9)$$

4.4.2 CINZAS

Os cadinhos foram numerados e levados à mufla a 600 °C por 4 horas. Após resfriamento em dessecador por 1 hora, foram pesados em balança analítica e receberam aproximadamente 5,0 g de amostra, que foram então incineradas em bico de Bunsen até a completa carbonização, e então, colocados na mufla por 4 horas e depois resfriados em dessecador. Os cadinhos com cinzas foram pesados em balança analítica. O teor de resíduo mineral fixo foi determinado segundo a equação 10:

$$\% \text{Cinzas} = \frac{(\text{peso do cadinho} + \text{cinzas}) - (\text{peso do cadinho})}{\text{peso da amostra}} \times 100 \quad (10)$$

4.4.3 PROTEÍNA

A determinação do teor de proteína foi dividida em três etapas:

Digestão: Foi pesado 0,1 g da amostra em papel isento de nitrogênio, colocado no tubo de Kjeldahl e adicionado uma pequena porção de selênio e o dobro de sulfato de potássio. Adicionou-se 2 mL de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) para os tubos de Kjeldahl. Os tubos foram levados para o bloco digestor durante 2 horas e depois foram resfriados;

Destilação: Com a solução já fria, foi colocado o dobro do volume da amostra de água destilada. Adicionou-se 10 gotas de indicador fenolftaleína. Em um erlenmeyer de 250 mL, foi adicionado 25 mL de ácido clorídrico (HCl) 0,02 N, mais cinco gotas de vermelho de metila e uma gota de azul de metileno e, em seguida, levado para o destilador de nitrogênio. Foi adicionado ao tubo de Kjeldahl uma solução de hidróxido

de sódio (NaOH) a 40%. Deixou-se destilar por quatro minutos e o erlenmeyer foi então retirado para a titulação;

Titulação: A solução existente no erlenmeyer foi titulada com hidróxido de sódio (NaOH) 0,02 N.

A porcentagem de nitrogênio é dada pela equação 11:

$$\% \text{ Nitrogênio} = \frac{(\text{Vol.de HCl adicionado} \times \text{fator HCL}) - (\text{Vol de NaOH gasto} \times \text{fator NaOH}) \times 0,028}{\text{massa da amostra}} \quad (11)$$

A quantidade de proteína presente na amostra foi calculada a partir da equação 12:

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ Nitrogênio} \times 6,25 \quad (12)$$

4.4.4 LIPÍDIOS

Os balões foram identificados, colocados em estufa a 105 °C por 1 hora e então esfriados em dessecador. Depois, foram pesados em balança analítica. Foi pesado, aproximadamente, 5,0 gramas da amostra em papel de filtro. A amostra foi colocada em extrator de Soxhlet e acrescentado o hexano. As amostras foram deixadas no extrator por 6 horas. Os balões foram, então, retirados e colocados em estufa para volatilizar o éter residual. Depois disto, foram novamente pesados.

A porcentagem de lipídios foi calculada a partir da equação 13:

$$\% \text{ Lipídios} = \frac{(\text{Peso do balão} + \text{óleo}) - (\text{Peso do balão})}{\text{Peso da amostra}} \times 100 \quad (13)$$

4.4.5 CARBOIDRATOS

A determinação dos carboidratos foi realizada por diferença dos demais componentes, conforme a equação 14:

$$\% \text{ Carboidratos} = 100 - (\% \text{ umidade} + \% \text{ cinzas} + \% \text{ proteínas} + \% \text{ lipídios}) \quad (14)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com as “Normas do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) de Engenharia Química complementares à Resolução Nº 1.892/2019 – CONSEPE”, aprovadas pelo Colegiado de Curso da Engenharia Química em 09 de março de 2020, e da Instrução Normativa nº 05/2020 – PROEN/UFMA, esse TCC foi elaborado na modalidade “Capítulo de Livro”.

Nesse sentido, em consonância com o que estabelece a normatização do curso, a etapa textual referente aos Resultados e Discussão foi substituída pelo capítulo de livro mostrado a seguir, intitulado “Estudo do comportamento reológico e efeito da temperatura de sistemas espumantes com adição de polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*)”, de autoria de Romildo Martins Sampaio, Luís Felipe Silva Muniz, Diana Canto Higueta, Harvey Alexander Villa-Velez e Paulo Henrique da Silva Leite Coelho, representando o capítulo 14, páginas 232-245, do e-book “Desvendando a Engenharia: sua Abrangência e Multidisciplinaridade”, com ISBN 978-65-89826-80-4 e DOI 10.37885/978-65-89826-80-4, publicado em agosto de 2021 pela Editora Científica Digital – Guarujá - SP, tendo como organizadores Julianno Pizzano Ayoub e Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira.

Estudo do comportamento reológico e efeito da temperatura de sistemas espumantes com adição de polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*)

| **Romildo Martins Sampaio**
UFMA

| **Luiz Felipe Silva Muniz**
UFMA

| **Diana Canto Higuira**
UFMA

| **Harvey Alexander Villa-Velez**
UFMA

| **Paulo Henrique da Silva Leite Coelho**
UFMA

RESUMO

Os sistemas espumantes (SE) são importantes numa variedade de aplicações práticas, devido às suas propriedades reológicas, tais como alta viscosidade a determinada tensão de cisalhamento. Para melhor conhecer esses materiais e avaliar suas propriedades quando adicionados de polpas de frutas, este trabalho avaliou o comportamento reológico de um SE com 20, 40 e 60% (p/p) de polpa de cupuaçu, às temperaturas de 10, 20 e 60°C. Os dados foram ajustados pelo modelo Lei da Potência. O efeito da temperatura sobre o sistema espumante adicionado de polpa foi avaliado através da equação de Arrhenius, gerando valores de energia de ativação de 1.245,9; 6.626,5 e 20.575,8 J/mol para as proporções de polpa/sistema espumante de (20:80; 40:60 e 60:40%), respectivamente. Os sistemas exibiram comportamento de fluido do tipo pseudoplástico. O SE com 60% de polpa apresentou 20,6% de umidade, 3,5% de lipídeos, 10,6% de proteínas, 2,7% de cinzas e 62,6% de carboidratos.

Palavras-chave: Sistema Espumante, Polpa de Cupuaçu, Energia de Ativação, Comportamento Reológico.



■ INTRODUÇÃO

As frutas tropicais possuem grande destaque na indústria de alimentos, em grande parte, pelas características de sabor, aroma e possibilidades de utilização doméstica e agroindustrial de suas polpas (Borges *et al.*, 2017). Nesse contexto, o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), que pertence ao mesmo gênero do cacau (*Theobroma cacao*), possui alto valor nutricional e excelentes características de aroma, sabor e textura, sendo bastante utilizado na produção de sucos, sorvetes, doces, iogurtes e produtos de confeitaria.

O fruto cupuaçu é constituído por 39 a 52 % de casca, 24 a 50 % de polpa, 10 a 29% sementes e 2 a 4% de placenta (fibra) (Calzavara, 1970).

A polpa do cupuaçu é fibrosa, de cor branca amarelada e sabor ácido, aroma forte e agradável. É rica em compostos voláteis, sais minerais, cálcio, fósforo, ferro e vitaminas A, B1, B2 e C, que aumentam a eficiência física, aceleram a cicatrização, combatem infecções e resfriados, aumentam a eficiência do sistema imunológico e favorecem a elasticidade da pele prevenindo rugas. É uma fruta calórica, com um alto teor de carboidratos como indicado na Tabela 1.

Além disso, o cupuaçu apresenta alto teor de pectina, uma fibra dietética solúvel, que tem demonstrado redução dos níveis séricos de colesterol e triglicerídeos em ratos e humanos (Fietz *et al.*, 1999). Além de ser fonte de muitos nutrientes, o cupuaçu possui grande importância econômica, sendo largamente consumido em muitas regiões do país, o que justifica a necessidade de estudos que possibilitem conhecer melhor suas propriedades e parâmetros de engenharia.

A Tabela 1 apresenta a composição e propriedades físico-químicas da polpa de cupuaçu in natura.

A reologia é a ciência que estuda a resposta de um material à aplicação de uma tensão ou deformação externa (Toledo, 1991). Sendo assim, para a indústria de alimentos, o estudo reológico é de grande utilidade em processos de engenharia, tais como cálculo de vazões, seleção de bombas, evaporação, esterilização, testes de tempo-de-prateleira e avaliação da textura dos alimentos para correlacioná-la à análise sensorial (Holdsworth, 1993).



Tabela 1. Composição e características físico-químicas da polpa de cupuaçu *in natura*.

Componentes	Teor
Umidade	86,6%
Proteínas	0,8%
Lipídios	0,6%
Colesterol	Não Disponível
Carboidratos	11,4%
Fibra alimentar	1,6%
Cinzas	0,6%
Cálcio	5,0 mg/100g
Magnésio	14,0 mg/100g
Fósforo	14,0 mg/100g
Ferro	0,3 mg/100g
Potássio	291,0 mg/100g
Vitamina C	10,5 mg/100g

Fonte: Adaptado da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TACO (2011, p. 36).

A análise reológica de um material consiste, de algum modo, na medida da sua consistência. As relações entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento são os objetos dos estudos reológicos. Quando a relação é linear, o fluido é dito newtoniano e sua viscosidade é constante. Entretanto, em muitos casos, essa relação é não linear e o fluido é classificado como não-newtoniano (Mathias *et al.*, 2013).

Entre os fluidos considerados não-newtonianos tem-se os ditos pseudoplásticos, muito comum entre os alimentos e caracterizados pela diminuição da viscosidade com o aumento da tensão de cisalhamento aplicada. Dentre os modelos matemáticos existentes, alguns dos mais aplicados para sistemas de alimentos são: Plástico de Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) (Toneli, 2005)

Para fluidos pseudoplásticos, o índice de comportamento do fluido (n) é menor que a unidade. O valor de n decresce com o aumento do conteúdo de sólidos, sendo pouco afetado pela temperatura (Vasques, 2003). O índice de consistência (k) aumenta com o conteúdo de sólidos e normalmente diminui com a temperatura.

A escolha do modelo reológico é feita a partir das características do fluido. O modelo da lei da potência tem se mostrado, em muitos casos, adequado para os cálculos de engenharia e devido à sua simplicidade, tem sido amplamente utilizado nesta área (Rao e Palomino, 1974). Assim, o modelo da lei da potência foi o escolhido para o ajuste dos dados experimentais neste trabalho.

Os materiais espumantes e as emulsões são sistemas importantes numa variedade de aplicações práticas, devido as suas propriedades reológicas peculiares, tais como alta viscosidade a uma tensão de cisalhamento elevada e alta resistência à compressão quando sólidos (Princen, 1983). Na indústria de alimentos os sistemas espumantes são aplicados atualmente na produção de pós de fruta (Kudra e Mujumdar, 2009). Assim, a possibilidade



de entender o comportamento reológico de um sistema espumante com adição de extrato de polpa de cupuaçu, com vistas a futuras aplicações na área de alimentos, pode contribuir para melhorar a utilização e o processamento do cupuaçu.

Espumas usam proteínas como gelatina e albumina para estabilizar a rede formada ao redor das bolhas, criando condições para prevenir os fenômenos de coalescência. (Foegeding et. al, 2006; Chavez-Montes *et al.*, 2007). O conhecimento da reologia e das mudanças reológicas pelas quais passa o produto é importante para controlar e aperfeiçoar processos, aumentando a qualidade (Peressini *et al.*, 2002).

■ OBJETIVO

Nesse contexto, considerando o consumo crescente do cupuaçu, na forma in natura, de polpa ou de diferentes produtos da cadeia agroindustrial, associado à necessidade de se estudar novos métodos que ofereçam alternativas ao seu processamento e utilização tradicionais, este trabalho busca formular sistemas espumantes compostos de amido, albumina em pó, maltodextrina e água, adicionados de polpa de cupuaçu, bem como, avaliar sua composição e comportamento reológico a diferentes temperaturas (10, 20 e 60°C) e proporções mássicas de polpa de fruta : sistema espumante (20:80; 40:60 e 60:40%, m/m).

■ MÉTODOS

Formulação do sistema espumante

Com base em estudos anteriores conduzidos pelos autores com outros tipos de polpa de fruta, a formulação do sistema espumante foi composta de amido de milho (Maizena, São Paulo, Brasil), albumina de ovo em pó (CPovos, Mogi das Cruzes, Brasil) e maltodextrina (Neonutri, São Paulo, Brasil) e água. Para preparação do sistema espumante, pesou-se em balança semi-analítica (Modelo UX220H, Shimadzu, Japão). 20g de albumina, 5g de maltodextrina e 5g de amido. Mediu-se 80mL de água destilada em uma proveta graduada de 100mL. Em um recipiente de plástico, adicionou-se a albumina junto com a água e misturou-se vigorosamente por cerca de 4 minutos com auxílio de um mixer de cozinha (Modelo 2615R, Oster, USA), até que fosse obtido uma mistura com consistência adequada. Em seguida, adicionou-se a maltodextrina e o amido, seguido de nova agitação por cerca de 3 minutos, até que se alcançasse a consistência desejada e a estabilização do sistema. Em seguida, o sistema espumante previamente preparado recebeu a adição de diferentes quantidades de polpa de cupuaçu, de forma a obter as diferentes concentrações de polpa no sistema espumante (20:80; 40:60 e 60:40%, p/p).





Produção da polpa

Na pesquisa foi utilizada polpa de cupuaçu extraída de frutos com maturação adequada, adquiridos em um único lote em um mercado local da cidade de São Luís - MA. Após a aquisição, a polpa in natura sem adição de água ou de conservantes, foi imediatamente armazenada em freezer até o momento das análises.

Medidas reológicas e modelagem matemática

O sistema espumante com adição de polpa teve suas propriedades reológicas medidas a diferentes proporções sistema espumante/ polpa (80:20, 60:40 e 40:60% p/p), temperaturas (10, 20 e 60 °C) e taxas de deformação (0, 333 a 3,333 s⁻¹). As proporções e as temperaturas estudadas, foram definidas pelos autores a partir de experimentos prévios para formulação do sistema espumante. Para determinação dos parâmetros reológicos, empregou-se um viscosímetro Brookfield (modelo DV-II + Pro, Brookfield, USA), utilizando um spindle LV4 (64), acoplado a um banho termostático (modelo ALB 250 C, Tecnal, Brasil) para controle das temperaturas de trabalho. Para obtenção dos parâmetros reológicos e determinação do comportamento, reológico do fluido, utilizou-se o modelo da Lei da Potência (Equação 1) e a viscosidade para fluidos não newtonianos (Equação 2).

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

$$\mu = k(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (2)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento (Pa), μ é a viscosidade dinâmica (Pa.s), n é o índice de comportamento (adimensional), $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s⁻¹) e, k é o índice de consistência (Pa.s) (Steffe, 1996). O modelo foi ajustado aos valores experimentais de viscosidade aparente em função da taxa de deformação, utilizando-se para a modelagem matemática a ferramenta Solver do software Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, EUA). Foram utilizados como critério de determinação de melhor ajuste do modelo aos dados experimentais o coeficiente de determinação R^2 e o Erro Relativo Médio (MRE) Equação (3).

$$\text{MRE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^m \frac{|y_i - y_i^*|}{y_i^*} \quad (3)$$

onde, Y e Y^* representam os valores experimentais e calculados, respectivamente, e m é o número de valores experimentais.





Efeito da temperatura e cálculo da energia de ativação

Para avaliar o efeito da temperatura sobre os valores da viscosidade aparente do sistema estudado, foi utilizada a equação de Arrhenius (Equação 4), que relaciona a viscosidade aparente (Pa.s) em função do inverso da temperatura (T^{-1}), permitindo, a partir dos coeficientes da equação, calcular a energia de ativação.

$$\eta = A_0 \exp\left(\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (4)$$

onde η é a viscosidade aparente (Pa.s); A é uma constante empírica, E_a é a energia de ativação (J/mol), R é a constante universal dos gases (8.314 J/mol K) e T é a temperatura (°C) (Saravacos, 1995).

Caracterização físico-química do sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu

A composição centesimal do sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu, nas diferentes proporções testadas, foi determinada em termos de umidade, proteína, cinzas e lipídeos, segundo os métodos descritos por Adolfo Lutz (2008). O teor de carboidratos foi determinado por diferença dos demais componentes. Após a formulação, o sistema espumante recebeu a adição da polpa de cupuaçu, sendo então seco a 60 °C por 24h, em uma estufa. Após, a alíquota resultante foi moída, e então, utilizada para as análises físico-químicas.

■ RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento da viscosidade

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam o comportamento da viscosidade em função da taxa de deformação, para o sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu nas diferentes concentrações e temperaturas estudadas. Os pontos experimentais foram ajustados pelo modelo da Lei da Potência. Em todas as situações ocorreu um decréscimo da viscosidade com o aumento da taxa de deformação, indicando assim, a característica pseudoplástica do sistema, em razão do aumento do alinhamento das partículas na direção da tensão aplicada, que tornam a resistência ao movimento cada vez menor (Ferreira *et al.*, 2008).





Figura 1. Comportamento da viscosidade aparente em função da taxa de deformação para as temperaturas de 10°C (●), 20°C (□) e 60°C (▲), para 20% de polpa e 80% de sistema espumante (p/p).

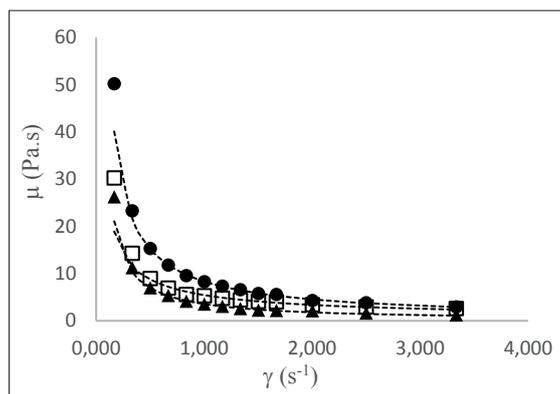


Figura 2. Comportamento da viscosidade aparente em função da taxa de deformação para as temperaturas de 10°C (●), 20°C (□) e 60°C (▲), para 40% de polpa e 60% de sistema espumante (p/p).

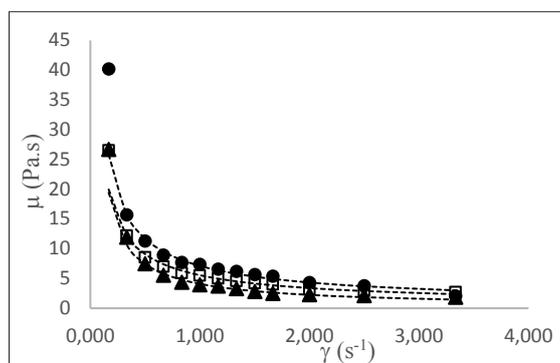
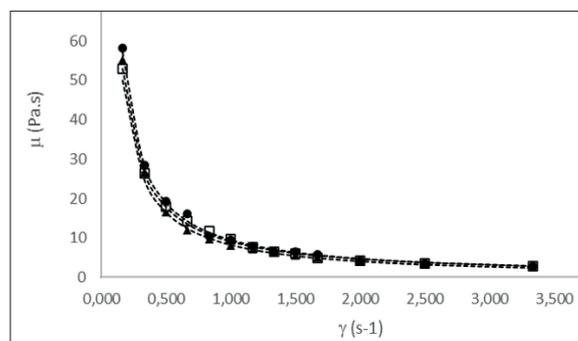


Figura 3. Comportamento da viscosidade aparente em função da taxa de deformação para as temperaturas de 10°C (●), 20°C (□) e 60°C (▲), para 60% de polpa e 40% de sistema espumante (p/p).



Em relação à influência da temperatura, as Figuras 1, 2 e 3 indicam que o sistema espumante com adição de polpa de cupuaçu diminuiu sua viscosidade com o aumento da temperatura. Sabe-se que o aumento da temperatura aumenta a energia cinética das partículas do fluido facilitando o escoamento, comportamento característico de polpas de frutas tropicais (Rao e Palomino, 1974; Garcia *et al.*, 1974).

Como esperado, o sistema composto por 60% em massa de polpa de cupuaçu e 40% em massa de sistema espumante apresentou as maiores viscosidades experimentais, devido ao fato que a maior concentração de fibras proveniente da polpa proporciona uma maior resistência ao escoamento do sistema espumante. Este comportamento também foi relatado





por Borges *et al.* (2017), que ao estudarem o comportamento reológico e estabilidade da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiniflorum*), relataram que quanto maior a concentração da polpa, maior o teor de fibras e maior a viscosidade.

Ajuste do modelo reológico

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros de ajuste do modelo Ostwald-de-Waele, frente aos dados experimentais de índice de consistência (K) e taxa de deformação (n). Como descrito, a eficiência do ajuste do modelo foi avaliada pelos parâmetros estatísticos coeficiente de determinação (R^2) e Erro Relativo Médio (MRE).

Para todos os sistemas e temperaturas estudados, o uso do modelo da Lei da Potência possibilitou bons ajustes dos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,97 e Erros Relativos Médios (MRE) inferiores a 9,92%, indicando que o modelo em questão pode ser utilizado para estimar os dados reológicos do sistema espumante com adição de polpa de cupuaçu em diferentes concentrações e temperaturas.

A viscosidade aparente decresceu com o aumento da taxa de deformação em todas as temperaturas estudadas, sendo o maior decréscimo associado às menores taxas de deformação estudadas (entre 0,333 e 1,000 s^{-1}). O índice de comportamento dos sistemas estudados alcançou um valor máximo de 0,302, indicando para todos eles um comportamento de fluido não-newtoniano do tipo pseudoplástico. Cabral *et al.* (2002), em seu estudo acerca da reologia da polpa de cupuaçu peneirada, também obtiveram comportamento não-newtoniano de caráter pseudoplástico.

Tabela 2. Parâmetros reológicos e estatísticos do ajuste dos dados de polpa: sistema espumante (P:SE), a diferentes temperaturas (T), pelo modelo de Ostwald-de-Waele.

P:SE (%)	T (°C)	K (Pa.sn)	n	R^2	MRE (%)
20:80	10	8,330	0,122	0,9955	3,68
	20	5,418	0,302	0,9803	7,11
	60	3,533	0,002	0,9957	6,13
40:60	10	7,096	0,280	0,9714	9,92
	20	5,521	0,283	0,9835	5,47
	60	4,078	0,129	0,9907	8,02
60:40	10	9,526	0,001	0,9992	4,60
	20	9,027	0,013	0,9994	4,09
	60	8,353	0,002	0,9991	3,213

Em relação ao índice de consistência K, também se observou um comportamento esperado, em que os maiores valores estiveram associados ao sistema mais concentrado (60% de polpa e 40% de sistema espumante) e às menores temperaturas estudadas. Souza *et al.*





(2014) também observaram o mesmo comportamento quando avaliaram o comportamento reológico da polpa de pequi.

Efeito da temperatura e cálculo da energia de ativação

De acordo com Bezerra *et al.* (2009), os valores da energia de ativação (E_a) indicam o comportamento da viscosidade aparente com a variação da temperatura. Dessa forma, altos valores de energia de ativação mostram uma grande variação da viscosidade aparente com a temperatura. Com o auxílio da equação de Arrhenius, foi possível calcular os valores de E_a para os sistemas avaliados. Os resultados obtidos para a energia de ativação, nos diferentes sistemas e temperaturas estudados, são apresentados na Tabela 3.

A equação de Arrhenius se mostrou adequada para ajustar os valores experimentais utilizados para o cálculo da energia de ativação, possibilitando a obtenção de coeficientes de determinação superiores a 0,990. O maior valor da energia de ativação (20.575,78 J/mol) foi obtido com mais polpa (60%) do que sistema espumante (40%), e nas maiores temperaturas estudadas, levando a uma diminuição da viscosidade aparente do fluido e a um escoamento mais rápido (Pereira *et al.*, 2003).

Tabela 3. Energias de ativação para as concentrações de Sistema Polpa: Espumante avaliadas.

Proporção Polpa: Sistema Espumante (%)	E_a (J/mol)	R^2
20:80	1.245,98	0,992
40:60	6.626,55	0,991
60:40	20.575,78	0,994

Análises físico-químicas dos sistemas estudados

A Tabela 4 apresenta os resultados da avaliação físico-química dos sistemas estudados, em relação ao teor de umidade, proteína, lipídeos, cinzas e carboidratos, nos dois sistemas que apresentaram as formulações mais estáveis (20:80 e 60:40, p/p).

Tabela 4. Teores de lipídio (L), umidade (U), cinzas (C), proteína (P) e carboidrato (CA) a diferentes concentrações de polpa de cupuaçu: sistema espumante (P:SE, p/p).

P:SE (%)	L (%)	U (%)	C (%)	P (%)	CA (%)
20:80	1,91	8,24	3,06	15,00	71,79
60:40	3,52	20,56	2,76	10,62	62,54

Verifica-se que houve uma variação no teor de todos os componentes, quando se compara os dois sistemas estudados, o que indica a influência causada pelo aumento da adição de polpa de cupuaçu ao sistema espumante. Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o baixo teor de umidade deveu-se à secagem prévia dos dois sistemas, a 60°C por 24h, procedimento realizado para facilitar a moagem das amostras e realização





das análises físico-químicas. Mesmo após a secagem prévia, percebe-se que o sistema com composição 60:40 apresentou um teor de umidade muito superior ao sistema 20:80, devido ao caráter de diluição que o aumento do teor de polpa de cupuaçu provocou. O maior teor de proteína observado no sistema 20:80 pode ser creditado a maior proporção do sistema espumante no mesmo, que contém em sua formulação, albumina, ingrediente com alto teor de proteína. Igual raciocínio pode ser feito para o teor de carboidratos: o sistema espumante possui amido e maltodextrina, que contêm em sua composição, alto teor de carboidrato.

Como há poucos estudos na literatura relacionado a sistemas espumantes adicionados de polpa de frutas, não foi possível comparar os resultados aqui obtidos com o de outros autores. Em relação à caracterização físico-química da polpa de cupuaçu em ampla faixa de temperatura (-20°C a 60°C), Canuto *et al.* (2010), Matos (2007), Freire *et al.* (2009), Oliveira *et al.* (2010), Rogez *et al.* (2004) e Pugliese (2010), obtiveram os seguintes teores para cada uma das frações: umidade (82,00 a 89,20%), lipídeos (0,15 a 2,30%), cinzas (0,66 a 1,19%), proteínas (0,75 a 1,82%) e carboidratos (10,20%).

Tais resultados indicam que o sistema espumante com adição de polpa de cupuaçu foi capaz de gerar um produto de maior qualidade nutricional, possuindo maior teor de proteína e maior valor energético quando comparado a polpa de cupuaçu.

■ CONCLUSÃO

O sistema espumante com adição de polpa de cupuaçu comportou-se como um fluido não-newtoniano do tipo pseudoplástico. A viscosidade aparente, calculada a partir do modelo da lei da potência, diminuiu com o aumento da taxa de deformação e da temperatura, comportamento esperado para as polpas de frutas em geral.

A equação de Arrhenius possibilitou um bom ajuste dos dados experimentais, indicando que pode ser utilizada para o cálculo da energia de ativação e para expressar a influência da temperatura sobre a viscosidade aparente dos sistemas estudados.

Em relação às análises físico-químicas, o aumento da proporção de polpa de cupuaçu provocou um efeito de diluição no sistema resultante, aumentando o teor de umidade e diminuindo o teor de proteínas e de carboidratos do mesmo. No entanto, a formulação de um sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu gerou um produto com características sensoriais mais atrativas (pela adição da polpa de cupuaçu) e com maior qualidade nutricional (maior teor de proteína e de carboidrato).



■ AGRADECIMENTOS

Ao programa PIBIC/UFMA pela concessão de bolsa de iniciação científica ao estudante Luís Felipe Silva Muniz.

■ REFERÊNCIAS

1. ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Coordenadores: Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea -- São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.
2. BEZERRA, J. R. M. V.; RIGO, M.; DEMCZUK JUNIOR, B.; CÓRDOVA, K. R. V. Estudo do Efeito da Temperatura nas Propriedades Reológicas da Polpa de Morango (*Fragaria ananassa*). **Revista Ambientia**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 37-47, 2009.
3. BORGES, S. F.; PIRES, V. P.; SAMPAIO, R. M.; VÉLEZ, H. A. V. Estudo do comportamento reológico e estabilidade da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*). **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, 2017.
4. CABRAL, M.F.P.; QUEIROZ, A. J.M.; FIGUEIRÉDO, R.M.F. Comportamento reológico da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum schum.*) peneirada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p.37-40, 2002.
5. CALZAVARA, B. B. G. **Fruteiras: abieiro, abricozeiro, bacurizeiro, cupuaçuzeiro**. (Série Culturas da Amazônia, 20), v. 1. Belém: IPEAN, 1970.
6. CANUTO, G. A. B.; XAVIER, A. A. O.; NEVES, L. C.; BENASSI, M. T. Caracterização Físico-Química de Polpas de Frutos da Amazônia e Sua Correlação com a Atividade Anti-Radical Livre. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 32, n. 4, p. 1196-1205, Dez. 2010.
7. CHAVEZ-MONTES, B.E.; CHOPLIN, L.; SCHAER, E. Rheological characterization of wet food foams. **Journal of Texture Studies**, v.38, p.236- 252, 2007.
8. FERREIRA, G. M.; GUIMARÃES, M. J. O. C.; MAIA, M. C. A. Efeito da Temperatura e Taxa de Cisalhamento nas Propriedades de Escoamento da Polpa de Cupuaçu (*T.grandi orum Schum*) integral. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 385-389, 2008.
9. FREIRE, M. T. A. et al. Caracterização físico-química, microbiológica e sensorial de polpa de cupuaçu congelada (*Theobroma grandiflorum Schum*). **Braz. J. Food Technol.** v. 12, n. 1, p. 09-16, 2009.
10. FIETZ, V. R.; SALGADO, M. S. Efeito da pectina e da celulose nos níveis séricos de colesterol e triglicerídeos em ratos hiperlipidêmicos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, n. 3, p. 318-321, 1999.
11. FOEGEDING, E.A.; LUCK, P.J.; DAVIS, J.P. Factors determining the physical properties of protein foams. **Food Hydrocolloids**, v.20, p.284-292, 2006.
12. GARCIA, R.; RIVERA, J.; ROLZ, C. Rheological properties of some tropical fruit products and their enzymic clarification. **Int. Cong. Food Sci & Tech.**, 4., 1974. Proceedings. v.2, p. 18-26. 1974.



13. HOLDSWORTH, S. D. Rheological models used for the prediction of the flow properties of food products: a literature review. **Trans. I. Chem. E. Part. C**, p.139-78, 1993.
14. KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. 2 ed. New York: CRC Press. 438 p, 2009.
15. MATHIAS, T. R. S.; ANDRADE, K. C. S.; ROSA, C. L. D. S.; SILVA, B.A. Avaliação do comportamento reológico de diferentes iogurtes comerciais. **Brazilian Journal of Food Technology Campinas**, v. 16, n. 1, p. 12-20, janeiro /março. 2013.
16. MATOS, Carlyle Brito. Caracterização física, química, físico-química de Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* (willd. Ex. Spreng.) Schum.) Com Diferentes formatos, 2007. 53 p. **Dissertação** (Mestrado em Produção vegetal) Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2007.
17. OLIVEIRA, Johnatt Allan Rocha de; CARVALHO, Ana Vânia; MOREIRA, Débora Kono Taketa; MARTINS, Luiza Helena da Silva. Elaboração e caracterização de estruturado obtido de polpa concentrada de cupuaçu. **Rev. Ci. Agra.** v.53, n.2, p.164-170, Jul./Dez. 2010.
18. PEREIRA, E.A.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIREDO, R.M.F. Comportamento reológico de mel da abelha urucu (*Melipona scutellaris*, L.). **Revista Ciências Exatas e Naturais**, [sn] n.2, v.5, 2003.
19. PERESSINI, D.; SENSIDONI, A.; POLINI, C.M.; GABRIELE, D.; MIGLIORI, M.; CINDIO, B. Filled snacks production by co-extrusion-cooking. Part 3. A rheologicalbased method to compare filler processing properties. **Journal of Food Engineering**, v.54, p.227–240, 2002.
20. PRINCEN, H. M. Rheology of foams and highly concentrated emulsions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 91, n. 1, p. 160-175, 1983.
21. PUGLIESE, Alexandre Gruber. Compostos fenólicos do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e do cupulate: Composição e possíveis benefícios. 2010. **Dissertação**. (Mestrado na área de Bromatologia) - Universidade de São Paulo Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, São Paulo, 2010.
22. RAO, M. A.; PALOMINO, N. O. Flow properties of tropical fruit purees. **Journal of Food Science**, v. 39, n. 1, p. 160-161. 1974.
23. ROGEZ, H.; BUXANT, R.; MIGNOLET, E.; SOUZA, J.N.S.; SILVA, E.M.; LARONDELLE, Y. Chemical composition of the pulp of three typical Amazonian fruits: araçá-boi (*Eugenia stipitata*), bacuri (*Platonia insignis*) and cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*). **European Journal of Research and Technology**, n 218, p 380- 384, 2004.
24. SARAVACOS, G. D.; KOSTAROPOULOS, A. E. Transport properties in processing of fruits and vegetables. **Food Technology**, v.49, p.99-105, 1995.
25. SOUSA, E. P.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M. F. LEMOS, D.M. Comportamento reológico e efeito da temperatura da polpa de pequi em diferentes concentrações. **Braz. J. Food Technol.** Campinas, v. 17, n. 3, p. 226-235, jul./set. 2014.
26. STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. ed. New York: Freeman Press, 1996.
27. TACO – **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos** – 4ª edição. 2011, Disponível em: https://www.nepa.unicamp.br/taco/contar/taco_4_edicao_ampliada_e_revisada.pdf?arquivo=1 . Acesso em: 13 fev. 2021.





28. TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. New York: Chapman & Hall, 1991., 602p.
29. TONELI, J. T. D. C. L.; MURR, F. E. X. ; PARK, K. J. Estudo da reologia de polissacarídeos utilizados na indústria de alimentos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Especial, v.7, n.2, p.181-204, 2005.
30. VASQUES, C. T., Reologia do suco de goiaba: efeito da diluição e do tamanho de partícula. **Dissertação**. (mestrado). Santa Catarina , 2003.



6 CONCLUSÃO

O sistema espumante com adição de polpa de cupuaçu comportou-se como um fluido não-newtoniano do tipo pseudoplástico. A viscosidade aparente, calculada a partir do modelo da lei da potência, diminuiu com o aumento da taxa de deformação e Pda temperatura, comportamento esperado para as polpas de frutas em geral.

A equação de Arrhenius possibilitou um bom ajuste dos dados experimentais, indicando que pode ser utilizada para o cálculo da energia de ativação e para expressar a influência da temperatura sobre a viscosidade aparente dos sistemas estudados.

Em relação às análises físico-químicas, o aumento da proporção de polpa de cupuaçu provocou um efeito de diluição no sistema resultante, aumentando o teor de umidade e diminuindo o teor de proteínas e de carboidratos do mesmo. No entanto, a formulação de um sistema espumante adicionado de polpa de cupuaçu gerou um produto com características sensoriais mais atrativas (pela adição da polpa de cupuaçu) e com maior qualidade nutricional (maior teor de proteína e de carboidrato).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Adenísia de. Determinação físico-química da farinha do mesocarpo do babaçu (*Orbinya Phalerata*) comercializada em Arquimedes – Rondônia- Brasil. 2011. 35 f. Monografia (Licenciatura em Química), Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Arquimedes – RO, 2011.
- ALVARADO, J.D.; AGUILERA, J.M. Métodos para medir Propriedades Físicas em Indústrias de Alimentos. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, p.410, 2001.
- ALVES, D. P, Determinação de características físico-químicas de polpas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum) congeladas comercializadas em Arquimedes, Rondônia, Brasil. 2013. 39 f. Monografia (Bacharel em Farmácia), Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Arquimedes – RO, 2011.
- AQUARONE, Eugênio (Coord.) et al. Biotecnologia Industrial: Biotecnologia na Produção de Alimentos. v 4 . São Paulo: Blucher, 2008.523p.
- BARBOSA, W. C; NAZARÉ, R.F.R; NAGATAJ. Estudo tecnológico de frutas da Amazônia. Belém, CPATU, 1978. 19p (Comunicado Técnico 3).
- BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc, New York – London, p. 780, 1960.
- BORGES, S. F.; PIRES, V. P.; SAMPAIO, R. M.; VÉLEZ, H. A. V. Estudo do comportamento reológico e estabilidade da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*). Revista Brasileira de Iniciação Científica, Itapetininga, 2017.
- BOURNE, M.C. Calibration of rheological techniques used for foods. Journal of Food Engineering, v.16, p.151-163, 1992.
- BOBBIO, F.O.; BOBBIO, P. **Introdução à química de alimentos**. 2ª ed. SãoPaulo: Livraria Varela, 2003. 223p.
- BRANCO, I. G. Suco de laranja concentrado – comportamento reológico a baixas temperaturas. Universidade de Campinas, Campinas-SP, 91p, 1995.
- CALZAVARA, B. B. G. Fruteiras: abieiro, abricozeiro, bacurizeiro, cupuaçuzeiro. (Série Culturas da Amazônia, 20), v. 1. Belém: IPEAN, 1970.
- CAPELLI, A. Influência da faixa de taxas de deformação na precisão de caracterizações reológicas de fluidos. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos, área de Engenharia de Alimentos, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto. 2012, 89 p.
- CARVALHO, A. V., Extração, concentração e caracterização físico-química e funcional das proteínas de semente de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum)

Campinas, 2004, p. Tese de doutorado (Doutor em Tecnologia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UNICAMP).

CASTRO, A. L., Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho, São Carlos, 2007, p, Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Área de Interinidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo (USP).

CECCHI, Heloisa Máscia. Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos. 2 ed. rev. Campinas: Unicamp, 2003. 208 p.

CHAVEZ-MONTES, B.E.; CHOPLIN, L.; SCHAER, E. Rheological characterization of wet food foams. *Journal of Texture Studies*, v.38, p.236- 252, 2007.

CHEVALLEY, J. An adaptation of the Casson equation for the Rheology of Chocolate. *Journal of Texture Studies*, v. 22, p. 219-229, 1974.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. Lavras: ESAL/FAEPE, 1990. 320p.

COHEN, K. O., Estudo do processo de temperagem do chocolate ao leite e de produtos análogos elaborados com licor e gordura de cupuaçu, Campinas, 2003. Tese de doutorado (Doutor em Tecnologia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

COSTELL, E.; DURÁN, L. Reología físico química de los zumos y purés de frutas. *Revista de agroquímica y tecnología de alimentos*. v. 22, n. 1, p. 81-94, 1982.

CRUZ, W. F. da. Obtenção de polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó pelo método de secagem em camada de espuma. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2013.

Cuatrecasas, J. 1964. Cacao and its allies: a taxonomic revision of the genus *Theobroma*. *United States 19 Natural Herbarium*, Washington, v. 35, n. 6, p. 375-614, 1964.

DUCKE, A. 1946. Plantas de cultura pré-colombiana na Amazonia Brasileira: notas sobre as Espécies ou formas espontâneas que supostamente lhes teriam dado origem. Belém: IAN, 1946. 84p. (boletim Técnico,8).

FERREIRA, G. M.; GUIMARÃES, M. J. O. C.; MAIA, C. A. M. Efeito da temperatura e taxa de cisalhamento nas propriedades de escoamento da polpa de cupuaçu (*t. grandiflorum* schum) integral. *Revista Brasileira de Fruticultura de Jaboticabal*, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 385-389, 2008.

FIETZ, V. R.; SALGADO, M. S. Efeito da pectina e da celulose nos níveis séricos de colesterol e triglicérides em ratos hiperlipidêmicos. *Ciênc. e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 19, n. 3, p. 318-321, 1999.

FLAUZINO, R. D. Influência da temperatura e do teor de gordura nos parâmetros reológicos de leite condensado e creme de leite. São José do Rio Preto, Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciências de Alimentos), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita” – Campus São José do Rio Preto. 100p. 2007.

FOEGEDING, E.A.; LUCK, P.J.; DAVIS, J.P. Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, v.20, p.284-292, 2006.

GABAS, A. L; MENEZES, R. S; TELIS-ROMERO, J. Reologia de Biocombustíveis. Lavras: INDI, 2012. 156p.

GONÇALVES, J. R. Introdução à reologia de alimentos fluidos. Reologia e textura de alimentos. São Paulo: ITAL, 1989. xp.

GRATÃO, A.C.A.; BERTO, M.I.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Reologia do açúcar líquido invertido: influência da temperatura na viscosidade. *Ciência e Tecnologia de Alimentos: Campinas*, v.24, n.4, p.652-656, 2004.

GREENFIELD, H.; SOUTHGATE, D. A. Food composition data, management and use. Rome: Food & Agriculture Org. , 2003. 295 p.

GRIGELMO-MIGUEL, N.; IBARZ-RIBAS, A.; MARTIN-BELLOSO, O. Rheology of peach dietary fibre suspensions. *Journal of Food Engineering*, v.39, p.91-99, 1999.

GUEDES, D. B.; RAMOS, A. M.; DINIZ, M. D. M. S. Efeito da temperatura e da concentração nas propriedades físicas da polpa de melancia. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 13, n. 4. Campinas – São Paulo, 2010. P.279-285.

GUERRERO, S.N.; ALZAMORA, S.M. Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behavior of fruit purées: I. Banana purée. *Journal of Food Engineering*, v.33, p. 239- 256, 1997.

HALLING, P. J. Protein-stabilized foams and emulsions. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutritional*, Boca Raton: CRC Pres, v.157, n.2, p.155-203, 1981.

HOLDSWORTH, S. D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. *Journal of Texture Studies*, v.2, p.393-418, 1971.

KAROM, A. A; WAI, C. C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée. Stability and ir drying characteristics. *Food Chemistry*. vol. 64, n.3, p.337 -343, 1999.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D. Rheological properties of fluid fruit and vegetable puree products: compilation of literature data. *International Journal of Food Properties*, 4(2), 179-200, 2001.

LANNES, S. C. S.; MEDEIROS, M. L.; AMARAL, R. L. Formulação de chocolate de cupuaçu e reologia do produto líquido. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* vol. 38, n. 4, out.-dez., 2002.

LARA, A.B.W.H.; NAZÁRIO, G.; ALMEIDA, M.E.W.; PREGNOLATO, W. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 2.ed. São Paulo: Melhoramentos, 1976. V.1, 371p.

LUCCAS, V. Fracionamento térmico e obtenção de gordura de cupuaçu alternativas à manteiga de cacau para uso na fabricação de chocolate. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2001.

MACHADO, C. D. Análise reológica de doce de manga enriquecido com resíduos provenientes do processamento da polpa. Porto Alegre, Monografia (Bacharel em Engenharia Química), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 39p. 2012.

MACOSCO, C. W. *Rheology: principles, Measurements and applications*. Minneapolis, VCH publishers, inc., 1994.

MARTINS, V. B. Perfil sensorial de suco tropical de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum) com valor calórico reduzido, 2008. 141 p. Tese (Doutorado em Alimentos e Nutrição) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MCPHERSON, A.E.; SEIB, P.A. Preparation and properties of wheat and corn starch maltodextrins with a low dextrose equivalent. *Cereal Chemistry*, v.74, n.4, p.424-430, 1997.

PEREIRA, N. R., Estudo comparativo do processo de torração de amêndoas de cupuaçu por microondas frente ao processo de torração convencional, Campinas, 2003. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

PERESSINI, D.; SENSIDONI, A.; POLINI, C.M.; GABRIELE, D.; MIGLIORI, M.; CINDIO, B. Filled snacks production by co-extrusion-cooking. Part 3. A rheologicalbased method to compare filler processing properties. *Journal of Food Engineering*, v.54, p.227–240, 2002.

PERNELL, C. W., E. A. Foegeding. Properties of whey and egg White protein foams. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering aspects* 204, 9-21 (2002).

PRINCEN, H. M. Rheology of foams and highly concentrated emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 91, n. 1, p. 160-175, 1983.

RAO, M. A.; PALOMINO, N. O. Flow properties of tropical fruit purees. *Journal of Food Science*, v. 39, n. 1, p. 160-161. 1974.

RAO, M.A. Propriedades Reológicas dos Alimentos. Curso de Atualização do Departamento de Tecnologia Bioquímico-Farmacêutica da Universidade de São Paulo, 1996.

RAO, M.A.; COOLEY, H.J.; VITALI, A.A. Flow Properties of Concentrated Juices at Low Temperatures. *Food Technology*, v.38, n.3, p.113-119, 1984.

SARAVACOS, G. D.; KOSTAROPOULOS, A. E. Transport properties in processing of fruits and vegetables. *Food Technology*, v.49, p.99-105, 1995.

SCHARAMM, G. Reologia e Reometria – Fundamentos teóricos e práticos, Ed. Artliber, 2006. 232p.

STEFFE, J.F. Rheological methods in food process engineering. 2. ed. Freeman Press, 1996. 412p.

TABILO-MUNIZAGA, G., BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, v. 67. Berkeley, 2005, P.147-156.

TACO -Tabela brasileira de composição de alimentos / NEPA – UNICAMP. - 4 ed. rev. e ampl. -- Campinas: NEPA UNICAMP, 2011.161 p. Disponível em: Acesso em: 09 jan. 2022.

TOLEDO, R. T. Fundamentals of Food Process Engineering. New York: Chapman & Hall, 1991., 602p.

TONELI, J. T. D. C. L.; MURR, F. E. X. ; PARK, K. J. Estudo da reologia de polissacarídeos utilizados na indústria de alimentos. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, Especial, v.7, n.2, p.181-204, 2005.

Venturieri, G.A.; Ribeiro Filho, A. A. 1995. Polinização manual do cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*) *Acta amazônica*. v.25.n.3/4. p.181-191.1995.

VIEIRA, J.A.G. Propriedades termofísicas e convecção laminar em tubos de suco de laranja. Campinas: UNICAMP. 1995. 87p. (Tese de Doutorado).

VILALBA, F. A., Fragmentação mecânica de amêndoas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) por meio de um beneficiador de cilindros. Campinas, Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2003.

VRIESMANN, L. C., Polysaccharides from the pulp of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*): structural characterization of a pectic fraction. *Carbohydrate Polymers*, p. 2-4, 2008.

VRIESMANN, L. C.; SILVEIRA, J. L. M.; CARMEN L. DE O.; PETKOWICZ, C. L. O. Chemical and rheological properties of a starch-rich fraction from the pulp of the fruit cupuassu (*Theobroma grandiflorum*). *Brazil Materials Science and Engineering C*, v.29, p.651–656, 2009.