LINA MARIA RAYO MENDEZ

**PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DE FARINHA DE BANANA VERDE
COM ALTO CONTEÚDO DE AMIDO RESISTENTE EM LEITO
FLUIDIZADO PULSADO**

**São Paulo
2013**

LINA MARIA RAYO MENDEZ

**PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DE FARINHA DE BANANA VERDE
COM ALTO CONTEÚDO DE AMIDO RESISTENTE EM LEITO
FLUIDIZADO PULSADO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de
Mestre em Ciências

**São Paulo
2013**

LINA MARIA RAYO MENDEZ

**PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DE FARINHA DE BANANA VERDE
COM ALTO CONTEÚDO DE AMIDO RESISTENTE EM LEITO
FLUIDIZADO PULSADO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador: Prof^a. Titular
Dr^a. Carmen Cecília Tadini

**São Paulo
2013**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 02 de Maio de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Rayo Mendez, Lina Maria

Processo de aglomeração de farinha de banana verde com alto conteúdo de amido resistente em leito fluidizado pulsado / L.M. Rayo Mendez. -- versão corr. -- São Paulo, 2013.

111 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Farinhas 2. Banana verde 3. Amido 4. Fluidização 5. Leito I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.

*Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso!
Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu
DEUS, estará com você por onde você andar.
Josué cap1:9*

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus meu pai celestial, meu melhor amigo,
que sempre está do meu lado iluminando meus passos,
a quem sou eternamente grata pelas bênçãos.*

*A meus pais Shirley e Martin meus tesouros mais valiosos,
aos quem devo tudo o que sou hoje,
por acreditar em mim, por me apoiar e entender o sacrifício da distancia.*

*A minha irmã por ser o pedacinho que completa minha vida com alegria,
por ser amiga, protetora, e seu apoio incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à Prof^a. Dr^a. Carmen Cecilia Tadini, pela credibilidade depositada em mim, pela orientação, admirando seu exemplo de dedicação acadêmica. Pelos conhecimentos transmitidos, pelo acompanhamento e incentivo constante durante o desenvolvimento do trabalho que serviram para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Gustavo Cesar Dacanal, agradeço por me permitir formar parte do seu grupo de trabalho, pela paciência, atenção e ensinamentos dados durante a etapa de aprendizagem e realização do projeto. Apreciando com carinho sua grande vontade de ensinar e transmitir o conhecimento.

Ao Prof. Dr. Jorge Andrey Wilhelms Gut, pelo agradável convívio no laboratório LEA, pelas sugestões e comentários para melhorar o trabalho, e pelo exemplo de disciplina e amor pela academia.

À CAPES, pela ajuda financeira recebida durante a realização deste trabalho.

À Dr^a. Livia Chaguri e Carvalho, quem sempre esteve disposta a colaborar e ensinar tudo o que estivesse à disposição para o aprimoramento deste trabalho. Pela amizade, dicas e sugestões, estou muito grata.

À banca examinadora pela disponibilidade e pela contribuição com este trabalho.

À Prof. Dr^a Elizabete Wenzel da Faculdade de Ciências Farmacêuticas e sua equipe de trabalho, Eliana, Eliane, Fabiana, Gabriela, que participaram em conjunto com a linha de pesquisa.

Ao Laboratório de Operações Unitárias e Engenharia de Alimentos Prof^a Cynthia Ditchfield e a técnica Edneli, por facilitar as instalações e implementos para levar a cabo o desenvolvimento do projeto.

Ao Laboratório de Nanotecnologia Biossensores e Dispositivos Prof. Dr. Andrés Vercik, e colaboradores, Lucy, pela gentileza e amabilidade de disponibilizar seus materiais para o desenvolvimento da pesquisa. Pelas tardes de café e por fazer me sentir parte do grupo de laboratório.

Aos meus avos paternos e maternos, Elsy e Raul, Inês e Walter por seu doce eterno amor e suas orações que me protegem ainda na distância. A minha família toda, aqueles que estão longe e aqueles que ficam por perto, obrigada, em especial a Francisco, Yuri pelas palavras de motivação, e conforto, por confiar e acreditar em mim.

Ao meu anjo guardião Lênin, que com seu amor incondicional sempre esteve me acompanhando nos momentos mais difíceis, pelos seus conselhos para me tornar uma melhor pessoa cada dia.

Ao Prof. Dr. Carlos Humberto Mora Bejarano da Universidad Nacional de Colombia, pela bonita amizade, seus conselhos, conhecimentos transmitidos e sobre tudo especial gratidão por ser quem tornou possível o sonho de iniciar meu mestrado no Brasil.

Aos meus colegas, amigos e colaboradores do Laboratório de Engenharia de Alimentos LEA, com quem compartilhei muitos momentos agradáveis, pelos aportes acadêmicos, correções do português e bons desejos: Ana Maria, Ana Cristina, Ana Fabricia, Analia, Ándres, Arlet, Carola, Helena, Ivan, Jorge, Luz, Livia, Lilian, Otilia, Paula, Rafael, Rosa e Vanessa.

Aos meus amigos no Brasil e Colômbia que compartilharam belas lembranças e gratos momentos comigo: Adriana, Alex, Albert, Andres A, Camilo J, Jhon, JC Triana, Luis, Milton, Nubia, Nico, Lina P, Rosa, Victor, Viviana, Veronica em especial a Ana Maria, Jahn Pierre, por me receber quando cheguei aqui no Brasil e por fazer parte desse projeto de iniciar meu mestrado. Meus caros amigos, Arlet, Carola, Manuel, Ruben, Ricardo por ficar presentes nos momentos mais difíceis e sua amizade sincera.

Aos alunos de iniciação científica do Prof. Dr Gustavo Dacanal, Cintia, Catolino, Eduardo Rafael, Daniela, meus sinceros agradecimentos por me acompanhar em todos os ensaios, por me ajudar durante meu estágio na USP Campus Pirassununga.

Meus caros amigos em Pirassununga, que fizeram minha estadia muito agradável e que sempre torceram para que meu trabalho fosse melhor cada dia: Andrea, Cristian, Camila, Julian, Lorena, Sergio. Especialmente a German, Jaiber e Lina, por ficar do meu lado quando mais precisei.

RESUMO

A aglomeração de partículas é um processo muito usado na indústria, que permite melhorar as propriedades de instantaneização de produtos em pó sem alterar suas características nutricionais e sensoriais. O objetivo deste trabalho foi realizar o processo de aglomeração de partículas de farinha de banana verde com alto conteúdo de amido resistente, usando um leito fluidizado pulsado avaliando seu efeito sobre as características finais da farinha, para ser usada como ingrediente funcional na melhora do índice glicêmico e níveis de insulina plasmática no sangue. A matéria prima usada foi farinha de banana verde com alto conteúdo de amido resistente e um leito fluidizado, constituído com um sistema de pulsação proporcionado por uma válvula de esfera, trabalhando à frequência de 600 rpm. Solução de alginato de sódio (5 g/100 g, a 35 °C) foi usada como agente ligante na atomização a uma vazão de 3,0 mL/min. As condições de processamento como temperatura, pressão, vazão de ar, e tempo total de processo, foram mantidas em 95 °C, 1,0 bar, 0,3 m/s, 50 min., para amostras de 400 g. Resultados após o processo de aglomeração indicam que houve uma diminuição do teor de umidade, aumento do diâmetro médio das partículas e do índice de fluidez, assim como elevada porosidade da partícula com forma irregular, características decorrentes de um produto aglomerado. A farinha aglomerada apresentou conteúdo de amido resistente de $53,95 \pm 0,22$ % em comparação a $57,49 \pm 0,43$ % na matéria prima. Pode-se concluir que o processo de aglomeração não alterou as propriedades funcionais da farinha de banana verde mantendo os níveis do AR, resultando na melhora das propriedades de instantaneização das partículas e dispersão em água.

Palavras-chaves: Aglomeração, leito fluidizado, farinha de banana verde, amido resistente.

ABSTRACT

The powder agglomeration process is widely used in food industry, due to increases the instant properties, rapidly dissolving in liquids without altering their nutritional and sensory characteristics. The aim of this study was to assess the particle agglomeration process of the green banana flour (GBF) with high resistant starch (RS) content, using a pulsed fluidized bed and evaluating its effect on the final characteristics of flour, to be used as a functional ingredient in improving glycemic and plasma insulin levels in the blood. It was used samples of 400 g of GBF and a fluidized bed constituted with a pulsation system provided by a sphere valve, working at frequency of 600 rpm. Solution of sodium alginate (5 g/100 g, 35 °C) was used as the binder in the spray at a rate of (3.0 mL/min). The processing conditions such as temperature, pressure, air flow and total process time were maintained at 95 °C, 1.0 bar, 0,3 m/s and 50 min. As results, they were seen a reduction of moisture content, an increase of average particle diameter, high flowability and porosity with irregular shape, typical characteristics from an agglomerated product. The agglomerated flour has RS content of 53.95 ± 0.22 % in comparison to 57.49 ± 0.43 % to the original content. In conclusion, the agglomeration process did not affect the functional properties of green banana flour, maintaining levels of resistant starch, and results in an improvement in the instant properties of the particles and dispersibility in water.

Key-words: Agglomeration; fluidized bed; green banana flour; resistant starch.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1- Evolução dos diferentes estados de maturação dos frutos de banana evidenciando a redução do teor de amido e consequente acúmulo de açúcares (EMBRAPA, 2008).....	26
Figura 3.2- Estrutura química da amilose (A) e da amilopectina (B) (TESTER; KARKALAS; QI, 2004).....	28
Figura 3.3- Micrografia de grânulos de amido de amido de banana verde (LII et al., 1982). 29	
Figura 3.4- Variação de delta (graus) com a frequência (rad.s^{-1}) para materiais típicos e para a suspensão aquosa de 5 % de farinha de banana verde (STEFFE, 1996; TRIBESS, 2009).	31
Figura 3.5- Viscosidade aparente obtida em viscoamilógrafo da farinha de banana verde comparada com a de farinha de trigo (TRIBESS, 2009).....	31
Figura 3.6- Processo de atomização do agente ligante dentro do leito (a) e crescimento dos grânulos durante o processo de aglomeração (b) (adaptado de DACANAL, 2009; IVESON <i>et al.</i> , 2001).....	36
Figura 3.7- Estágios de fluidização com diferentes velocidades de entrada de gás. (Adaptado de LEVENSPIEL, 2000).....	40
Figura 3.8- Gráfico de Geldart para classificação de partículas (adaptado de GELDART, 1973 e LEVENSPIEL 1999)	46
Figura 3.9- Parâmetros mais frequentes de medida de partículas irregulares, diâmetro da área projetada, diâmetro de Feret máximo e mínimo (Adaptada de YANG, 2003).....	49
Figura 3.10- Representação dos fatores de forma, comparação com figuras geométricas e intervalo de valores (Adaptado de SAAD <i>et al.</i> , 2011).....	52
Figura 4.1- Análise de firmeza dos frutos de banana verde em Texturômetro SMS, mod TA-XT2i plus, Inglaterra, carga 30 kg (a) e posicionamento da banana verde em teste de penetração (b)	53
Figura 4.2- Diagrama de blocos do processo de produção de farinha de banana verde (adaptado de TRIBESS, 2009).....	55
Figura 4.3- Fotografias das etapas do processo de obtenção de farinha de banana— Recepção dos frutos em caixas de 20 kg aprox. (a), análise de firmeza (identificação do estado de maturação) no texturômetro (b), lavagem e desinfecção dos frutos (c), descascamento manual (d), Pré-tratamento I (e), Pré-tratamento II (f), processo de secagem em bandejas perfuradas (g), secador de ar forçado (h), moagem (Moinho desintegrador) (i).....	57

Figura 4.4- Esquema do leito fluidizado. A - Ventilador; B - Válvula gaveta; C - Resistência elétrica; D -Controlador de temperatura; E - Desvio do ar; F - Rotâmetro; G - Sensor de temperatura; H -Placa distribuidora de ar; I - Válvula esfera (sistema de pulsação); J - Câmara de aço inox (leito); K - Bico aspersor; L- Ciclone; M (DACANAL, 2009).	60
Figura 4.5- Fotografia da vista frontal do equipamento leito fluidizado pulsado, montado, segundo prototipo proposto por DACANAL (2009).....	61
Figura 4.6- Equipamento Tap Density Tester (LOGAN, mod TAP-2S, USA).....	66
Figura 4.7- Dispositivo FLODEX (HANSON RESEARCH mod 21-101-050, USA).	67
Figura 4.8- Representação do esquema do ângulo de repouso obtido pelo dispositivo FLODEX (Adaptado de TEUNOU <i>et al.</i> , 1995).....	68
Figura 4.9- Plataforma para medida do angulo de repouso obtido por queda livre (Adaptado de TEUNOU <i>et al.</i> , 1995).	69
Figura 4.10- Estereomicroscópio (CARL ZEISS, mod Stereo Discovery. V8, Alemanha)....	71
Figura 5.1- Conteúdo de umidade (b.s) da farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada.....	80
Figura 5.2-Variação do conteúdo de amido resistente nos frutos da banana verde, na farinha de banana verde sem aglomerar e na farinha de banana verde aglomerada.	81
Figura 5.3- Densidade aparente de partícula, densidade do leito compactado e densidade da partícula da FBV sem aglomerar e aglomerada.	83
Figura 5.4- Imagens editadas do ângulo de repouso por queda livre para a farinha de banana verde sem aglomerar (a), e aglomerada (b).	85
Figura 5.5- Distribuição de tamanho médio de partícula (μm), em função da fração mássica da farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada.	87
Figura 5.6- Micrografias das partículas sem editar, de farinha de banana verde sem aglomerar (a), e (b), e aglomerada (c) e (d), obtidas através do estereomicroscópio.	88
Figura 5.7- Micrografia de partículas de farinha de banana verde sem aglomerar (a) e aglomerada (b) obtida pelo estereomicroscópio em modo binário.....	89
Figura 5.8- Circularidade em função do diâmetro da área projetada d_a (μm) da farinha de banana verde sem aglomerar (a), e da farinha de banana aglomerada (b). ...	90

Figura 5.9- Diagrama de frequência de dados para o diâmetro de área projetada para a farinha de banana verde sem aglomerar (a) e para a farinha de banana verde aglomerada (b).....	91
Figura 5.10- Elongação e diâmetro da área projetada d_a (μm) da farinha de banana verde sem aglomerar (a), e farinha de banana aglomerada (b).....	92
Figura 5.11- Compacidade e diâmetro da área projetada d_a (μm) da farinha de banana verde sem aglomerar (a), e farinha de banana aglomerada (b).....	93
Figura 5.12- Indicação de classificação no diagrama de <i>Geldart</i> dos percentis D_{10} , D_{50} , D_{90} de FBV sem aglomerar, em que ρ_s é a densidade da partícula (sólido), e ρ_f é a densidade do ar (Adaptado de GELDART, 1973).	95
Figura 5.13- Indicação de classificação no diagrama de <i>Geldart</i> dos percentis D_{10} , D_{50} , D_{90} de FBV aglomerada, em que ρ_s é a densidade da partícula (sólido), e ρ_f é a densidade do ar (Adaptado de GELDART, 1973).	95
Figura 5.14- Tempo de instantaneização de farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada.....	97
Figura 5.15- Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura de farinha de banana verde sem aglomerar (a), (c), (e), (g), e (i), e aglomerada (b), (d), (f), (h), e (j).	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Valores médios de °Brix corrigido, pH, acidez titulável e firmeza medidos na polpa da banana durante o processo de amadurecimento.....	26
Tabela 3.2- Conteúdos de amido, amilose e amilopectina em farinhas elaboradas com diferentes espécies de bananas verdes (Adaptada de MOTA et al., 2000). ..	29
Tabela 3.3- Classificação nutricional do amido <i>in vitro</i>	32
Tabela 3.4- Características da forma das partículas pela circularidade	51
Tabela 4.1- Parâmetros operacionais no processo de aglomeração de partículas de farinha de banana verde no leito fluidizado pulsado.....	63
Tabela 4.2- Relação entre o índice de Hausner (<i>HR</i>) e o nível de fluidez.	66
Tabela 4.3- Classificação da fluidez segundo o índice de Carr (<i>CI</i>).	67
Tabela 5.1- Firmeza, sólidos solúveis, pH e conteúdo de amido resistente dos frutos analisados antes da produção da farinha de banana verde, comparados com dados da literatura.	74
Tabela 5.2- Teor de umidade, atividade de água, pH, teor de sólidos solúveis e conteúdo de amido resistente da farinha de banana verde produzida de acordo com Tribess (2009).....	75
Tabela 5.3- Ensaios em diferentes concentrações de alginato de sódio testadas no bico atomizador, mantidas a 35 e 50°C, com pressão de 1 e 1,5 bar, e vazão de 3 e 5mL/min.	78
Tabela 5.4- Valor médio e desvio padrão de densidade aparente, compactado e de partícula para FBV antes e depois de processada.....	82
Tabela 5.5- Índices de fluidez de <i>Hausner (HR)</i> , de <i>Carr (CI)</i> e porosidade total da partícula.	83
Tabela 5.6- Índice de fluidez pelo dispositivo Flodex, altura do pó remanescente, ângulo de repouso do FLODEX e queda livre.....	85
Tabela 5.7- Diâmetro médio aritmético $D[1,0]$, diâmetro médio de <i>Sauter</i> $D[3,2]$, diâmetro de <i>Brouckere</i> $D[4,3]$, percentil 10% (D_{10}), mediana (D_{50}), e percentil 90% (D_{90}). ..	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALD	Amido lentamente digerido
AOAC	Association of official Analytical chemists
AR	Amido Resistente
ARD	Amido rapidamente digerido
CEAGESP	Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais do Estado de São Paulo
EP	Escola Politécnica
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FBV	Farinha de Banana Verde
FCF	Faculdade de Ciências Farmacêuticas
FZEA	Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e estatística
ITAL	Instituto de Tecnologia de Alimentos
LEA	Laboratório de Engenharia de Alimentos
NAPAN	Núcleo de Apoio a Pesquisa em Alimentos e Nutrição
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{FLODEX}	Ângulo do FLODEX
CI	Índice de Carr
$D[1,0]$	Diâmetro médio aritmético
$D[3,2]$	Diâmetro médio volume -superfície (Sauter)
$D[4,3]$	Diâmetro De Brouckere
d_a	Diâmetro da área projetada
d_{ai}	Diâmetro da área projetada da partícula no intervalo de tamanho i.
dp_m	Diâmetro médio de partícula
d_{cilindro}	Diâmetro do cilindro do FLODEX
d_{FLODEX}	Diâmetro do furo do disco do FLODEX
F_{max}	Diâmetro máximo de Feret
F_{min}	Diâmetro mínimo de Feret
h_{FLODEX}	Altura do pó remanescente
HR	Índice de Hausner
m_f	Massa do produto coletada ao final do processo
m_i	Massa inicial de produto
m_{elut}	Massa de produto coletado no ciclone por elutriação
m_{inc}	Massa de produto incrustada nas paredes do leito
m_{torr}	Massa de produto correspondente à formação de torrões
P	Perímetro
S_p	Área superficial da partícula
u_{mf}	Velocidade mínima de fluidização
v_{eqi}	Volume equivalente da partícula
X_i	Fração numérica
x_{mi}	fração mássica

SIMBOLOS GREGOS

ε_t	Porosidade total
η	Rendimento do processo
ρ_b	Densidade aparente
ρ_f	Densidade do ar
ρ_s	Densidade do sólido
ρ_{tap}	Densidade do leito compactado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVO	23
2.1	Objetivo Geral	23
2.2	Objetivos Específicos.....	23
3	REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1	A Banana	23
3.1.1	Classificação Botânica	24
3.1.2	Produção de Banana no Brasil.....	24
3.1.3	Amadurecimento dos Frutos	25
3.2	Amido	27
3.2.1	Amido Presente na Farinha de Banana Verde (FBV)	28
3.3	Amido Resistente.....	32
3.4	Alimentos Funcionais.....	34
3.5	Aglomerção de Partículas	35
3.6	Fluidização de Partículas	38
3.7	Leito fluidizado pulsado	42
3.8	Classificação das Partículas	45
3.8.1	Classificação de Geldart para Sólidos Particulados	45
3.9	Caracterização Morfológica das Partículas	47
3.10	Análise de Tamanho e Forma das Partículas.....	48
3.10.1	Tamanho das Partículas	48
3.10.2	Forma das Partículas.....	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1	Matéria-Prima	52
4.2	Caracterização dos Frutos	52
4.2.1	Firmeza.....	52
4.2.2	Teor de Umidade	53
4.2.3	Teor de Sólidos Solúveis	54
4.2.4	pH	54
4.2.5	Atividade de Água.....	54
4.2.6	Conteúdo de Amido Resistente.....	54
4.3	Processo de Produção de Farinha de Banana Verde.....	55
4.4	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA FARINHA DE BANANA VERDE.....	58
4.4.1	Teor de Umidade	58

4.4.2	Atividade de Água.....	58
4.4.3	pH	58
4.4.4	Teor de Sólidos Solúveis	58
4.4.5	Conteúdo de Amido Resistente Antes e Depois do Processo de Aglomeração	59
4.5	Descrição, Construção e Montagem do Equipamento Leito Fluidizado Pulsado	59
4.6	Equipamento e Montagem.....	60
4.7	Operação e Processo de Aglomeração no Equipamento Leito Fluidizado	61
4.8	Rendimento do processo de aglomeração de partículas em leito fluidizado pulsado.....	63
4.9	Atomização da Solução Ligante	64
4.10	Caracterização da Farinha de Banana Verde Antes e Depois do Processo de Aglomeração de Partículas	64
4.10.1	Teor de Umidade	65
4.10.2	Densidade Aparente, Densidade do Leito Compactado, Densidade da Partícula, Porosidade da Partícula.....	65
4.10.3	Índice de Fluidez de Hausner e Índice de Carr	66
4.10.4	Medição da Fluidez pelo Dispositivo FLODEX	67
4.10.5	Medida do Ângulo de Repouso em Queda Livre	68
4.10.6	Processamento e Aquisição de Imagens	70
4.10.7	Distribuição de Tamanho de Partículas e Diâmetro Médio	71
4.10.8	Imagem e Morfologia	73
4.10.9	Tempo de Instantaneização:	73
4.10.10	Análise de micrografia por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1	Caracterização dos Frutos para o Processo de Produção de Farinha de Banana Verde.....	74
5.2	Análises Físico-Químicas da Farinha de Banana Verde	75
5.3	Rendimento do processo de aglomeração de partículas em leito fluidizado pulsado.....	76
5.4	Atomização do Agente Ligante.....	76
5.5	Caracterização da Farinha de Banana Verde Antes e Depois do Processo de Aglomeração de Partículas	78
5.5.1	Teor de Umidade e Conteúdo de Amido Resistente	79
5.5.2	Densidade Aparente, Densidade do Leito Compactado, Densidade da Partícula, Porosidade da Partícula.....	81

5.5.3	Índice de Fluidez de <i>Hausner</i> , de <i>Carr</i> e Porosidade Total da Partícula.	83
5.5.4	Índice de Fluidez pelo Dispositivo FLODEX e Ângulo de Repouso Obtido por Queda Livre	84
5.5.5	Determinação do Diâmetro, Médio Aritmético $D[1,0]$, Médio de Volume-Superfície (<i>Sauter</i>) $D[3,2]$ e de <i>Brouckere</i> $D[4,3]$ e os Percentis 10 %, 50 % e 90 %.....	86
5.5.6	Distribuição de Tamanho de Partículas.....	87
5.5.7	Imagens de Tamanho de Partículas.....	88
5.5.8	Análise de Forma das Partículas	89
5.5.9	Classificação de Sistemas Particulados pelo Diagrama de Fluidização de <i>Geldart</i> ...	94
5.5.10	Tempo de Instantaneização.....	96
5.5.11	Análise de micrografia por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	98
6	CONCLUSÕES.....	101
7	BIBLIOGRAFIA	103

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado o quinto produtor mundial de banana com uma produção de 6,9 milhões de toneladas por ano, com a produção concentrada na região do Nordeste, sendo que o primeiro lugar é ocupado pela Índia com 31,5 milhões de toneladas (FAO, 2010). Das variedades produzidas encontram-se a Prata comum, Prata Anã, Maçã, Mysoure, Terra, Nanica e a Nanicao do subgrupo (*Musa Cavendishii*), sendo que esta última representa a variedade de maior importância econômica pelo tamanho, forma, sabor e aroma do fruto, características desejadas em países que importam o fruto (BORGES, 2004; EMBRAPA, 2008; IBGE, 2010; MOTA *et al.*, 2004).

Por ser um fruto de padrão climatérico caracterizado pelo aumento da taxa respiratória e produção do etileno durante o amadurecimento, pode ser colhido ainda verde, e o manejo pós-colheita é fundamental para favorecer a sua longevidade durante a comercialização. Industrialmente esse manejo não ocorre adequadamente, e os frutos sofrem danos causados na pós-colheita, devido a: manuseios excessivos ou inadequados, submetidos a condições inapropriadas de armazenamento, como falta de embalagens e; ausência da cadeia de frio. Do total produzido no Brasil, são perdidos aproximadamente 40 % na fase pós-colheita, sendo os frutos rejeitados de maneira inapropriada (EMBRAPA, 2008).

Em certos países, a rejeição de bananas verdes não é muito adequada, devido à prática do descarte nos rios, como acontece na Costa Rica, ocasionando um problema no ecossistema aquático, pois o alto teor de carboidratos aumenta a demanda bioquímica de oxigênio. Segundo Zhang *et al.* (2005) as bananas rejeitadas podem ser reaproveitadas como uso industrial, como por exemplo, a produção de farinha de banana verde que representa baixo custo gerando um retorno financeiro para as regiões afetadas.

A banana quando no estado de maturação 1, totalmente verde, apresenta um alto conteúdo de amido resistente, ou seja, carboidrato não disponível para ser metabolizado no intestino delgado, e consequentemente não resulta em picos do

índice glicêmico no sangue (BJÖRCK, 2006; GUYTON; HALL, 2000), quando ingerido. Por esta característica, o amido resistente pode ser considerado um ingrediente funcional, aumentando o teor de fibras na dieta humana (MENEZES *et al.*, 2004; NUGENT, 2005).

A indústria alimentícia exige produtos naturais que sejam de alta qualidade e que ainda tenham uma ampla disponibilidade de conservação para o consumo humano. Assim processos como a secagem que removem o conteúdo de água presente nos alimentos pela desidratação, torna-se um método de conservação eficaz, econômico que reduz consideravelmente a deterioração trazendo vantagens para a sua comercialização como aumento da vida de prateleira e custos de transporte reduzidos (MUJUMDAR; MENON, 2006).

Tribess (2009) desenvolveu um processo de obtenção de farinha de banana verde com alto conteúdo de amido resistente, por meio de secagem a temperatura constante de 50 °C. Dos resultados obtidos, foi observado que o amido resistente presente na farinha é termossensível, perdendo a sua estrutura em temperaturas superiores a 70 °C. A farinha também apresenta baixo índice de solubilidade em água à temperatura ambiente.

Para que a farinha de banana verde seja utilizada como ingrediente funcional em formulações doces e salgada, um desafio tecnológico se apresenta no sentido de torná-la instantânea e/ou termorresistente. Por isso o processo de aglomeração de partículas oferece uma vantagem que permite melhorar ou modificar as propriedades finais de produtos em pó, para seu uso específico em formulações que sejam rapidamente dissolvidos e reconstituídos em líquidos, como água e leite, oferecendo um tempo menor de instantaneização (SCHUBERT, 1987; TURCHIULI *et al.*, 2005).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do processo de aglomeração de partículas em leito fluidizado pulsado sobre a concentração de amido resistente e instantaneização da farinha de banana verde.

2.2 Objetivos Específicos

- Selecionar os parâmetros do processo de aglomeração no leito fluidizado pulsado.
- Caracterizar e avaliar a farinha de banana verde no pré e pós-processamento quanto às propriedades químicas, físicas e morfológicas das partículas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A Banana

A banana é uma das frutas mais consumidas e comercializadas no mundo na forma *in natura*, sendo produzida na maioria dos países de clima tropical e datando suas origens do Continente Asiático. Constitui uma importante fonte de alimento por possuir vitaminas A, B6 e C, minerais, baixa quantidade de gorduras, aporte energético para o corpo e boa digestibilidade. Pode ser consumida verde ou madura crua ou processada, dependendo da espécie e da cultura de consumo (BORGES; SOUZA, 2004; EMBRAPA, 2008).

3.1.1 Classificação Botânica

A bananeira é uma planta que pertence à classe das Monocotiledôneas, de ordem *Scitamineae*, família das Musáceas, e compõe-se de dois gêneros: *Musa* (bananas comestíveis) e *Ensete* (bananas silvestres), que são formados de 24-30 e 7-8 espécies, respectivamente. O gênero *Musa* apresenta maior importância, devido ao maior número de espécies, a ampla distribuição geográfica dos cultivares e serem espécies comestíveis (CASTRO; KLUGE, 1997; RIBEIRO, 2011).

O gênero *Musa* está constituído por quatro grupos *Australimusa*, *Calimusa*, *Rodachlamys* e *Eu-Musa*, classificadas segundo o número de cromossomos, designados como: diplóide, triplóide e tetraplóide. Das espécies selvagens diplóides que evoluíram a partir de cruzamentos incluem-se a *Musa acuminata* (principalmente) e a *Musa balbisiana*, resultando em híbridos com formação de indivíduos triplóides e tetratriplóides. No caso do subgrupo *Musa cavendishii* triplóide (AAA), da *Musa acuminata* e de cultivares como a Nanica e Nanicão, e o subgrupo Prata (AAB) dos cultivares Prata, Terra e Maçã, que são os cultivares mais comuns no Brasil e em outras partes do mundo, os frutos apresentam maior tamanho, vigor e consistência mais agradável em comparação aos diplóides (GONÇALVES, 2006; NELSON, 2006; SILVA, 2007).

Embora os cultivares Nanica e Nanicão serem do mesmo subgrupo *cavendishii*, diferem entre si: a Nanicão possui um pseudocaulo mais robusto e com altura de (3,0 a 3,5) m, frutos de média curvatura, folhas mais longas e estreitas, do que a Nanica, que tem folhas menores, pseudocaulo curto e frutos de grande curvatura. Assim, a variedade Nanicão representa um melhor interesse na produção.

3.1.2 Produção de Banana no Brasil

Segundo a FAO (2010) o Brasil é o quinto produtor mundial de banana, com uma produção anual de 6,9 milhões de toneladas. Em primeiro lugar está a Índia com 31,8 milhões de toneladas, seguida pela China (9,8 milhões de toneladas), Filipinas (9,1 milhões de toneladas), e Equador (7,9 milhões de toneladas). A produção brasileira de banana está concentrada na maior parte da região do

Nordeste com 38,05 %, seguida pela Sudeste com 31,97 %, Sul com 14,69 %, Norte com 11,70 % e por último, a Centro Oeste com 3,58 % (IBGE, 2010). É cultivada por grandes, médios e pequenos produtores, sendo que 60 % da produção é proveniente da agricultura familiar (BORGES, 2004).

As variedades mais comercializadas no Brasil são: a Prata comum, Prata Anã, Maçã, Mysoure, Terra e D'Angola que pertencem ao grupo AAB, estas variedades são escolhidas principalmente para o consumo interno e as variedades Nanica, Nanicão e Grande Naine do grupo (AAA) são principalmente destinadas para exportação devido à produtividade e importância econômica, especialmente a Nanicão, que possui melhores atributos em relação à forma, tamanho, sabor e aroma, características apreciadas em outros países (EMBRAPA, 2008).

Do total produzido no país, pode ser atingido até 40 % em perdas dos frutos, decorrentes do manuseio excessivo, ou inadequado, e condições inadequadas de armazenamento (EMBRAPA, 2008; ZHANG *et al.*, 2005).

3.1.3 Amadurecimento dos Frutos

A banana é uma fruta altamente perecível, característica relacionada ao processo fisiológico do padrão respiratório climatério, caracterizado pelo aumento da taxa respiratória e produção do etileno durante o amadurecimento. Os frutos podem ser colhidos ainda verdes e o manejo pós-colheita é fundamental para favorecer a longevidade dos frutos durante a comercialização. Decorrente do amadurecimento, alterações fisiológicas e sensoriais nos frutos ocorrem, como mudança na pigmentação da casca, amaciamento da polpa (textura), aparência e composição química (teor de açúcares, teor de amido, acidez, quantidade de compostos fenólicos) (EMBRAPA, 2008; MEDINA, *et al.*, 1985).

As mudanças e os diferentes estados de maturação são mostrados na Figura 3.1, em que: 1 fruta totalmente verde, 2 fruta verde com traços amarelos, 3 fruta mais verde que amarelo, 4 fruta mais amarela que verde, 5 fruta amarela com um pouco de verde, 6 fruta totalmente amarela, 7 fruta amarela com poucas manchas

negras, e existe um estado adicional descrito por Lii *et al.* (1982) e Ditchfield; Tadini (2002), denominado estágio de maturação 8 como fruta amarela com muitas manchas negras. Ditchfield, Tadini (2002) e Tribess (2009), avaliaram também as características físico-químicas de bananas da variedade Nanicão nos oito estágios de maturação supracitados, concluindo que o melhor método para determinação do estágio de maturação da banana é a firmeza medida através de um texturômetro, expressa como força (N).

Figura 3.1- Evolução dos diferentes estados de maturação dos frutos de banana evidenciando a redução do teor de amido e consequente acúmulo de açúcares (EMBRAPA, 2008).

Resultados das análises físico-químicas realizadas nas bananas tipo Nanicão em diferentes estágios de maturação segundo Ditchfield, Tadini (2002) são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1- Valores médios do teor de sólidos solúveis, pH, acidez titulável e firmeza medidos na polpa da banana durante o processo de amadurecimento.

Estágio de maturação	Bananas Analisadas	Sólidos solúveis (°Brix)	pH	Acidez Titulável ⁽¹⁾ (%)	Razão Sólidos Solúveis/Acidez	Firmeza (gf)
1	15	4,9	5,317	2,416	2,0	2617
2	5	6,5	4,777	4,432	1,5	1402
3	1	19,5	4,494	6,269	3,1	539
4	6	20,8	4,629	5,090	4,2	320
5	10	20,7	4,645	4,959	4,3	269
6	9	21,7	4,852	4,423	5,0	225
7	9	21,1	5,199	3,471	6,3	156
8	6	20,9	5,436	2,663	8,3	82

⁽¹⁾Acidez titulável expressa em porcentagem de ácido málico (DITCHFIELD; TADINI, 2002).

Os autores concluíram que o parâmetro de firmeza encontra-se fortemente influenciado pelos estágios de maturação da fruta apresentando um comportamento inversamente proporcional. Tribess (2009) ressalta que definir a maturação dos frutos pela cor da casca pode decorrer em diagnósticos falsos, e que pequenas alterações do tom verde entre claro e escuro acarretam consideráveis mudanças na composição da banana, especialmente quando se trata do amido resistente.

3.2 Amido

O amido é o carboidrato mais comum produzido pelas plantas de ordem superior para armazenamento de energia; depois da celulose é o segundo maior fornecedor de biomassa produzida na terra. Nos humanos e animais, o amido também representa a principal fonte de energia na dieta (ENGLYST N. K.; ENGLYST, N. H.; HUDSON; COLE T.; CUMMINGS, 1999; ENGLYST; KINGMAN; CUMMINGS, 1992; JAY-LIN, 2003; SINGH *et al.*, 2010; SMITH, 1999).

Encontra-se presente amplamente em vegetais, grãos de cereais, leguminosas, frutas imaturas e tubérculos, armazenado intracelularmente na forma de grânulos semicristalinos, de estrutura e organização complexa que podem apresentar formas arredondadas, lenticulares ou poligonais dependendo da natureza botânica e com tamanhos de diâmetro que variam de (1-100) μm (HONGSHENG *et al.*, 2009; LAJOLO; MENEZES, 2006; SMITH, 1999; TESTER; KARKALAS; QI, 2004).

Química e estruturalmente o amido é um hidrato de carbono polimérico, também denominado como polissacarídeo. Os grânulos estão compostos por dois tipos de polímeros de glicose, denominados amilose e amilopectina: a amilose é essencialmente de cadeia linear com unidades de D-glicose e enlaces α -(1 $\rightarrow$ 4) e a amilopectina é de cadeia altamente ramificada com ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) e α -(1 $\rightarrow$ 6) diferindo em peso e tamanho, representando entre (25 e 75) %, do conteúdo de amido total (Figura 3.2). A relação entre os dois polissacarídeos varia dependendo da natureza botânica do amido (JAY-LIN, 2004, SINGH; DARTOIS; KAUR, 2010).

Figura 3.2- Estrutura química da amilose (A) e da amilopectina (B) (TESTER; KARKALAS; QI, 2004).

3.2.1 Amido Presente na Farinha de Banana Verde (FBV)

O amido é o principal componente da banana verde, representando um conteúdo médio de (70-80) % aproximadamente em base seca (ZHANG *et al.*, 2005). A farinha de banana verde segundo estudos realizados contem entre (61,3-76,5) g/100 g de amido em base seca, sendo a variedade Nanica e Nanicão (*Musa cavendishii*) que apresenta os valores mais altos (59,95 g/100 g-79,89 g/100 g), em comparação com outras variedades como a Prata, Prata anã, Mysore, entre outras (IZIDORO *et al.*, 2011; JUAREZ-GARCIA *et al.*, 2006; MOTA *et al.*, 2000).

A quantidade de amilose e amilopectina também varia com as diferentes espécies, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Conteúdos de amido, amilose e amilopectina em farinhas elaboradas com diferentes espécies de bananas verdes (Adaptada de MOTA et al., 2000).

Variedade	Conteúdo de amido (%)	Conteúdo de Amilose (%)	Conteúdo de Amilopectina*
Prata comum	72,4 ± 3,6	20,3 ± 2,0	52,1
Ouro da mata	65,7 ± 2,8	21,9 ± 2,2	43,8
Nanica	76,5 ± 2,9	22,2 ± 1,3	54,3
Nanicão	76,1 ± 3,7	21,7 ± 2,6	54,4
Prata anã	68,2 ± 4,0	22,4 ± 1,5	45,8
Mysore	61,3 ± 6,9	18,8 ± 2,2	42,5
Ouro Colatina	75,5 ± 2,0	23,0 ± 2,9	52,5
Maçã	64,9 ± 2,5	19,7 ± 2,5	45,2

Média ± DP (n=3)

*Calculado por diferença

Os grânulos de amido possuem forma e tamanhos irregulares com tendência oval e algumas estrias na superfície, como mostrados na Figura 3.3 (BELLO-PEREZ *et al.*, 2005; LII *et al.*, 1982; ZHANG *et al.*, 2005). São relatados tamanhos alongados que variam de (7-25) µm e esferoidais de (15-40) µm (KAYISU *et al.*, 1981), sendo que os grânulos de menor tamanho desaparecem primeiro decorrentes da maturação dos frutos, devido a sua conversão em açúcares (LII *et al.*, 1982).

Figura 3.3- Micrografia de grânulos de amido de amido de banana verde (LII et al., 1982).

Em termos gerais, os grânulos de amido estão sempre relacionados com as características de gelatinização e de colagem, tornando-os de interesse para a indústria de alimentos. Ao serem submetidos a temperaturas elevadas em presença de água, sofrem um intumescimento gradativo, perdendo sua cristalinidade, sofrendo assim uma mudança de fase conhecida como gelatinização, que leva a um posterior rompimento da sua estrutura, o que resulta em solubilização parcial das moléculas de amilose (retrograda rapidamente) e amilopectina (retrograda mais lentamente).

No progressivo resfriamento da suspensão de amido ocorre a formação de uma malha ou rede tridimensional de moléculas associadas fisicamente por pontes de hidrogênio, que produz um gel viscoelástico, responsável pelas características de viscosidade e afetando a textura e aceitação dos produtos ao longo do tempo. Portanto, a gelatinização do amido é indesejável no processo de solubilização da farinha de banana verde em diferentes preparações (BILIADERIS, 1991; DONOVAN, 1979; MAROULIS *et al.*, 1991; ZHANG *et al.*, 2005).

É relevante conhecer as estruturas moleculares e a relação estrutura-função que pode diferenciar e caracterizar os produtos que contêm amido e assim poder controlar as suas propriedades mais importantes tais como: estabilidade, viscosidade, resistência do gel e vida de prateleira (ZHANG *et al.*, 2005).

Análises reológicas da farinha de banana verde (*Musa Cavendishii*) foram conduzidas por Tribess (2009), que observou um caráter elástico que se sobrepôs ao viscoso apresentando um comportamento de gel quando suspensões aquosas com 5 % da farinha foram aquecidas e resfriadas em um intervalo de temperatura entre (25-95) °C. Pode ser observado na Figura 3.4, na qual são apresentados os comportamentos reológicos de um fluido Newtoniano e de um sólido Hookeano, em que materiais que possuem propriedades reológicas associadas entre estes dois comportamentos são considerados como materiais viscoelásticos e sua predominância de caráter viscoso ou elástico dependem da sua tendência de se aproximar a cada uma das curvas (STEFFE, 1996).

Figura 3.4- Variação de delta (graus) com a frequência ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) para materiais típicos e para a suspensão aquosa de 5 % de farinha de banana verde (STEFFE, 1996; TRIBESS, 2009).

Além das análises reológicas, os resultados viscoamilográficos da curva obtida do perfil da viscosidade aparente, a qual indica o comportamento reológico da farinha de banana verde quando submetida a um processo de aquecimento e agitação com excesso de água; revelaram viscosidade aparente de 0,30 Pa.s a 25 °C, valor superior ao da farinha de trigo de 0,05 Pa.s à mesma temperatura, como se observa na Figura 3.5 (TRIBESS, 2009).

Figura 3.5- Viscosidade aparente obtida em viscoamilógrafo da farinha de banana verde comparada com a de farinha de trigo (TRIBESS, 2009).

Segundo Tribess (2009), na simulação do cozimento mantendo a suspensão a 90°C por 10 min, ocorre uma redução da viscosidade aparente decorrente da dissociação molecular da amilose e da amilopectina, sendo a amilose solubilizada e liberada na fase aquosa.

3.3 Amido Resistente

A principal fonte de energia dos seres humanos surge dos carboidratos consumidos na dieta. Entre esses carboidratos encontra-se o amido (RAMOS 2009). Segundo Englyst *et al.* (1992) o amido pode ser dividido em vários tipos, dependendo da rapidez da digestão no intestino delgado e a suscetibilidade à hidrólise enzimática: amido rapidamente digerido (ARD), amido lentamente digerido (ALD) e amido resistente (AR), cuja classificação está apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Classificação nutricional do amido *in vitro*.

Tipo de amido	Exemplo de ocorrência	Provável digestão no intestino delgado
Amido rapidamente digerível (ARD)	Alimentos amiláceos recentemente cozidos	Rápida
Amido lentamente digerível (ALD)	Principalmente cereais crus	Lenta, mas completa.
Amido resistente (AR):		
Tipo I (AR ₁): Amido fisicamente inacessível na matriz do alimento por parede celular ou proteínas	Grãos de cereais inteiros ou parcialmente moídos, sementes e tuberosas.	Resistente
Tipo II (AR ₂): Grânulos nativos protegidos da digestão pela conformação ou estrutura do grânulo (cristalinidade tipo B)	Batata crua e banana verde	Resistente
Tipo III (AR ₃): Amido retrogradado	Batata cozida e resfriada, pão e flocos de milho.	Resistente
Tipo IV: amidos modificados quimicamente	Ésteres e éteres de amido e amidos com ligações cruzadas	Resistente

Fonte: Englyst *et al.* (1992).

O amido resistente (AR) é definido como a soma do amido e de produtos de sua degradação que resistem à digestão ou não são absorvidos no intestino delgado de indivíduos saudáveis, podendo ser fermentado no intestino grosso (ASP, 1992; EERLINGEN; DELCOUR, 1995; ENGLYST *et al.*, 1992).

Na classificação do amido resistente (AR) realizada por Englyst *et al.* (1986) são citados quatro tipos, de acordo com a resistência à digestão: Tipo I, amido inacessível fisicamente identificado como (AR₁) que corresponde ao amido encapsulado pela parede de alguns vegetais; Tipo II, amido resistente nativo (AR₂), menos frequente, encontrado em alimentos não cozidos, pois a alta densidade e a parcial cristalinidade dos grânulos reduzem a suscetibilidade às enzimas; Tipo III, identificado como (AR₃), amido retrogradado, produzido durante ciclos de cozimento e resfriamento correspondendo ao amido que após ter sido gelatinizado e resfriado, passa pelo processo de recristalização, denominado de retrogradação (processo irreversível); e Tipo IV, denominado (AR₄) que representa o amido que sofreu alterações químicas na sua estrutura (reações de *Maillard* ou caramelização).

Em indivíduos normais e saudáveis quando ocorre ingestão de alimentos, a glicose no sangue (glicemia) é elevada no estado pós-prandial e é regularizada após (3 a 4) h da ingestão, ocorrendo o retorno da concentração de glicose sanguínea aos níveis basais (GUYTON; HALL, 2000). Assim, o amido resistente quando ingerido, provoca um aumento retardado da glicose na corrente sanguínea, pois a digestão é mais lenta, e ao contrário do que ocorre com o amido cozido, que normalmente é digerido rapidamente no intestino delgado, o metabolismo do AR ocorre de (5 a 7) h após a refeição, melhorando a resposta glicêmica e insulinêmica pós-prandial, provocando um efeito de maior saciedade no indivíduo. Por tanto esses efeitos são de grande importância para o tratamento e doenças cardiovasculares, obesidade e diabetes (MENEZES *et al.*, 2004; SAJILATA *et al.*, 2006; FUENTES-ZARAGOZA *et al.*, 2010).

De acordo com Menezes *et al.* (2004) e Nugent (2005), o amido resistente que não é absorvido no intestino delgado, quando chega no cólon, o que não foi digerido é usado como substrato de fermentação pelas bactérias anaeróbicas que constituem 99 % da flora intestinal humana, funcionando como uma fibra alimentar e prebiótico, por proporcionar benefícios à saúde intestinal, aumentando o volume e maciez do bolo fecal e a regularidade das evacuações. Os produtos da fermentação do AR são ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), acético, propiônico e o mais importante o butírico que contribui para a saúde do cólon inibindo o crescimento de

células cancerígenas devido à redução do pH no intestino grosso (NUGENT, 2005; PEREIRA, 2007).

Devido ao aumento da incidência de problemas de saúde como obesidade, aumento do colesterol e câncer, há uma necessidade de mudanças no consumo de produtos de alta qualidade, naturais, orgânicos e funcionais, que influenciem benéficamente o organismo humano, que sejam de fácil aquisição, distribuição e bom preço. Portanto, é consenso geral das autoridades, saúde pública e nutricionistas, que alimentos ricos em fibras e AR sejam inclusos na dieta (FREITAS, 2000; PEREIRA, 2007).

3.4 Alimentos Funcionais

Conforme a ciência avança, os hábitos alimentares também mudam de maneira significativa para uma nova fronteira da nutrição adequada à ideal, em que os alimentos numa dieta normal não só fornecem nutrientes suficientes para satisfazer as necessidades metabólicas de um indivíduo ou proporcionar atributos hedonistas, como o gosto, mas também podem trazer benefícios para a saúde e reduzir o risco de doenças. Portanto esses alimentos recebem o nome de alimentos funcionais (DIPLOCK *et al.*, 1999).

O desenvolvimento de alimentos funcionais ocorreu primeiro no Japão no ano de 1984, a partir de um projeto desenvolvido pelo governo, envolvendo diversas universidades com o apelo de melhorar a saúde dos seus habitantes e reduzir assim os altos custos gerados no sistema de saúde (FARR, 1997). Com o tempo, países da Europa mostraram grande interesse no consumo de alimentos funcionais.

Um alimento pode ser considerado como funcional quando possui substâncias ou componentes que se ingeridos proporcionam um bem estar para a saúde e ajudam no tratamento e redução do risco de doenças. Estes podem variar desde nutrientes isolados, derivados de plantas, alimentos processados e alimentos geneticamente “modificados” (ANJO, 2004; POLLONIO, 2000). No caso da farinha de banana verde, o amido resistente (AR) atua na resposta glicêmica causando

efeitos benéficos na saúde intestinal e, portanto, a farinha pode ser considerada como ingrediente funcional, em formulações alimentícias.

Embora esses alimentos funcionais exerçam efeitos benéficos para a saúde, não devem ser considerados como medicamentos e devem permanecer na sua fase natural atingindo uma função alvo e benéfica para o corpo, sendo consumidos em quantidades normais de uma dieta comum, definição dada pela Comissão Europeia em Ciência dos Alimentos Funcionais na Europa (FuFoSE) (DIPLOCK *et al.*, 1999).

3.5 Aglomeração de Partículas

A aglomeração de partículas é um processo muito usado atualmente na indústria de alimentos que permite melhorar ou modificar as propriedades de sólidos particulados para seu manuseamento como fluidez, resistência mecânica e capacidade de umedecimento. É amplamente usado para obter produtos em pó instantâneos (leite, café, chocolate, etc), com o intuito que estes sejam rapidamente dissolvidos e reconstituídos em líquidos, como água ou leite, e sem alterar suas características nutricionais e sensoriais. Uma reconstituição rápida e completa dos produtos desidratados e convertidos em solução é um indicador de boa qualidade (FORNY; MARABI; PALZER, 2011; SCHUCHMANN, 1995; SCHUBERT, 2003; TURCHIULI *et al.*, 2005; TURCHIULI; SMAIL; DUMOULIN, 2012).

É também conhecido na literatura como granulação, ou desenho de partículas, onde os atributos finais desejados dos grânulos de pó são controlados mediante a combinação dos parâmetros de funcionamento do equipamento usado (temperatura, pressão, alimentação do pó e geometria do equipamento, entre outras) (IVESON *et al.*, 2001).

As partículas finas sofrem uma modificação de tamanho, causadas pela união das mesmas mediante um líquido ligante geralmente atomizado em leitos fluidizados, de jorro, e tambores rotativos, cada um, operado com diferentes parâmetros, para finalmente, formar uma estrutura (partícula) maior chamada de agregado poroso (DACANAL, MENEGALLI 2009a; DACANAL, MENEGALLI 2010; IVESON *et al.*, 2001; SCHUBERT, 1987; TARDOS *et al.*, 1997; TURCHIULI *et al.*, 2005).

O mecanismo usado durante a aglomeração das partículas é fundamentado na atomização de um líquido a uma pressão relativa, o líquido pode ser água ou uma solução ligante, cuja escolha depende da natureza do material, se este apresenta características hidrofóbicas ou hidrofílicas (IVESON *et al.*, 2001; MORT, 2005; PALZER, 2009; TARDOS *et al.*, 1997).

O líquido é pulverizado em pequenas gotículas através de um bico aspersor, sobre a superfície das partículas finas que se encontram em fluxo dentro do leito, e devido ao umedecimento da superfície das mesmas estas se tornam mais pegajosas por uma combinação de forças que entre as mais comuns são de capilaridade e forças de van der Waals. Em consequência, o movimento continuo da fluidização dentro do leito e as colisões entre as partículas molhadas permitem a adesão entre elas. Após a secagem com ar quente fluidizado, formam-se novas estruturas aglomeradas porosas que são chamadas de partículas aglomeradas (IVESON *et al.*, 2001; JIMENEZ; TURCHIULI; DUMOULIN, 2006; MORT, 2005; TARDOS *et al.*, 1997).

Figura 3.6- Processo de atomização do agente ligante dentro do leito (a) e crescimento dos grânulos durante o processo de aglomeração (b) (adaptado de DACANAL, 2009; IVESON *et al.*, 2001)

O crescimento progressivo dos grânulos finos ocorre adotando os seguintes passos: umedecimento, nucleação (adesão de partículas primárias, ou seja, muito pequenas) e coalescência (aglomerados maiores se combinam devido à colisão e movimento), desgaste e quebra (aglomerados maiores e secos se quebram pelo atrito causado pela agitação) (Figura 3.6 b) (IVENSON *et al.*, 2001; MORT, 2005; TEUNOU; PONCELET, 2005; TURCHIULI; SMAIL; DUMOULIN, 2012).

Uma adequada aglomeração e ligação das partículas dependem em grande proporção na dispersão das gotículas (área de projeção do spray) do agente ligante e a quantidade (massa) do produto fluidizado, dessa forma, quando se produz um elevado agitação das partículas e uma ampla área de projeção, pode-se obter uma dispersão apropriada que atinge os objetivos da aglomeração (MORT, 2005).

Segundo Hoge Kamp e Schubert (2003) o processo de aglomeração de partículas melhora as propriedades dos alimentos em pó, especialmente quando se trata de instantaneização e molhabilidade em líquidos, devido ao aumento do tamanho das partículas que possuem uma rápida penetração na superfície da água e uma maior fluidez em comparação aos produtos obtidos de menor tamanho e até os obtidos por spray dryer. Esses efeitos foram estudados também por Jinapong *et al.* (2008) e Kimura, Terauchi (1999), que estudaram leite de soja em pó e cacau granulado respectivamente. Os autores avaliaram que mesmo as partículas que são hidrofóbicas, podem ser submetidas ao processo de atomização com um agente ligante e bons resultados na dissolução do produto em líquidos sem necessidade de agitação são obtidos.

Geralmente os processos de aglomeração estão caracterizados pela umidificação, porém segundo Schuchmann (1995), e Schubert (1993), existem três grupos, divididos em:

- a) Aglomeração por compressão (exemplo: comprimidos)
- b) Aglomeração por crescimento (exemplo: a granulação e peletização)
- c) Aglomeração por secagem (exemplo: secagem por spray)

Os grupos (a) e (b) podem ser subdivididos em, úmido ou seco, dependendo se tem uma solução ligante no processo (SCHUCHMANN, 1995). Na aglomeração por

umidificação, como foi anteriormente citado, a atomização de um líquido ou vapor condensado ocorre sobre um grupo de sólidos ou partículas que ficam em suspensão, denominado método dinâmico (como exemplo: leitos fluidizados e misturadores) ou em leito fixo, denominado método estático (como por exemplo: esteiras). A união entre as partículas ocorre devido às forças de coesão e pontes líquidas que são geradas entre elas, por colisão para o caso das partículas em movimento e pontos de contato para aquelas que estão paradas. Cabe resaltar que produtos obtidos por aglomeração por compressão como pós prensados, extrusados ou peletizados, possuem propriedades muito baixas de instantaneização e de porosidade (SCHUBERT, 1993).

A aglomeração por secagem ou a bem conhecida como *spray dryer*, utiliza como matéria prima um líquido o qual vai ser submetido à secagem. Dessa forma, as partículas são formadas pela formação de pontes sólidas entre as partículas na medida em que a secagem ocorre e tem que ser formadas antes de se terminar o processo (JENSEN, 1975).

O uso de cada um dos processos e equipamentos para o processo de aglomeração de partículas varia de acordo com as características finais para o produto desejado. Entretanto, segundo Kyaw e Hoge Kamp (1999), dos processos mais usados para obter produtos alimentícios instantâneos são: aglomeração úmida em leito fluidizado, com agitação ou aglomeração por jato de vapor.

3.6 Fluidização de Partículas

O princípio da fluidização está baseado em manter um grupo de partículas em agitação, numa câmara fechada, através da passagem de gás de modo ascendente por um grupo de sólidos particulados que se encontram distribuídos numa placa porosa localizada dentro do leito, o que acarreta a movimentação das partículas. A vazão ou velocidade do gás de entrada deve ser suficiente para sustentar o peso das partículas e a queda de pressão deve ser mantida constante, dessa forma, quando o sistema é semelhante a um fluido recebe o nome de fluidizado (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; LEVENSPIEL, 2000).

Esta tecnologia oferece vantagens para a manipulação de partículas finas favorecendo a transferência de massa e calor entre o gás e o material fluidizado, minimizando gradientes de temperatura entre regiões muito ativas, podendo ser um processo controlado de maneira segura e confiável. Por isso, o processo de fluidização é muito utilizado em indústrias químicas, farmacêuticas, petroquímicas, metalúrgicas e de alimentos. Porém, existem desvantagens dependendo do tipo de parâmetros de processo e produto usados, devido à falta de uniformidade de contato gás-sólido, quando o ar de entrada passa através dos sólidos em forma de bolhas, o que significa que somente há um contato com uma quantidade pequena de partículas numa região específica, e a outra quantidade fica dentro do leito sem fluidizar (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Visando compreender como funciona e opera a fluidização, Levenspiel, (2000) realizou uma ilustração e posterior descrição do fenômeno de fluidização de partículas com diferentes variações da alimentação de gás no processo. Por sua vez, existem diferentes tipos de estágios de fluidização, que variam dependendo da velocidade do gás de entrada e movimentação do sólido no interior do leito, como mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7- Estágios de fluidização com diferentes velocidades de entrada de gás. (Adaptado de LEVENSPIEL, 2000)

Os estágios de fluidização são descritos segundo Kunii; Levenspiel, 1991; Levenspiel, 2000 e MacCabe, 1993, a seguir:

O leito fixo refere-se ao regime no qual o escoamento de um gás ou líquido a baixas velocidades de fluidização de forma ascendente através de um conjunto de partículas finas, o qual não atinge a capacidade de arrastar o peso do particulado. O gás percorre os pequenos interstícios vazios do material ou poros sem movimento das partículas, aumentando a queda de pressão e deixando o leito estático.

Quando a velocidade de fluidização aumenta, ocorre um arrasto das partículas até estas ficarem suspensas, instante que se identifica a velocidade mínima de fluidização (u_{mf}). Quando a força de arraste se iguala com o peso do material, a altura do leito aumenta e a queda de pressão permanece constante, o leito então recebe o nome de leito de fluidização incipiente ou estágio de mínima fluidização.

A fluidização particulada ou homogênea ocorre quando há um aumento na velocidade acima da mínima de fluidização, e o fluido é um líquido. Neste estágio, o

leito possui uma ampla uniformidade de expansão e o movimento das partículas no fluido são mais independentes e distantes, portanto, este movimento pode ser mais intenso se ocorre um aumento na velocidade.

Incrementos progressivos e acima da velocidade mínima de fluidização do gás entrado como fluido, causam a formação de bolhas pela vazão excessiva de ar, gerando assim, a fluidização borbulhante ou agregativa. Pequenas bolhas de ar são produzidas, que por sua vez, coalescem aumentando de tamanho, e depois se rompem no topo do leito. Este fenômeno gera instabilidade no leito com a formação de canais preferenciais, o que não favorece a fluidização das partículas, devido a que a fluidização se divide entre a bolha que se encontra vazia sem partículas, e uma menor proporção de partículas fluidizadas pelo gás.

Um comportamento muito característico da formação decorrente de bolhas muito grandes que atingem o diâmetro do leito é o regime de fluidização conhecido como *Slugging* ou pistonamento do leito. O leito é sucessivamente separado por slugs de partículas, comportamento também dependente do tipo de material fluidizado. No caso de finos, a expansão do leito é maior do que com sólidos grosseiros. Os *slugs* podem apresentar três diferentes formas, axiais, de parede, e flutuantes, o primeiro obedece a bolhas de ar que possuem em volta partículas finas que se deslizam suavemente pelo leito, o segundo se apresenta quando as bolhas de ar se aderem à parede do leito subindo até o topo com partículas ao redor. Por ultimo se encontra, o *slug* flutuante, no qual são produzidas bolhas de ar de grande tamanho que separam em blocos os sólidos dentro do leito, e estes são empurrados para acima do leito como um êmbolo, depois as partículas caem para o seguinte *slug* formando um ciclo.

O contínuo aumento na velocidade de fluidização dá origem a um estágio denominado turbulento característico pela oscilação da pressão dentro do leito, e as bolhas de gás simétricas são substituídas por espaços vazios irregulares. Quando o aumento da velocidade, as partículas são arrastadas produzindo um leito diluído que é chamado de regime pneumático, no qual as partículas que se encontram em suspensão são arrastadas e recuperadas por um ciclone que as retornam ao leito, é o leito fluidizado circulante.

Um critério muito importante para estabelecer condições de processo e o uso de leitos fluidizados, são as densidades dos sólidos (finos, médios e grosseiros), devido a que representam um fator determinante no limite de velocidade, pressão dos gases, agentes ligantes e tipo de leitos usados. Consequentemente, existem dificuldades relacionadas à difícil fluidização de partículas muito finas que geralmente estão indicadas no diagrama de Geldart, quem dividiu os sólidos em quatro categorias A, B, C, e D, dependendo do tamanho de partícula e sua densidade. Assim, os pertencentes ao grupo C, são descritos como partículas com tamanhos menores a 30 μm destacados por serem mais coesivos, e que requerem uma fluidização com características especiais como, por exemplo, o uso de leitos fluidizados com uma geometria diferente, ou mecanismos de vibração ou pulsação que intensificam a homogeneidade do leito durante o processo de aglomeração devido à resistência oferecida pelo leito particulado (REYES *et al.*, 2007; TURCHIULI *et al.*, 2005; XU; ZHU, 2006).

3.7 Leito fluidizado pulsado

Avanços na indústria e tecnologia de secadores do tipo leito fluidizado, foram introduzidos com alterações no equipamento para ser aplicado em sólidos difíceis de fluidizar. Entre essas alterações, se encontram leitos com, vibrações, variação na sua geometria, rotativos, com jatos de ar laterais e pulsados (REYES *et al.*, 2007). Por sua vez, é o leito fluidizado pulsado a técnica que oferece algumas vantagens respeito às outras pelas melhoras no processo. Consiste num fluxo de gás de entrada pulsado, como um sistema de ar de abre e fecha a uma frequência regulada. (KUDRA; MUJUMDAR, 2009; REYES *et al.*, 2007).

Segundo Reyes *et al.* (2007) a pulsação oferece vantagens como: fácil fluidização de partículas com formato irregular, minimização da formação de canais através do leito de pó, fluidização de partículas frágeis, diminuição da queda de pressão dentro do leito e reduzido consumo de ar de até 30 e 50 %. Porém, a montagem de um sistema de pulsação requer a modificação de um leito fluidizado convencional com a instalação de sistemas mecânicos e acoplamento de peças adicionais que resultam num aumento dos custos operacionais e de investimento.

As pulsações de ar no leito podem ser provocadas por diversas formas, uma delas é realizada por meio de uma válvula borboleta a qual é facilmente instalada na tubulação do ar de entrada e acionada a uma velocidade específica angular, assim a velocidade de rotação da válvula dependerá da frequência de pulsação usada no processo (KUDRA; MUJUMDAR, 2009). Enquanto que as outras são baseadas na transferência da corrente de gás no fundo do leito através de um disco perfurado e rotativo localizado abaixo do leito (GAWRZYNSKI, GLASER, KUDRA, 1999) e por último o uso de um dispositivo que redireciona o fluxo de gás em diferentes seções na base da câmara do leito fluidizado (PRACHAYAWARAKORN *et al.*, 2005; REYES *et al.*, 2007).

REYES *et al.* (2007) trabalhou na secagem de rodela de batata usando um leito fluidizado pulsado cônico, com acoplamento de um disco perfurado localizado na base do leito, o funcionamento é baseado na entrada de ar pela abertura a qual é distribuída segundo a rotação do disco. Assim, a frequência do fluxo de ar pulsante é determinada pela velocidade do movimento da placa giratória. Os autores concluíram que os resultados foram satisfatórios e com difusividades semelhantes aos reportados na literatura que usaram uma secagem convencional, também agregaram que um dos fatores importantes para a obtenção de bons resultados depende da velocidade de rotação do disco.

Resultados similares foram encontrados por AMBROSIO-UGRI e TARANTO (2007), os autores usaram um leito fluidizado pulsado com disco perfurado com um ângulo de 60° através do qual o gás é distribuído alternadamente, foi usado para secagem de pó altamente coesivo como 2-hidroxibenzóico, concluindo que este tipo de equipamento pode ser usado para uma secagem efetiva e que o uso da pulsação alcança uma considerável redução no consumo de ar e, portanto resulta num aumento no rendimento na produção.

GAWRZYNSKI; GLASER e KUDRA (1999) usaram como sistema de pulsação num leito fluidizado, uma válvula distribuidora com uma abertura na forma circular com um ângulo central de 120° usando como matéria prima partículas de polipropileno com alto grau de umidade não ligada. Pulsação semelhante, mas com uma válvula de abertura de 90° para outro tipo de materiais como cristais de açúcar, celulose, papel e grãos de feijão respectivamente, foi usada por GAWRZYNSKI e

GLASER (1996); KUDRA *et al.* (2002) e NITZ e TARANTO (2007), os autores ressaltaram como característica importante que a velocidade mínima de fluidização no leito pulsante é maior comparada com leitos convencionais e que aumenta com a carga de partículas, porém a queda de pressão resulta menor em leito fluidizado pulsado devido às altas velocidade de ar comparado com os leitos convencionais que requerem maior quantidade de ar e portanto um maior consumo de energia no processo. GAWRZYNSKI e GLASER (1996) observaram que a pulsação de ar quente proporcionou uma mistura intensa das partículas de açúcar desenvolvendo uma região interfacial que melhorou o processo de secagem.

REYES *et al.* (2006) encontrou que houve uma maior agitação de sementes de nabo e uma alta taxa de secagem usando um sistema de pulsação através de um cilindro perfurado girando horizontalmente, quando for comparada com sistemas de secagem convencionais. ZHANG e KOKSAL (2006) usaram uma frequência de pulsação por meio da energização de uma válvula solenoide fluidizando esferas de vidro e partículas de sílica, assim concluíram que aumentos na pulsação resultam no aumento na transferência de calor entre as partículas, diferente do que ocorre nos leitos fluidizados com fluxo contínuo.

Um decréscimo no consumo de energia e menores vazões de ar usadas no processo, foi encontrada por PRACHAYAWARAKORN *et al.* (2005), usando como sistema de pulsação um sistema semelhante a uma válvula de borboleta através de duas placas metálicas giratórias para a secagem de arroz.

DACANAL e MENEGALLI (2010) obtiveram resultados semelhantes durante a aglomeração de partículas de acerola em pó, complementando que o uso de leito fluidizado pulsado é uma opção viável para a obtenção de partículas aglomeradas porosas, diminuindo sua coesividade, aumentando a fluidez e melhorando as propriedades de instantanização das partículas, com uma combinação de parâmetros de processo e sobre tudo a regulação da pulsação de ar na válvula, a qual foi realizada por um motor trifásico conectado diretamente à válvula que se encontrava acoplada no ducto de ar.

3.8 Classificação das Partículas

Segundo Geldart (1973), nem todos os materiais ou sistemas sólidos fluidizam da mesma maneira. Alguns materiais são capazes de fluidizar mais uniformemente e fatores, como a geometria e dimensão da partícula, podem afetar diretamente a fluidização. Geldart (1973) propôs uma classificação dos sólidos particulados em quatro categorias, de acordo com tamanho e densidade da partícula.

3.8.1 Classificação de Geldart para Sólidos Particulados

A classificação de sólidos particulados proposta por Geldart (1973) está fortemente relacionada à diferença de densidade e ao tamanho médio das partículas. Os sólidos particulados, que tem propriedades similares, foram classificados em quatro grupos, nomeados pelas letras A, B, C e D.

3.8.1.1 Grupo A

As partículas pertencentes a este grupo possuem densidade menor ou igual a $1,4 \text{ g/cm}^3$, e o seu tamanho varia entre 30 a 100 μm . A expansão de fase das partículas se dá após a velocidade mínima de fluidização ser atingida, porém antes do início de formação de bolhas. A velocidade na qual o gás colapsa contra o leito é conhecido como velocidade mínima de formação de bolhas. A transferência de calor entre as paredes das partículas e o leito é alta.

3.8.1.2 Grupo B

Em contraste com o grupo A, o tamanho médio das partículas varia entre 40 e 500 μm e a faixa de densidade está entre 1,4 e $4,0 \text{ g/cm}^3$. As partículas deste grupo são similares à areia. Existe um movimento livre das bolhas quando se alcança a velocidade mínima de fluidização. Embora as partículas tenham menor estabilidade de expansão no leito quando comparada com as do grupo A, a transferência de calor entre a superfície das partículas e a parede do leito é considerada entre alta e moderadamente alta.

3.8.1.3 Grupo C

As partículas desta categoria são muito finas e coesivas, apresentam baixa densidade $\rho_s < 1,4 \text{ g/cm}^3$ e tamanho médio das partículas menores que $20 \mu\text{m}$. Partículas com essas características são difíceis de fluidizar, por apresentarem forças de atração interpartículas maiores do que a força da ação do gás fluidizante. Assim, em leitos de pequeno diâmetro apresentam tendência de se elevarem como um bloco de sólidos, e em leitos de grande diâmetro, o gás fluidizante ao encontrar resistência das partículas, forma pequenos canais através dos quais ocorre a passagem de ar, provocando uma fluidização pouco uniforme e dificultando o processamento.

3.8.1.4 Grupo D

Neste grupo se encontram as partículas mais densas e de maior tamanho que oscila entre 600 e $1200 \mu\text{m}$. A expansão do leito é regularmente baixa, mas, uma vez alcançada a fluidização, as partículas apresentam muito movimentação. Por serem partículas muito densas requerem uma maior velocidade do ar para fluidizar, comparada com as outras categorias.

Figura 3.8- Gráfico de Geldart para classificação de partículas (adaptado de GELDART, 1973 e LEVENSPIEL 1999)

3.9 Caracterização Morfológica das Partículas

Existem características de sólidos particulados, como sua composição química, densidade e propriedades físicas (superfície, tamanho, geometria e forma) que são importantes para a determinação do comportamento de pós (fluidez, escoamento, compactação, superfície de contato, coeficiente de atrito, embalagem, entre outras). No entanto, a morfologia de partículas é um dos problemas mais comuns na indústria de tecnologia de pós (ALMEIDA-PRIETO *et al.*, 2007; BOUWMAN *et al.*, 2004; SAAD *et al.*, 2011), influenciando a fluidodinâmica no processo de aglomeração, portanto seu conhecimento ajuda no controle e ajuste das condições de processo durante a granulação (SOUZA, 2012).

Na literatura, são indicados diferentes métodos para definir e calcular o tamanho e a forma das partículas, baseados na combinação da avaliação qualitativa, inspeção visual, peneiramento e microscopia (HENTSCHEL; PAGE, 2002; STANIFORTH; REES, 1980). Segundo Beddow *et al.*, (1976) há quatro diferentes classes de métodos para quantificar as formas das partículas: avaliação individual das partículas (tomando como referência formas geométricas padrões); geração de forma por análises matemáticas; descrição literal das características das partículas, e medição à granel.

Assim, na busca por saber e medir o contorno da partícula de uma forma qualitativa e quantitativa em um espaço bidimensional surge um bem sucedido método de medição denominado de inteligência artificial, o qual usa técnicas de imagem adquirida por meio de um microscópio ou estereomicroscópio acoplado a uma câmara fotográfica e ligado a um software, que é capaz de processar e converter as imagens analógicas em digital (imagem binária em *pixels* e tonalidades cinza) (ALMEIDA-PRIETO *et al.*, 2007). Esse processamento digital requer um ambiente de programação como o *Visual C*, *Visual Basic*, ou *MATLAB*, ou programas computacionais comerciais, especializados em processamento de imagens como *Image Pro*, *National Instruments-Vision Builder* e *EPIX-XCAP*. Na atualidade uma opção de interesse é o software *IMAGEJ* desenvolvido pelo *The*

National Institutes of Health (NIH) EUA, que usa uma linguagem de programação Java (IGATHINATHANE *et al.*, 2008).

3.10 Análise de Tamanho e Forma das Partículas

3.10.1 Tamanho das Partículas

Quando se observa qualquer tipo de partícula usando um microscópio óptico, ou outro equipamento que seja capaz de adquirir imagens que possam ser editadas e analisadas, verifica-se que nem todas as partículas possuem igual tamanho e forma, isto é, são anisométricas. Por tanto, para este tipo de partícula, não é possível determinar um único valor de tamanho, sendo fundamental encontrar outros parâmetros que ajudem a definir o diâmetro e suas características. Entre esses parâmetros mais comuns, se encontram o comprimento, largura, diâmetro de Feret máximo e mínimo e diâmetro da área projetada da partícula, como mostrado na Figura 3.9. Na indústria atualmente a obtenção de partículas com um tamanho específico e padronizado requer custos elevados e é muito complicado. Por esse motivo é mais frequente usar partículas que sejam caracterizados por distribuição de frequências de grupos de tamanhos.

Um parâmetro importante para caracterizar partículas não esféricas é o diâmetro da área projetada calculado pela Eq. (1):

$$d_a = \sqrt{\frac{4S_p}{\pi}} = \quad (1)$$

Em que d_a é o diâmetro da área projetada em (μm), definido como o diâmetro de uma esfera tendo a mesma área projetada da partícula vista na direção perpendicular ao plano de maior esfericidade da partícula (Figura 3.9); S_p é a área projetada bidimensional da partícula em (μm^2) (YANG, 2003).

Figura 3.9- Parâmetros mais frequentes de medida de partículas irregulares, diâmetro da área projetada, diâmetro de Feret máximo e mínimo (Adaptada de YANG, 2003).

Muitos diâmetros têm sido definidos para caracterizar partículas irregulares. Os mais comuns estão sumarizados abaixo (YANG, 2003):

- ✓ Diâmetro médio aritmético $D[1,0]$: é definido como a soma das frações numéricas X_i , multiplicadas pelo correspondente diâmetro da área projetada em (μm), dividida pela somatória das frações numéricas, Eq.(2):

$$D[1,0] = \frac{\sum_i x_i d_{ai}}{\sum_i x_i} = \quad (2)$$

- ✓ Diâmetro de diâmetro médio volume-superfície $D[3,2]$: também conhecido como diâmetro de *Sauter* é definido como o tamanho médio da partícula baseado na área superficial esférica por unidade de volume ou por unidade de massa, em (μm), Eq.(3):

$$D[3,2] = \frac{\sum_i x_i d_{ai}^3}{\sum_i x_i d_{ai}^2} = \quad (3)$$

- ✓ Diâmetro de *Brouckere* $D[4,3]$: é também conhecido como volume equivalente médio, aplicado em processos em que o volume a ser aplicado por aspersão a um material, em (μm), calculado pela Eq.(4):

$$D[4,3] = \frac{\sum x_i d_{ai}^4}{\sum x_i d_{ai}^3} = \quad (4)$$

3.10.2 Forma das Partículas

A análise de partículas por meio de imagem baseia-se na representação de um conjunto de pontos (medidos em *pixels* ou micrometros variando com o critério do usuário) que formam o perímetro da partícula (KAYA *et al.*, 1996). Os resultados ou *output* padrão do programa computacional incluem o perímetro, largura, altura, diâmetro mínimo e máximo de Feret (calibre da partícula) (IGATHINATHANE *et al.*, 2008). Assim é possível calcular os fatores de forma mais comumente usados como: *Circularidade*, *Elongação* e *Compacidade*, de acordo com as Equações (5), (6) e (7) (SAAD *et al.*, 2011; TURCHIULI *et al.*, 2005). Esses fatores de forma encontrados são comparados com figuras geométricas bidimensionais Figura 3.10, que permitem entender e identificar as partículas (RUSS *et al.*, 1994), esses parâmetros são adimensionais.

$$\text{Circularidade} = \frac{P^2}{4\pi S_p} \quad (5)$$

$$\text{Elongação} = \frac{F_{max}}{F_{min}} \quad (6)$$

$$\text{Compacidade} = \frac{S_p}{F_{max} F_{min}} \quad (7)$$

Em que S_p é área superficial da partícula, P é o perímetro, F_{max} é o diâmetro máximo de Feret, e F_{min} é o diâmetro mínimo de Feret, tudo em (μm) que estão

associados ao comprimento e largura do maior e menor eixo da partícula (TURCHUILI *et al.*, 2005). Segundo Yang (2003) os diâmetros de Feret, se referem às distancias entre pares de tangentes paralelas para um contorno projetado da partícula.

A circularidade Eq. (5) é o fator definido como a razão entre o perímetro P da silhueta da partícula e a circunferência de um disco que tem a mesma área projetada S_p (SAAD *et al.*, 2011). A circularidade caracteriza tanto o alongamento quanto a irregularidade da partícula, portanto, quanto mais alongada e irregular for a partícula, maior será o valor de circularidade (Tabela 3).

Tabela 3.4- Características da forma das partículas pela circularidade

Valor da Circularidade	Característica
$C < 1,25$	Circular
$1,25 < C < 2$	Angular
$C > 2$	Alongada

Fonte: TURCHUILI *et al.*, 2005)

A alongação Eq (6) mede a razão entre o maior e o menor diâmetro da silhueta da partícula, referidos como diâmetros de Feret (compara com o lado mais longo e mais curto dos lados equivalentes de uma forma retangular). Se o alongamento for maior que um, a partícula é mais alongada, enquanto que o valor unitário se refere à partícula mais circular ou quadrática (SAAD *et al.*, 2011) (ver Figura 3.10).

A compacidade Eq (7) também caracteriza a alongação da partícula, para o valor menor que um, a partícula é mais alongada, e se for igual a 1 apresenta mais circularidade (TURCHUILI *et al.*, 2005).

Figura 3.10- Representação dos fatores de forma, comparação com figuras geométricas e intervalo de valores (Adaptado de SAAD *et al.*, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Matéria-Prima

A farinha de banana verde foi produzida segundo a metodologia determinada por Tribess (2009). Foram usadas bananas verdes da variedade Nanicao (*Musa Cavendishii*) procedentes da região do Vale da Ribeira, SP. Cinco caixas de 20 kg cada dos frutos sem tratamento, em estágio de maturação 1. Foram adquiridas um dia após a colheita, do Banana Jaguaré no CEAGESP - Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais do Estado de São Paulo, da cidade de São Paulo.

4.2 Caracterização dos Frutos

Os frutos foram caracterizados através da realização de análises de firmeza, teor de umidade, teor de sólidos solúveis, pH e conteúdo de amido resistente nos frutos, empregando-se os procedimentos a seguir:

4.2.1 Firmeza

A firmeza das bananas foi determinada, em triplicata, para cada uma das cinco caixas fornecidas. Foi determinada usando um texturômetro (SMS, mod TA-

XT2i plus, Inglaterra, carga de 30 kg), submetidas ao teste de penetração no centro da banana, usando um cilindro (probe) de aço com 6 mm de diâmetro (P/6), uma velocidade de penetração de $1,0 \text{ mm s}^{-1}$, profundidade de 20 mm, à temperatura ambiente, com a banana totalmente descascada, situada em posição horizontal, de acordo com o método usado por Ditchfield (2004) e Tribess *et al.* (2009) (Figura 4.1).

A firmeza foi definida como a força máxima obtida medida em Newtons (N) da curva força-distância. Este método foi considerado por Ditchfield; Tadini (2002); Ditchfield (2004) e Tribess (2009) como sendo método que melhor caracteriza o estágio de maturação em que se encontram as bananas.

(a)

(b)

Figura 4.1- Análise de firmeza dos frutos de banana verde em Texturômetro SMS, mod TA-XT2i plus, Inglaterra, carga 30 kg (a) e posicionamento da banana verde em teste de penetração (b)

4.2.2 Teor de Umidade

O teor de umidade de umidade dos frutos foi determinado em triplicata. Amostras em rodela de 3 a 5 g foram aquecidas em estufa a vácuo (MARCONI, mod MA-030, Brasil) a 70°C , com vácuo de 13,3 kPa, até obter peso constante (Zenebon, Pascuet 2005).

4.2.3 Teor de Sólidos Solúveis

O teor de sólidos solúveis foi determinado, em triplicata, por medição direta usando um refratômetro (CARL-ZEISS JENA, mod 711849, Alemanha). Foram cortados pedaços de 2 cm aproximadamente de banana verde, dispostos num tecido de textura porosa e estéril, sendo posteriormente macerados até obter uma quantidade suficiente de líquido da fruta para depositar no lente do refratômetro, a leitura acontece na linha de contato entre a área mais clara e a mais escura em uma escala vista por meio da ocular do refratômetro.

4.2.4 pH

A determinação do pH foi realizada em triplicata, utilizando o pH-Stat, (RADIOMETER, mod PHM290, França), segundo o método de Zenebon, Pascuet (2005). Amostras de 10 g de banana verde cortadas em pedaços foram maceradas e diluídas em 100 mL de água destilada num béquer sendo agitada até a mistura ficar uniforme a temperatura ambiente, e sendo realizada a medida direta com o eletrodo.

4.2.5 Atividade de Água

A atividade de água foi determinada em triplicata, por medida direta em analisador de atividade de água (DECAGON, mod Aqualab, USA), colocando amostras de banana verde em rodela de 4 mm aproximadamente de espessura, na capsula do equipamento, à temperatura ambiente.

4.2.6 Conteúdo de Amido Resistente

Determinado pelo Laboratório de Química, Bioquímica e Biologia Molecular de Alimentos, Departamento de Alimentos e Nutrição da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, da USP, em São Paulo, sob coordenação da professora Elizabete

Wenzel de Menezes, conforme método 2002.02 da AOAC (McCLEARY; McNALLY; ROSSITER, 2002; McCLEARY; MONAGHAN, 2002).

4.3 Processo de Produção de Farinha de Banana Verde

As etapas do processo de obtenção de farinha de banana verde estão representadas no diagrama de blocos, da Figura 4.2.

Figura 4.2- Diagrama de blocos do processo de produção de farinha de banana verde (adaptado de TRIBESS, 2009).

O processo inicia-se com a recepção, seleção e caracterização dos frutos, garantindo o estado de maturação 1, condição importante para uma boa qualidade no produto final. Os cachos das bananas foram higienizados com água clorada (200 ppm) por 10 min, para a limpeza de impurezas e desinfecção dos mesmos, eliminando a carga microbiana presente. Em seguida, as bananas foram descascadas manualmente, com ajuda de facas e imediatamente imersas por 5 min em uma solução de ácido cítrico com concentração de 1 g/L. Esta etapa denominada de Pré-tratamento I é necessária para evitar o escurecimento enzimático dos frutos depois da retirada da casca. Após esse procedimento, as bananas foram fatiadas, manualmente, em forma de rodela, de aproximadamente 4 mm de espessura, e novamente submersas na solução de ácido cítrico de mesma concentração, designado assim como o Pré-tratamento II.

Uma vez concluída a primeira etapa, as rodela foram retiradas e após a eliminação do excesso de água, foram colocadas em bandejas de aço inox perfuradas e levadas ao secador industrial de ar forçado (PROCTOR & SCHWARTZ mod EQ-EP. 134, USA). Após o período de secagem das rodela de banana verde, o processo de moagem foi conduzido em um moinho desintegrador (RIETZ, mod RP-8-K115, USA), obtendo assim a farinha de banana verde. Foram realizadas análises físico-químicas e conteúdo de amido resistente na farinha de banana verde produzida. A Figura 4.3 apresenta fotografias de cada uma das etapas do processo.

Figura 4.3- Fotografias das etapas do processo de obtenção de farinha de banana—Recepção dos frutos em caixas de 20 kg aprox. (a), análise de firmeza (identificação do estado de maturação) no texturômetro (b), lavagem e desinfecção dos frutos (c), descascamento manual (d), Pré-tratamento I (e), Pré-tratamento II (f), processo de secagem em bandejas perfuradas (g), secador de ar forçado (h), moagem (Moinho desintegrador) (i).

4.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA FARINHA DE BANANA VERDE

A farinha de banana verde obtida foi analisada pela determinação do teor de umidade, atividade de água, pH, teor de sólidos solúveis, e conteúdo de amido resistente, de acordo com os procedimentos apresentados a seguir:

4.4.1 Teor de Umidade

Foi determinado, em triplicata, com modificação do método de Zenebon, Pascuet (2005): amostras entre 3 a 5 g foram aquecidas em estufa a vácuo (MARCONI, mod MA-030, Brasil) a 70 °C, com vácuo de ≤ 100 mmHg (13,3 kPa), até obtenção de peso constante.

4.4.2 Atividade de Água

A atividade de água foi determinada em triplicata, por medida direta em analisador de atividade de água (DECAGON, mod Aqualab, USA), colocando amostras de farinha de banana verde no recipiente do equipamento até preencher completamente a capsula do equipamento, à temperatura ambiente.

4.4.3 pH

Medido, em triplicata, usando o peagâmetro pH-Stat (RADIOMETER, mod PHM290, França), usando o método de Zenebon, Pascuet (2005) para produtos farináceos. Foram pesados 10 g de amostra em um béquer, diluída com 100 mL de água destilada, e agitada até as partículas ficarem uniformemente suspensas, sendo realizada a medida direta com o eletrodo.

4.4.4 Teor de Sólidos Solúveis

O teor de sólidos solúveis foi determinado, em triplicata, por medição direta usando um refratômetro (CARL-ZEISS JENA, mod 711849, Alemanha). Foram pesados 5 g de amostra em um beaker, diluída com 50 mL de água destilada e a

solução foi agitada até ficar homogênea. Gotas da solução depositadas no lente do refratômetro fornece a leitura na linha de contato entre a área mais clara e a mais escura em uma escala vista por meio da ocular do refratômetro.

4.4.5 Conteúdo de Amido Resistente Antes e Depois do Processo de Aglomeração

Determinado pelo Laboratório de Química, Bioquímica e Biologia Molecular de Alimentos, Departamento de Alimentos e Nutrição da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, da USP, em São Paulo, sob coordenação da professora Elizabete Wenzel de Menezes, conforme método 2002.02 da AOAC (McCLEARY; McNALLY; ROSSITER, 2002; McCLEARY; MONAGHAN, 2002).

4.5 Descrição, Construção e Montagem do Equipamento Leito Fluidizado Pulsado.

O processo de aglomeração e recobrimento de partículas, foram realizados utilizando um leito fluidizado pulsado, operado em batelada, construído no laboratório de operações unitárias da Faculdade de Engenharia de Alimentos USP FZEA no campus Pirassununga, de acordo com o protótipo proposto por DACANAL (2009) como mostrado na (Figura 4.4).

Figura 4.4- Esquema do leito fluidizado. A - Ventilador; B - Válvula gaveta; C - Resistência elétrica; D - Controlador de temperatura; E - Desvio do ar; F - Rotâmetro; G - Sensor de temperatura; H - Placa distribuidora de ar; I - Válvula esfera (sistema de pulsação); J - Câmara de aço inox (leito); K - Bico aspersor; L - Ciclone; M (DACANAL, 2009).

4.6 Equipamento e Montagem

O leito fluidizado é constituído por uma câmara cilíndrica que em aço inoxidável 304, suportado numa bancada móvel. A câmara possui uma janela de visualização para a observação do material particulado em trabalho de fluxo Figura 4.5. Possui conexões de entrada do ar com o ventilador, conexão de saída no topo para o ciclone em aço inoxidável (arraste de partículas), controlador de temperatura e a válvula de esfera que proporciona a frequência de pulsação do ar na fluidização. A alimentação é realizada no topo do equipamento e a retirada do material aglomerado é feita na base do leito fluidizado.

Figura 4.5- Fotografia da vista frontal do equipamento leito fluidizado pulsado, montado, segundo prototipo proposto por DACANAL (2009).

4.7 Operação e Processo de Aglomeração no Equipamento Leito Fluidizado

Foram realizados ensaios preliminares para o uso do equipamento leito fluidizado pulsado, testando o adequado funcionamento usando diferentes produtos particulados como, o polvilho doce, amido de milho e farinha de banana verde, com o intuito de estabelecer e padronizar o comportamento do equipamento em diferentes condições de processo.

O experimento de aglomeração de partículas no leito fluidizado seguiu o procedimento descrito por Dacanal (2009):

- 1) *Estabilização do sistema*: Antes do início dos experimentos, fixaram-se as condições de operação do leito, como a temperatura, que foi estabelecida no painel de controle ligando as resistências elétricas; a vazão de ar na entrada acionada no painel de controle que liga o ventilador centrífugo, que por sua vez é controlado por um anemômetro acoplado. O ar no bico aspersor é fornecido pelo compressor de ar que é ligado, uma vez que a vazão do agente ligante (alginato de sódio) no bico aspersor seja estabelecida e calibrada por meio da bomba peristáltica. A pressão de entrada de ar no bico aspersor, é controlada por uma válvula reguladora de pressão. O equipamento foi deixado nestas condições por um tempo aproximado de (20-30) min de modo a atingir a estabilização do sistema realizando ajustes, quando foram necessários, para manter constante todos os parâmetros. Os parâmetros operacionais estão apresentados na Tabela 4.1.
- 2) *Alimentação*: uma vez o equipamento estabilizado, pesou-se 400 g de farinha de banana verde que foi reservada em um saco plástico de polietileno. A entrada do agente ligante foi interrompida, e imediatamente abriu-se o desvio do ar na parte superior da alimentação e adicionou-se o produto, fechando novamente com a tampa do desvio de ar, com o bico atomizador operando somente com a passagem do ar.
- 3) *Operação*: Após o fechamento do desvio do ar, foram corrigidos os valores da vazão do ar de entrada e deixou-se aproximadamente de (2-3) min até o equipamento retornar as condições fixadas na etapa inicial, já que a adição de produto produz uma perda de carga no leito (DACANAL, 2009). Após a estabilização do equipamento, a bomba peristáltica foi acionada para a atomização do agente ligante (solução de alginato de sódio). A partir de então se iniciou a contagem do tempo de granulação.
- 4) *Retirada da amostra*: Quando foi atingido o tempo de granulação total, desligou-se a bomba peristáltica e o desvio de ar foi aberto para retirada do bico aspersor. Amostras da farinha de banana verde aglomerada foram retiradas e embaladas em sacos plásticos de polietileno, pesadas e armazenadas para posterior análise.

- 5) *Lavagem*: No final do experimento o leito foi desmontado, lavado e desinfetado, com água abundante, sabão, e água clorada, deixando secar e pronto para outros ensaios.

Foram aplicadas as condições de processos descritas na Tabela 4.1. Estes parâmetros estão relacionados diretamente ao tipo de produto processado que foi a farinha de banana verde e nas condições ótimas de processo avaliadas por Dacanal (2005), Dacanal (2009) e Dacanal, Menegalli (2009).

Tabela 4.1- Parâmetros operacionais no processo de aglomeração de partículas de farinha de banana verde no leito fluidizado pulsado.

Parâmetro	Valor
Altura do bico aspersor (cm)	60*
Massa da amostra (g)	400
Temperatura do ar (°C)	95
Pressão relativa de atomização (bar)	1
Velocidade do ar de fluidização (m/s)	0,3
Vazão da solução de alginato de sódio (mL/min)	3
Frequência de pulsação do ar (rpm)	600
Tempo de processo (min)	55

*Valor predeterminado por Dacanal (2009)

4.8 Rendimento do processo de aglomeração de partículas em leito fluidizado pulsado

Para o cálculo do rendimento do processo de aglomeração (η) a Eq.8 foi empregada, expresso como a razão entre a massa de produto final no leito ao final do ensaio (m_f), e a massa inicial de produto adicionado no leito na alimentação (m_i). Assim não foi considerada a fração de sólidos elutriados no ciclone (m_{elut}), perdas pela incrustação de produto nas paredes do leito (m_{inc}), e a formação de torrões (m_{torr}), conforme segue:

$$\eta = \frac{m_f}{m_i} \times 100 = \frac{m_i - (m_{elut} + m_{inc} + m_{torr})}{m_i} \times 100 \quad (8)$$

4.9 Atomização da Solução Ligante

Realizou-se uma ampla pesquisa bibliográfica em conjunto com pesquisadores da Faculdade de Ciências Farmacêuticas para encontrar um agente ligante para a aglomeração que não modificasse as características funcionais da farinha de banana verde nem o comportamento do processo, e que fosse comestível. Concluiu-se que o alginato de sódio é o agente ligante que deveria ser testado no recobrimento da farinha de banana verde, por ser um material que vêm sendo estudado como material de cobertura para microencapsulados e apresenta propriedades de barreira e resistência à temperatura, adequadas para essa finalidade (ALVIM 2005; DEWETTINCK *et al.*, 1998; GOH; HENG; CHAN, 2012; PASIN; AZÓN; GARRIGA, 2012; POTHAKAMURY; BARBOSA-CÁNOVAS, 1995).

Ensaio de atomização no bico aspersor foram realizados, com o intuito de definir a melhor concentração da solução de alginato de sódio levando em conta sua alta viscosidade, determinando as adequadas condições de processo (pressão relativa de atomização, temperatura e vazão). Foram preparadas diferentes soluções de alginato de sódio em proporção peso/ peso (w/w), variando desde 0,01 até 0,08 (g Alginato de sódio/g H₂O). As soluções foram mantidas em duas temperaturas de 35°C e 50°C que permitiram diminuir a viscosidade, duas pressões relativas de atomização de 1 e 1,5 bar, e duas vazões de 3 e 5 (mL/min), segundo o procedimento descrito por DEWETTINCK *et al.*, (1998).

4.10 Caracterização da Farinha de Banana Verde Antes e Depois do Processo de Aglomeração de Partículas

A farinha de banana verde produzida foi caracterizada antes e depois do processo de aglomeração quanto ao teor de umidade, atividade de água, densidade aparente, densidade do leito compactado, densidade da partícula, porosidade da partícula, índices de fluidez de Hausner e de Carr, pelo dispositivo de FLODEX, ângulo de repouso pelo FLODEX e queda livre, tempo de instantaneização, distribuição de tamanho de partículas, diâmetro médio e morfologia (parâmetros de superfície e forma).

4.10.1 Teor de Umidade

Foi determinado, em triplicata, com modificação do método de Zenebon, Pascuet (2005): amostras entre (3 a 5) g foram colocadas em estufa a vácuo (TECNAL mod TE 395, Brasil) a 70 °C e pressão de ≤ 100 mmHg (13,3 kPa), até obter peso constante.

4.10.2 Densidade Aparente, Densidade do Leito Compactado, Densidade da Partícula, Porosidade da Partícula.

A densidade aparente (ρ_b) considerada também como densidade do leito ou densidade *bulk* sem compactar, foi determinada pesando 70 mL da amostra medida em uma proveta, em triplicata. A densidade do leito compactado (ρ_{tap}) ou também chamada densidade *bulk* compactada foi determinada usando o equipamento Tap Density Tester (LOGAN, mod TAP-2S, USA) (Figura 4.6), aplicando dois métodos diferentes: o SPI que possui uma altura de 14 mm e opera a 300 batidas por min, e o SPII com uma altura de 3 mm e opera a 250 batidas por min. Em uma proveta de 100 mL, adicionou-se a amostra com a ajuda de um funil até atingir um volume de 70 mL, e o peso foi obtido numa balança analítica. O teste foi feito em triplicata, com intervalos de 10 até 1000 batidas, até obter o volume constante (ABDULLAH; GELDART, 1999; TEUNOU *et al.*, 1999).

A densidade da partícula (ρ_s) em (kg/cm³) foi determinada por picnometria adicionando-se 3 g de amostra num balão volumétrico de 25 mL e usando álcool como líquido inerte para completar o volume (MOHSENIN, 1970). Com os dados obtidos da densidade foi possível calcular a porosidade total (ε_t) adimensional, das partículas por meio da Eq (9):

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (9)$$

Figura 4.6- Equipamento Tap Density Tester (LOGAN, mod TAP-2S, USA).

4.10.3 Índice de Fluidiez de Hausner e Índice de Carr

Os índices de Hausner (HR) e de Carr (CI) (adimensionais) fornecem uma estimativa de fluidez ou a facilidade do material particulado de escoar (ABDULLAH; GELDART, 1999; CARR, 1965). São calculados empregando as Eq. (10) e (11) usando a razão da densidade do leito compactado (ρ_{tap}) e a densidade aparente (ρ_b).

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 a relação entre o índice de Hausner e o índice de Carr com o nível de fluidez é mostrada, respectivamente (ABDULLAH; GELDART, 1999; CARR, 1965; DACANAL, 2009).

$$HR = \frac{\rho_{tap}}{\rho_b} \quad (10)$$

$$CI = \frac{(\rho_{tap} - \rho_b)}{\rho_{tap}} \quad (11)$$

Tabela 4.2- Relação entre o índice de Hausner (HR) e o nível de fluidez.

HR	Nível de fluidez
$HR < 1,2$	Escoa livremente
$1,2 < HR < 1,4$	Intermediário
$HR > 1,4$	Coesivo

Fonte: (ABDULLAH; GELDART, 1999; DACANAL, 2009)

Tabela 4.3- Classificação da fluidez segundo o índice de Carr (CI).

CI (%)	Fluidez
<15	Muito bom
15 – 20	Bom
20 – 35	Moderado
35 – 45	Pouco coesivo
>45	Coesivo

Fonte: (CARR, 1965).

4.10.4 Medição da Fluidez pelo Dispositivo FLODEX

A medida da fluidez foi realizada segundo o método descrito por Lavoie *et al.* (2002), com o dispositivo FLODEX (HANSON RESEARCH, mod 21-101-050, USA) ilustrado na Figura 4.7. Amostra de 50 g de farinha de banana verde foi depositada dentro de um funil que permite a descarga do pó de forma uniforme dentro de um cilindro de aço inox que possui uma escala milimétrica e suporta na sua base um disco perfurado. A determinação foi realizada, em triplicata, e o índice de fluidez pelo método de FLODEX foi determinado em milímetros de diâmetro do furo (d_{FLODEX}), que representa a magnitude do peso do pó superando a força do atrito lateral do cilindro. As aberturas são dos seguintes tamanhos: 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26; 28; 30; 32 e 34 mm.

Figura 4.7- Dispositivo FLODEX (HANSON RESEARCH mod 21-101-050, USA).

Com o dispositivo FLODEX também é possível medir o ângulo de repouso do pó, conforme descrito por Teunou *et al.* (1995): baseia-se na determinação do

ângulo cuja tangente é determinada pela Eq. (12). O esquema é representado na Figura 4.8.

$$A_{FLODEX} = \arctan \frac{h_{FLODEX}}{\frac{d_{cilindro} - d_{FLODEX}}{2}} \quad (12)$$

Em que $d_{cilindro} = 56,5$ mm é o diâmetro do cilindro de aço; d_{FLODEX} é o diâmetro do furo do disco em milímetros, h_{FLODEX} é a altura do pó remanescente dentro cilindro medida em milímetros. Assim usando equações trigonométricas, isolando A_{FLODEX} o ângulo de repouso pelo dispositivo FLODEX é obtido.

Figura 4.8- Representação do esquema do ângulo de repouso obtido pelo dispositivo FLODEX (Adaptado de TEUNOU *et al.*, 1995)

4.10.5 Medida do Ângulo de Repouso em Queda Livre

O ângulo de repouso em queda livre é um segundo método usado e descrito por Teunou *et al.* (1995) onde: amostras de 35 g de farinha de banana verde, em triplicata, foram depositadas num funil, com abertura de saída fechada manualmente. O funil é fixo junto a uma coluna com sistema de vibração a baixas frequências, e permite o escoamento livre do pó sem obstrução na saída decorrente de pós-coesivos. Quando o funil está carregado com a amostra, retira-se a tampa manual, e esta escoar livremente sobre uma superfície lisa, obtendo-se uma pilha, a qual é fotografada e cuja imagem foi adquirida por uma câmera fotográfica (SONY,

mod 10.1 megapixels optical 3X), situada paralelamente ao triângulo formado pelo pó, como mostrado na Figura 4.9.

O ângulo de repouso consiste na análise de imagens com a ajuda do software IMAGEJ, o qual permite editar a imagem digital e traçar linhas que representam a inclinação do pó com a linha horizontal da superfície de descanso da pilha de sólido, e assim determinar o ângulo cujo valor médio foi representado nos resultados. Esse método foi aplicado em triplicata para a farinha de banana verde antes e depois da aglomeração.

Figura 4.9- Plataforma para medida do ângulo de repouso obtido por queda livre (Adaptado de TEUNOU *et al.*, 1995).

O conhecimento do ângulo de repouso dos materiais é importante para caracterizar o comportamento do fluxo de materiais granulados, indicando o atrito interparticular e sua capacidade de fluir livremente, é um parâmetro fácil de medir e que permite estabelecer uma estimativa aproximada do comportamento coesivo de pós em grandes quantidades para armazenamento, dosagem e transporte (CARR, 1965; ILELEJI; ZHOU, 2008; WANG, *et al.*, 2010; WONG, 2002).

4.10.6 Processamento e Aquisição de Imagens

As fotografias das partículas de farinha de banana verde foram obtidas através de um Estereomicroscópio (CARL ZEISS, mod Stereo Discovery V8, Alemanha) com câmara digital Axiocam ICc 3 (Figura 4.10).

A aquisição de imagens foi realizada segundo o método proposto por Souza e Menegalli (2011): foram espalhadas aproximadamente 10 mg de amostra de farinha de banana verde sobre a superfície da placa de Petri (9,15 cm de diâmetro interno), exercendo uma agitação leve, garantindo assim um melhor espalhamento, com o intuito de alcançar uma visibilidade de mínimo 550 partículas, representando o número estatisticamente necessário para a determinação de distribuição de tamanho e forma.

As placas de Petri foram colocadas no Estereomicroscópio com um aumento de cinco vezes, o qual permitiu adquirir imagens com boa precisão. Realizou-se uma rotação pausada de 360° das placas, em sentido horário, procurando analisar a placa inteira com todas as partículas depositadas.

A aquisição de imagens foi realizada por meio da câmara digital acoplada Axiocam ICc 3 com ajuda do programa computacional AxionVision Rel 4.8.1 e a ferramenta *SNAP*. É importante para o posterior tratamento das imagens, estabelecer a escala em *pixels* na primeira fotografia, e o ajuste do contraste e o brilho, para garantir uma clareza nas partículas e um resultado mais preciso. Foram efetuadas as análises e edição das imagens fotográficas usando o programa computacional IMAGEJ (*National Institutes of Health, USA*), exportando as fotos que foram obtidas anteriormente, mudando de *pixels* para micrometros.

Posteriormente, as imagens fotográficas foram ajustadas a 8-bits (256 tons cinza), para trabalhar com imagens binárias, por meio da ferramenta de edição *Image e Type* do IMAGEJ. O ajuste da cor em preto e branco foi realizado através do *Threshold*, e a análise de morfologia, forma e tamanho foi realizada através da ferramenta *Análize particles*, exportando os resultados em Microsoft Excel.

Figura 4.10- Estereomicroscópio (CARL ZEISS, mod Stereo Discovery. V8, Alemanha)

4.10.7 Distribuição de Tamanho de Partículas e Diâmetro Médio

A distribuição de tamanho de partículas foi determinada por análises de imagens adquiridas no estereomicroscópio atingindo 550 partículas por fotografia, segundo o método proposto por Souza e Menegalli (2011). Os resultados obtidos proporcionam as medidas bidimensionais de forma, em superfícies planas, tais como área superficial da partícula (S_p) em (μm), perímetro (P) em (μm), diâmetros mínimo e máximo de Feret ($F_{\min}$) e ($F_{\max}$) em (μm), medidas características de particulados alimentícios que possuem formas irregulares (SAAD *et al.*, 2011). O diâmetro da área projetada (d_a) em (μm) foi calculado, de acordo com a Eq (1).

Para determinar a distribuição de tamanho das partículas é necessário calcular o intervalo dos blocos de diâmetros de partículas, de acordo com a Eq. (13):

$$\frac{da_{i+1}}{da_i} = \sqrt[3]{2} \quad (13)$$

Em que i é o intervalo de tamanho de partícula. Deste modo os intervalos de partículas variaram de (0,25 até 3250) μm , sendo 0,25 μm o menor valor e a partir deste foi calculado o acumulado denominado da_{i+1} multiplicando o valor do intervalo do bloco até chegar ao valor máximo de 3250 μm .

O tamanho médio de partícula em (μm) foi calculado pela Eq (14), classificado no tamanho i como descrito a seguir:

$$dp_m = \sum x_i da_i \quad (14)$$

Com o valor do diâmetro médio da área projetada da partícula no intervalo i , é possível calcular o volume equivalente da partícula V_{eqi} , usando a equação do volume de uma esfera em (μm) (HOLDICH, 2002), Eq. (15),

$$V_{eqi} = \frac{\pi}{6} (dp_m)^3 \quad (15)$$

Uma vez obtido o volume equivalente, e usando o valor da densidade da partícula, pode-se calcular a massa da partícula i m_{pi} em (Kg), usando a razão entre o volume equivalente em (m^3) e a densidade da partícula (ρ_s) em (Kg/m^3), como mostrado na Eq. (16).

$$m_{pi} = \frac{V_{eqi}}{\rho_s} \quad (16)$$

Dessa forma, podemos calcular a fração mássica por meio da Eq. (17) pela razão entre a massa total em i e sua somatória, onde N_i é a frequência de dados do diâmetro de área projetada da partícula.

$$X_{m_i} = \frac{m_i}{\sum m_i} = \frac{m_{pi} N_i}{\sum m_i} \quad (17)$$

Foram determinados os diâmetros, médio aritmético $D[1,0]$, médio de volume-superfície $D[3,2]$ e de Brouckere $D[4,3]$, usando as Equações (2), (3), e (4).

Realizaram-se cálculos de percentis de $D10\%$, $D50\%$, $D90\%$, que representam as medianas estatísticas do diâmetro equivalente das amostras da farinha de banana verde antes e depois de processada. Estes representam uma medida de tendência central, que informa como se encontra posicionado um valor com respeito ao total da amostra.

4.10.8 Imagem e Morfologia

Os parâmetros de forma como circularidade, arredondamento alongação, e compacidade foram calculados utilizando as equações 4, 5, 6, e 7 usando as medidas obtidas do programa IMAGEJ.

4.10.9 Tempo de Instantaneização:

Foi determinado usando uma adaptação do método descrito por Dacanal (2009), através do dispositivo FLODEX, pesando 3 g de amostra e distribuída de maneira uniforme no cilindro de aço, devidamente tampado. Situou-se um béquer que possui o mesmo diâmetro do cilindro, contendo 80 mL de água destilada a uma temperatura de 27 °C. Posteriormente, uma câmera fotográfica (SONY, mod 10.1 megapixels, zoom óptico 3X) na função filmagem, foi posicionada no topo do cilindro. O teste é iniciado quando a válvula borboleta é aberta deixando cair o pó no recipiente com água. Foi realizado o processamento dos vídeos utilizando o software Windows Movie Maker (v2011, Microsoft), obtendo fotografias nos intervalos de tempo 0; 1; 2 e 5 minutos.

4.10.10 Análise de micrografia por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foram realizadas análises de micrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV), usando um microscópio eletrônico de varredura ambiental Quanta 600FEG marca FEI, realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da USP, São Paulo. Essas análises permitiram verificar se o processo de aglomeração de partículas em leite fluidizado pulsado causou danos estruturais aos grânulos de amido presentes na farinha de banana verde, e assim comparar com os grânulos que não foram submetidos ao processo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos Frutos para o Processo de Produção de Farinha de Banana Verde

Os resultados obtidos da caracterização dos frutos para o processo de produção de farinha de banana verde são apresentados na Tabela 5.1. Alguns dos resultados são comparados com os obtidos por Ditchfield (2004); Tribess (2009) e Langkilde; Champ; Andersson (2002).

Tabela 5.1- Firmeza, sólidos solúveis, pH e conteúdo de amido resistente dos frutos analisados antes da produção da farinha de banana verde, comparados com dados da literatura.

Características	Resultados	Dados da literatura	
Firmeza (N)	30,8 ± 5,29	31,5 ± 1,5 ^a	26,0 ± 6,0 ^b
Sólidos solúveis (°Brix)	2,8 ± 0,52	2,1 ± 0,6 ^a	5,0 ± 2,0 ^b
pH	5,6 ± 0,32	5,7 ± 0,1 ^a	5,3 ± 0,1 ^b
Conteúdo de amido resistente (b.s)	64,38 ± 1,95	63,6 ± 2,5 ^a	53,45 ± 1,06 ^c
Conteúdo de umidade (kg água/kg sólido úmido)	0,7150 ± 0,0101	0,70 ^a ± 0,7*	
Atividade de água	0,989 ± 0,003	-	

^aTribess (2009)

^bDitchfield (2004)

^cLangkilde; Champ; Andersson (2002)

*DMS Diferença mínima significativa pelo teste de Tukey

Pode-se observar na Tabela 5.1, que os resultados obtidos neste trabalho da caracterização dos frutos antes da produção da farinha, são similares aos reportados na literatura, exceto pelo teor de sólidos solúveis obtidos por Ditchfield (2004), que obteve um valor mais elevado. Conclui-se que as bananas se encontravam verdes e no primeiro estágio de maturação de acordo com o valor de firmeza obtido de 30,8 ± 5,29 N, mantendo-se dentro dos padrões da literatura, considerando que é o melhor parâmetro para a determinação de maturação dos frutos segundo Ditchfield; Tadini (2002) e Tribess (2009). Este parâmetro também é reforçado com o dado do conteúdo de amido resistente de 64,38 ± 1,95%; que

garante uma matéria prima com as características desejadas para o processo de secagem e produção de farinha de banana verde.

5.2 Análises Físico-Químicas da Farinha de Banana Verde

As análises físico-químicas da farinha de banana verde obtida estão apresentadas na Tabela 5.2. A farinha produzida a 50 °C exibe um teor de umidade de $3,97 \pm 0,49$ % em base seca (b.s), valor similar ao encontrado por Tribess (2009) para a secagem das bananas às mesmas condições que foi de $4,0 \pm 0,1$ %.

Tabela 5.2- Teor de umidade, atividade de água, pH, teor de sólidos solúveis e conteúdo de amido resistente da farinha de banana verde produzida de acordo com Tribess (2009).

	Resultados
Teor de umidade % (b.s)	$3,97 \pm 0,49$
Atividade de água (a_w)	$0,35 \pm 0,03$
pH	$5,94 \pm 0,01$
Teor de sólidos solúveis	$2,9 \pm 0,5$
Conteúdo de amido resistente % (b.s)	$57,49 \pm 0,43$

Pode-se observar que o conteúdo de amido resistente não foi influenciado significativamente pelo processo de secagem, ocorrendo uma redução de 6 % de ($64,38 \pm 1,95$ % para $57,49 \pm 0,43$ %); esse resultado garante suas propriedades como ingrediente funcional. Esse valor foi similar ao obtido por Tribess (2009). Os valores de pH e teor de sólidos solúveis não apresentaram variações consideráveis depois do processo de secagem. Os valores de teor de umidade e atividade de água mostram que houve uma efetiva remoção de água nos frutos decorrente da secagem.

5.3 Rendimento do processo de aglomeração de partículas em leito fluidizado pulsado

O resultado, valor médio para o rendimento do processo de aglomeração de partículas em leito fluidizado pulsado é de $87,85 \pm 10,90 \%$, representando um índice satisfatório e desejável num processo industrial. Esse valor mostra que as perdas de massa no processo foram menores, mas, ajustes nas condições do processo devem ser aplicadas para diminuir ainda mais esse valor.

Vários autores na literatura relataram que aumento na umidade relativa durante o processo acarreta na formação de torrões e incrustações nas paredes ocasionando um decréscimo do rendimento do processo (PALZER, 2009; SOUZA, 2012).

Dependendo da intensidade com que as partículas estão se movimentando dentro do leito e excessivos valores de pressão de atomização podem ocasionar uma diminuição no valor do rendimento do processo, devido à quantidade de partículas finas elutriadas no final do processo (IVESSON *et al.*, 2001).

5.4 Atomização do Agente Ligante

Os ensaios de atomização do agente ligante foram de acordo com Dewettinck, *et al.*, (1998). Os autores testaram diferentes agentes de recobrimento com viscosidades altas usadas em perolas de vidro e em leito fluidizado sem pulsação na escala industrial. Entre esses agentes usaram o alginato de sódio dissolvido em água, para um total de solução de 1000 g, concentração de 0,01 (g Alg/g H₂O) e distintas condições de atomização como temperatura de 35 e 50°C, pressão relativa de atomização de 1,0 e 1,5 bar, e vazão de 3,0 e 5,0 mL/min. Assim, visando as mesmas condições neste trabalho, os ensaios foram ajustados de acordo com Dacanal (2009) que trabalhou com quantidades padronizadas para as especificações e dimensões do equipamento (leito fluidizado pulsado), levando em conta a quantidade de amostra alimentada no leito que é de 400 g.

Dessa forma, foram testadas no equipamento em vários ensaios, diferentes concentrações desde 0,01 até 0,08 (g Alg/g H₂O) e usando as mesmas condições de atomização de Dewettinck, *et al.*, (1998), com agitação continua da solução de alimentação. Comprovou-se que o aumento de temperatura, pressão e vazão, diminui a viscosidade da solução, assim como a agitação continua, porém em concentrações maiores que 0,05 (g Alg/g H₂O) produzem problemas no bico aspersor devido a que este começa a entupir e as gotículas tornaram-se de maior tamanho, ocasionando paradas no processo de aglomeração, além de formar torrões nas partículas que se encontram em contato mais rápido com a solução atomizada.

Para o processo de aglomeração da farinha de banana verde, foram escolhidas as seguintes condições de atomização: temperatura de 35 °C a qual não representa um risco elevando a temperatura dentro do leite para os grânulos de amido presentes na farinha que poderiam ser gelatinizados em temperaturas superiores a 70°C, pressão relativa de 1,0 bar, e vazão de 3,0 mL/min, que representaram um bom comportamento durante o teste, trabalhando assim em condições que não levam o equipamento ao limite.

A concentração do agente ligante atomizado no processo é um parâmetro crítico e de muita importância para as características do produto final. Esses efeitos de concentração foram avaliados por Turchiuli, 2005, que testou duas concentrações diferentes de maltodextrina como agente ligante, uma em solução e a outra em pó, em leite fluidizado em batelada, para partículas de Zeina, proteína vegetal extraída do milho. Concluindo que, quando a concentração do agente ligante é muito elevada a aglomeração se produz muito rapidamente, porém, os aglomerados não conseguem se consolidar muito bem, ou seja que a fase de crescimento dos grânulos que ocorre depois da fase de início devido a quantidade de água atomizada que permite criar pontes solidas entre as partículas.

Por conseguinte, os aglomerados são muito frágeis e quando submetidos ao atrito durante o processo seu crescimento é nulo o que conduz a obter partículas de forma regular e de menor tamanho. Ao contrario do que acontece com as

concentrações baixas ou moderadas, onde são obtidos aglomerados mais consolidados, maiores e com uma forma mais irregular.

Tabela 5.3- Ensaios em diferentes concentrações de alginato de sódio testadas no bico atomizador, mantidas a 35 e 50°C, com pressão de 1 e 1,5 bar, e vazão de 3 e 5mL/min.

Ensaios	1^a	2	3	4	6	7^b
Quantidade de Alginato de Sódio (g)	10,0	2,50	7,0	10,0	15,0	16,52
Quantidade de água (g)	999,9	299,9	200,0	200,0	200,0	292,03
% de Alginato na amostra	1,00%	0,83%	2,33%	3,33%	3,33%	5,00%
% de água na amostra	99,00	99,17	97,67	96,67	96,67	95,00
Concentração de alginato de sódio w/w (g Alg/g H2O)	0,01	0,01	0,04	0,05	0,08	0,05
Solução Total (g)	1000,0	300,0	300,0	300,0	300,0	308,56

^a (Dewettinck, *et al.*, 1998)

^b Usado no processo de aglomeração

Concentrações maiores que 5,0 % apresentaram difícil fluidização, entupimento do bico e paradas no processo de aglomeração por formação de torrões no leito fluidizado, como também incrustações nas paredes.

Concentrações menores que 3,0 % contem muita água elevando assim a umidade relativa do leito representando aumento de umidade no produto final e deficiência no processo de secagem, além de diminuir a vida de prateleira da farinha pelo valor maior de atividade de água.

5.5 Caracterização da Farinha de Banana Verde Antes e Depois do Processo de Aglomeração de Partículas

Amostras de farinha de banana verde foram caracterizadas antes e depois do processo de aglomeração de partículas, quanto ao teor de umidade, densidade aparente, densidade do leito compactado, densidade da partícula, porosidade da partícula, índices de fluidez de Hausner (*HR*) e de Carr (*IC*), pelo dispositivo de FLODEX, ângulo de repouso pelo FLODEX e método de queda livre, tempo de

instantaneização, distribuição de tamanho de partículas, diâmetro médio e morfologia (parâmetros de superfície e forma).

ANOVA (Análise de Variância) foi aplicada sobre os resultados para identificar as diferenças, no intervalo de confiança de 95 %, utilizando o programa Microsoft Excel 2010.

5.5.1 Teor de Umidade e Conteúdo de Amido Resistente

Observando a Figura 5.1, nota-se que houve uma diminuição no teor de umidade da farinha de banana verde aglomerada, o que significa que as partículas sofreram um processo de secagem pela passagem do ar fluidizado, ocorrendo uma remoção não apenas da água da solução do alginato de sódio como agente ligante na atomização, como também parte do conteúdo de água original da farinha antes do processo de aglomeração. A quantidade de umidade retirada nas amostras foi de 1,36 % (b.s) do conteúdo original da farinha sem aglomerar.

Este mesmo comportamento foi verificado por Vissoto *et al.* (2010), os autores trabalharam com cacau em pó como bebida instantânea produzida por aglomeração de partículas com vapor, e encontraram que após o processo de aglomeração houve uma redução do teor de umidade de 3,65 % (b.s) para 1,06 % (b.s) para uma mistura de cacau com cristais de açúcar e de 3,53 % (b.s) para 1,45% (b.s) para cacau com açúcar granulado, as duas amostras apresentaram uma satisfatória diminuição de umidade.

Figura 5.1- Conteúdo de umidade (b.s) da farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada.

A diminuição do teor de umidade de (3,97 para 2,61) % nas amostras de farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada respectivamente, favoreceu a fluidização das partículas no leito e, portanto, uma melhora na sua fluidez.

Entretanto, caso ocorra um aumento do teor de umidade durante a secagem do material fluidizado, pode ocorrer a formação de torrões pelo aumento da umidade relativa dentro do leito (saturação do ar), que impedem a fluidização do sistema, gerando grandes riscos no processo, e até mesmo provocar o colapso do leito por sobreaquecimento em estado úmido. Em consequência disso, o processo de aglomeração é interrompido por uma desfluidização, efeito que também foi verificado por Dacanal, Menegalli (2008), Jimenez; Turchiuli, Dumoulin (2006), Palzer (2009) e Souza (2012).

O conteúdo de amido resistente depois do processo de aglomeração de partículas foi de $53,95 \pm 0,22$ % (b.s), sendo que para a matéria prima a farinha de banana verde sem aglomerar o valor foi de $57,49 \pm 0,43$ % (b.s), representando uma diminuição de 3,54 % que pode ser considerada uma pequena perda.

Não houve diferença significativa com relação ao conteúdo de amido resistente medido nos frutos antes da secagem e na farinha de banana verde antes e depois da aglomeração, como mostrado na Figura 5.2. Concluiu-se então, que o processo de aglomeração com atomização com solução de alginato de sódio, no leite fluidizado pulsado, não alterou as características funcionais da farinha de banana verde, conservando o amido resistente no produto aglomerado.

Figura 5.2-Variação do conteúdo de amido resistente nos frutos da banana verde, na farinha de banana verde sem aglomerar e na farinha de banana verde aglomerada.

5.5.2 Densidade Aparente, Densidade do Leito Compactado, Densidade da Partícula, Porosidade da Partícula.

Na Figura 5.3 estão apresentados os resultados da densidade aparente, densidade do leito compactado e densidade da partícula da farinha de banana verde antes e após o processamento. Os valores mais altos das densidades foram obtidos para a FBV sem aglomerar, especialmente a densidade da partícula (ρ_s) que foi determinada por picnometria, o que comprova que para uma mesma massa, a partícula quando aglomerada possui um maior volume ao contrario da partícula sem aglomerar o que resulta em um menor valor de densidade (Tabela 5.4).

A densidade do leito compactado foi maior para a farinha sem aglomerar que para a farinha aglomerada, e a densidade aparente representou um valor menor para a farinha sem aglomerar Figura (5.3).

Abdullah e Geldart 1998, explicam que para partículas que oferecem resistência à compactação, e seu atrito é elevado, resultam em densidades aparentes baixas, isto é devido a que quando um grupo de sólidos se encontram dispostos num determinado volume (contenedor, recipiente, etc), estes tem uma tendência ao se organizar de um modo aleatório guardando espaços vazios entre eles, ao contrario do que ocorre com pós coesivos, os quais tem fortes forças de ligação entre elas, facilmente compactáveis e dificilmente aereadas, de fato, os resultados deste trabalho, mostram esse comportamento. A farinha sem aglomerar apresentou uma densidade aparente maior comparada com a farinha aglomerada que pelo incremento de tamanho de partícula, irregularidade de suas partículas, diminuiu a tendência de coesividade.

A aplicação dos resultados das densidades aparente (ρ_b) e compactado (ρ_{tap}), poderão ser observadas melhor com os Índices de Fluidiez de Hausner e de Carr Tabela (5.5).

Tabela 5.4- Valor médio e desvio padrão de densidade aparente, compactado e de partícula para FBV antes e depois de processada.

	FBV sem aglomerar	FBV aglomerada
Densidade aparente (ρ_b) (kg/m³)	514,76 ± 0,02	329,19 ± 0,01
Densidade do leito compactado (ρ_{tap}) (kg/m³)	652,06 ± 0,03	403,07 ± 0,01
Densidade da partícula (ρ_s) (kg/m³)	1452,261 ± 0,019	1326,698 ± 0,020

Figura 5.3- Densidade aparente de partícula, densidade do leito compactado e densidade da partícula da FBV sem aglomerar e aglomerada.

5.5.3 Índice de Fluidiez de *Hausner*, de *Carr* e Porosidade Total da Partícula.

Observa-se, na Tabela (5.5), que houve uma redução do índice de *Hausner* e depois do processo de aglomeração, que ocorreu uma melhoria no escoamento das partículas. Esse efeito também foi verificado com a diminuição do Índice de *Carr* abaixando de 21,0 % para 18,3 % dando como resultado um escoamento livre e bom. Valores menores de índice de fluidez indicam que o produto é menos coesivo.

Para a farinha de banana verde aglomerada ocorre um aumento da porosidade total, como esperado no processo de aglomeração em leito fluidizado (TURCHIULI *et al.*, 2005).

Tabela 5.5- Índices de fluidez de *Hausner* (HR), de *Carr* (CI) e porosidade total da partícula.

	HR	Nível de fluidez	CI	Fluidez	Porosidade Total
FBV SEM AGLOMERAR	1,27	Intermediário	21,0 %	Moderado	0,70 ± 0,01
FBV AGLOMERADA	1,22	Escoa livremente	18,3 %	Bom	0,73 ± 0,03

Segundo Schubert (1987), concluiu que a capacidade de fluidez dos pós aumenta com o aumento de tamanho de partículas, assim como sua molhabilidade e dispersabilidade, devido a que a adesão de interpartículas é muito mais forte quando as partículas possuem um diâmetro muito menor e essas forças de adesão são responsáveis pela coesividade de pós. Pós finos, apresentam uma tendência de formar blocos ou grumos de sólidos consolidados, comportamento que dificulta o manuseio e transporte. Estas características são de grande importância para produtos instantâneos, quando foram dissolvidos se mostram resistentes para ser embebidos em um líquido.

5.5.4 Índice de Fluidez pelo Dispositivo FLODEX e Ângulo de Repouso Obtido por Queda Livre

O índice de fluidez da FBV sem aglomerar e aglomerada, foi determinado pelo diâmetro do furo do disco, pelo ângulo de repouso do FLODEX e pela altura remanescente do pó no cilindro. Observou-se que para a farinha de banana verde aglomerada o valor do diâmetro do furo do disco foi de 9 mm muito menor ao da farinha não aglomerada. Além disso, o ângulo de repouso e a altura remanescente foram inferiores em relação ao produto não processado, o que indica que a fluidez aumentou depois do processamento, apresentando menor coesividade e maior escoabilidade das partículas aglomeradas (Tabela 5.6).

O ângulo de repouso também foi verificado por queda livre, com aquisição e processamento da imagem pelo software IMAGEJ. A farinha de banana verde aglomerada apresenta valor menor comparado com o da farinha sem aglomerar (Tabela 5.6). Esses valores são coerentes com os resultados obtidos anteriormente que indica a coesividade da farinha de banana antes de submeter ao processamento de aglomeração de partículas. Os valores dos ângulos de repouso do FLODEX e de queda livre foram sub

Tabela 5.6- Índice de fluidez pelo dispositivo Flodex, altura do pó remanescente, ângulo de repouso do FLODEX e queda livre.

	FBV sem aglomerar	FBV aglomerada
Índice de fluidez pelo FLODEX - diâmetro do furo do disco (mm)	26	9
Altura do pó remanescente (mm)	38,20 ± 2,68	32,17 ± 5,08
Ângulo de repouso do FLODEX (graus)	68,17 ± 1,46	53,89 ± 2,21
Ângulo de repouso por queda livre (graus)	36,89 ± 2,68	33,83 ± 3,90

O diâmetro do furo do disco estabelece a maior diferença na comparação das farinhas de banana verde antes e depois de aglomerada, de 26 para 9 (mm), devido a que valores altos do diâmetro do disco indicam que o pó apresenta características coesividade elevadas o que impede a ele fluir livremente por uma abertura estreita, ao invés do que acontece quando as partículas são maiores que possuem uma fluidez e escoabilidade melhor, por tanto, ao serem submetidas num escoamento de aberturas menores estas fluem livremente.

Houve uma diferença significativa ($p < 0,05$) para os valores de Ângulo de repouso do FLODEX, queda livre e altura do pó remanescente para as duas amostras de farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada, por tanto, há diferença de comportamento de uma farinha respeito à outra, representando valores mais baixos para a farinha aglomerada significando menos coesividade entre as partículas.

Figura 5.4- Imagens editadas do ângulo de repouso por queda livre para a farinha de banana verde sem aglomerar (a), e aglomerada (b).

Imagens editadas pelo software IMAGEJ, são apresentadas na Figura 5.4, onde são traçadas as linhas correspondentes para determinação do ângulo de repouso por queda livre. Visualmente não se percebe uma diferença significativa, mas os valores dos ângulos tiveram uma diferença de 3,06 graus sendo o menor valor para a farinha sem aglomerar. Segundo WANG *et al.*, (2010) afirmam que resultados obtidos por vários autores na literatura acredita-se que o ângulo de repouso não é uma medida que garante o comportamento de um sólido particulado, porém serve como parâmetro complementar de outras medições que servem para o uso no transporte e fluidização de sólidos particulados em ductos, dosagem e armazenamento em amontoados.

5.5.5 Determinação do Diâmetro, Médio Aritmético $D[1,0]$, Médio de Volume-Superfície (Sauter) $D[3,2]$ e de Brouckere $D[4,3]$ e os Percentis 10 %, 50 % e 90 %.

Na Tabela 5.7 os diâmetros médios aritméticos $D[1,0]$, diâmetro médio de Sauter $D[3,2]$, diâmetro de Brouckere $D[4,3]$, percentil 10 % (D_{10}), mediana (D_{50}) e percentil 90 % (D_{90}). Observou-se que todos os diâmetros de partícula aumentaram depois do processo de aglomeração, à exceção do percentil de D_{10} , ou seja, ainda depois da farinha o produto apresentou partículas finas misturadas com as grossas. Valores mais altos para a farinha aglomerada também foram verificados para o diâmetro de Sauter que representa a relação volume superfície das partículas, e é baseado na área superficial esférica por unidade de volume da partícula. O mesmo resultado foi obtido para o diâmetro de Brouckere, que representa o volume equivalente médio. O aumento do diâmetro constata o elevado índice de fluidez das partículas nos testes avaliados anteriormente, essas características de variabilidade e aumento dos diâmetros também foram encontradas por outros autores para outros pós. (DACANAL 2009; SAAD 2011, SOUZA 2012; TURCHIULI *et al.*, 2005).

Tabela 5.7- Diâmetro médio aritmético $D[1,0]$, diâmetro médio de Sauter $D[3,2]$, diâmetro de Brouckere $D[4,3]$, percentil 10% (D_{10}), mediana (D_{50}), e percentil 90% (D_{90}).

	Diâmetro					
	médio aritmético $D[1,0]$ (μm)	$D[3,2]$ (μm)	$D[4,3]$ (μm)	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
FBV sem aglomerar	9,69	24,99	35,99	1,70	8,03	19,00
FBV Aglomerada	67,27	374,52	444,26	1,27	10,74	226,10

5.5.6 Distribuição de Tamanho de Partículas

Foram realizadas as análises de distribuição de tamanho de partículas, com relação à fração mássica, o que mostra graficamente o deslocamento da curva quando o tamanho de partícula aumenta depois da aglomeração, como mostrado na Figura 5.5.

Figura 5.5- Distribuição de tamanho médio de partícula (μm), em função da fração mássica da farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada.

O pico da curva da Figura 5.5 aumentou de 45,6 μm para farinha sem aglomerar até 578,5 μm , embora existam partículas finas que se encontram

misturadas na farinha de banana aglomerada. O aumento do diâmetro das partículas pode ser verificado pelas imagens obtidas através do estereomicroscópio.

5.5.7 Imagens de Tamanho de Partículas

Na figura 5.6 estão mostradas micrografias originais das partículas de FBV sem aglomerar (a) e (b), aglomerada (c) e (d) obtidas do estereomicroscópio.

Figura 5.6- Micrografias das partículas sem editar, de farinha de banana verde sem aglomerar (a), e (b), e aglomerada (c) e (d), obtidas através do estereomicroscópio.

A Figura 5.6 representa as partículas de farinha de banana verde antes e depois do processo de aglomeração, mostrando um notável aumento do diâmetro

das partículas aglomeradas pela união entre elas, causada pelo agente ligante da solução de alginato de sódio atomizada e a frequência de pulsação usada de 600 rpm, fator que foi verificado por Dacanal (2009). Como resultado, partículas com forma mais irregular e alongadas foram obtidas ao contrário das partículas sem aglomerar, que apresentaram formas mais circulares.

As micrografias foram editadas, em modo binário 8 bits, que possibilita a análise das mesmas (Figura 5.7).

Figura 5.7- Micrografia de partículas de farinha de banana verde sem aglomerar (a) e aglomerada (b) obtida pelo estereomicroscópio em modo binário.

5.5.8 Análise de Forma das Partículas

Nas Figuras 5.8, 5.9, e 5.10, são apresentados os parâmetros de forma circularidade, alongação e compacidade respectivamente, das partículas de farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada, fatores de caracterização mais usados para sólidos particulados.

Figura 5.8- Circularidade em função do diâmetro da área projetada d_a (μm) da farinha de banana verde sem aglomerar (a), e da farinha de banana aglomerada (b).

O parâmetro circularidade calculado pela Eq (5) relaciona a área projetada da partícula com o seu perímetro, sendo semelhante a uma esfera se seu valor for igual a 1. Observa-se que para a FBV sem aglomerar um número muito maior de partícula com diâmetro menor que 10 μm (Figura 5.8 a) apresentou forma mais circular com tendência oval do que a partícula da FBV aglomerada. Em consequência da aglomeração, verifica-se também um espalhamento do tamanho das partículas (Figura 5.8 b) com diâmetros maiores a 150 μm , com valores de circularidade $>2,0$ que indica que a forma é mais comprida e alongada (TURCHIULI *et al.*, 2005).

Os dados de circularidade são reforçados com o gráfico de frequência donde é possível observar que a quantidade maior de dados estão distribuídos mais perto de um para a farinha sem aglomerar (Figura 5.8 C), e no caso da farinha aglomerada se mantém na faixa um e dois, e com um espalhamento de dados em menor proporção com o aumento do diâmetro.

Figura 5.9- Diagrama de frequência de dados para o diâmetro de área projetada para a farinha de banana verde sem aglomerar (a) e para a farinha de banana verde aglomerada (b).

Os gráficos de frequência para os diâmetros de área projetada da partícula apresentam uma visão dos diâmetros mais representativos ou o acumulo de dados nesse intervalo de dados que são menores de 20 μm para a farinha de banana verde sem aglomerar (Figura 5.9 a) e menores de 200 μm para a farinha de banana verde aglomerada, sem deixar atrás que existem partículas com diâmetros maiores que se encontram espalhadas e em menor proporção de dados.

A elongação calculada pela razão do diâmetro maior e menor de Feret, donde valores iguais a um se referem a partículas com um formato mais quadrado e valores maiores possuem um formato mais retangular. Verifica-se que para a FBV sem aglomerar há uma concentração maior de partículas com tamanhos menores a 20 μm , com valores próximos a um, mas também existe uma fração espalhada com valores elevados a dois, com forma mais perto de um retângulo (Figura 5.10 a).

Para a FBV aglomerada embora tenham mais dispersão as partículas no gráfico à medida que o diâmetro aumenta, houve um aumento na elongação mais acentuado para partículas com diâmetros menores a 150 μm (Figura 5.10 b).

A frequência de dados observados na (Figura 5.10 c, d) comprova a concentração da maioria de dados na faixa entre um e dois, para as duas farinhas sem e com aglomeração, admitindo que partículas com diâmetros menores que 150 μm , tem um aumento no parâmetro de alongação que não aparece muito significativo no diagrama de frequência, mas que é apreciado no gráfico por dispersão.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 5.10- Elongação e diâmetro da área projetada d_a (μm) da farinha de banana verde sem aglomerar (a), e farinha de banana aglomerada (b).

A compacidade (valores normalizados entre 0 e 1) relaciona a área projetada da partícula com os diâmetros de Feret. Quando o valor for igual a um as partículas apresentam forma de um quadrado ou um retângulo, sendo que para valores menores estas se distanciam das formas geométricas mais simples, ou seja, a

compacidade é maior. Esse parâmetro não representou variações em relação ao tamanho de partícula (SAAD, 2012), comportamento também encontrado por Souza (2007), e Souza (2012), os autores concluíram que somente um parâmetro de forma não permite classificar as partículas, por isso é fundamental realizar todas as análises para caracterizar acertadamente as partículas. Para as duas farinhas são verificados um comportamento similar de tal forma que a frequência de dados se manteve no intervalo de 0,4 até 0,8.

Figura 5.11- Compacidade e diâmetro da área projetada d_a (μm) da farinha de banana verde sem aglomerar (a), e farinha de banana aglomerada (b).

Os resultados são coerentes com os parâmetros de tamanho das partículas, nos quais se observaram a formação de partículas grossas com formas irregulares. A presença de partículas finas misturadas com as partículas de maior diâmetro pode estar relacionada com a quebra ocasionada pela erosão e o atrito das mesmas.

Para uma adequada caracterização de um produto aglomerado é necessário um conjunto de parâmetros de medida que se correlacionam entre eles mesmos, já que é provável que um parâmetro isolado seja suscetível a falsos diagnósticos ou não apresente variações para o produto.

5.5.9 Classificação de Sistemas Particulados pelo Diagrama de Fluidização de Geldart

A partir dos resultados obtidos dos tamanhos de partículas contidos nos percentis 10 % (D_{10}), a mediana D_{50} , e 90 % D_{90} obtidos as partículas foram agrupadas de acordo com a classificação de fluidização de Geldart (1973), para a farinha de banana verde antes e depois da aglomeração.

A farinha antes de aglomerar foi classificada no grupo C, segundo os diâmetros dos percentis, o que caracteriza a farinha por ter partículas muito finas e difíceis de fluidizar por serem mais coesivas e apresentarem comportamento de um bloco sólido de pó (Figura 5.12), tornando-se conveniente e reforçando o fato do uso de leitos fluidizados modificados com vibração, pulsação ou com diferentes geometrias, já que as propriedades deste grupo são baixa expansão do leito devido à canalização do gás de entrada sem nenhuma produção de bolhas; a taxa de aeração inicialmente é rápida e logo tornou-se exponencial, e a mistura de sólidos é muito baixa.

Na figura 5.13, observou-se que o processo de aglomeração em leito fluidizado pulsado aumentou o tamanho e fluidez das partículas, pois para percentis de 90 % as partículas de FBV foram classificadas no grupo B, sendo partículas com diâmetros que variam de 40 a 500 (μm).

Os parâmetros medidos como os índices de fluidez de Hauner e de Carr, reforçam o comportamento e a classificação dos sólidos depois de submeterem à aglomeração.

Figura 5.12- Indicação de classificação no diagrama de *Geldart* dos percentis *D10*, *D50*, *D90* de FBV sem aglomerar, em que ρ_s é a densidade da partícula (sólido), e ρ_f é a densidade do ar (Adaptado de GELDART, 1973).

Figura 5.13- Indicação de classificação no diagrama de *Geldart* dos percentis *D10*, *D50*, *D90* de FBV aglomerada, em que ρ_s é a densidade da partícula (sólido), e ρ_f é a densidade do ar (Adaptado de GELDART, 1973).

5.5.10 Tempo de Instantaneização

O tempo de instantaneização foi determinado pelo método usado por Dacanal 2009a com adaptações usando o dispositivo FLODEX. Como resultado se obtiveram imagens da FBV sem aglomerar e aglomerada em diferentes tempos (0, 1, 2, e 5) min de penetração da amostra em água.

Observou-se que em dois minutos a quantidade adicionada de farinha de banana verde aglomerada supera a tensão superficial em relação à água e depois de 5 minutos estava completamente submergida, o que não ocorreu com a farinha de banana verde sem aglomerar que ainda aos cinco minutos estava tentando romper a tensão superficial da água, esse fenômeno de diminuição do tempo de instantaneização, ocorre devido ao aumento de tamanho de partículas decorrente da aglomeração, donde a molhabilidade ou penetração do líquido para o interior da estrutura porosa da partícula produzida por capilaridade é muito mais rápida para pós aglomerados (HOGKAMP; SCHUBERT, 2003; SCHUBERT 1993).

A figura 5.14, mostra as fotografias obtidas a partir da edição do vídeo realizado no processo de instantaneização em água da farinha de banana verde antes e depois do processo de aglomeração.

Observa-se que na farinha não aglomerada, as partículas apresentam uma tendência de formar blocos de pó que resistem à penetração da água e posterior dispersão no líquido, a coesividade é notável e confere o fato dessas partículas serem mais difíceis de fluidizar e por tanto serem classificadas no grupo C de Geldart. Esse comportamento não acontece com a farinha aglomerada, que apresenta uma maior dispersabilidade quando adicionada na água, as partículas possuem uma maior fluidez ao serem de maior tamanho, que facilita o manuseio e posterior capacidade de reconstituição rápida quando misturados com água.

Resultados similares são encontrados na literatura. Dacanal (2009) trabalhou com polpa de acerola em pó, aglomerada em leito fluidizado pulsado cônico, e mostrou que para partículas com diâmetros ao redor de 70 μm o tempo de instantaneização foi de 17 segundos, porém, partículas com diâmetros próximos a

120 μm o tempo de instantaneização foi de 4 s, uma diferença de 13 s, concluindo que após o processo de aglomeração as partículas apresentaram uma melhora significativa no tempo de instantaneização. Kyaw e Hogeekamp (1999) encontraram que incremento no tamanho de partículas de cacau em pó decorre em um decréscimo do tempo de instantaneização, mas que esse tempo pode ser afetado devido à presença de finos junto com as partículas de maior tamanho.

Figura 5.14- Tempo de instantaneização de farinha de banana verde sem aglomerar e aglomerada.

O tempo total que levou para a farinha de banana verde sem aglomerar se misturar com a água foi de 10 minutos, o dobro do que a farinha aglomerada levou

para atingir a dispersão no mesmo líquido nas mesmas condições, isto devido ao incremento do tamanho de partícula.

5.5.11 Análise de micrografia por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

São apresentadas na Figura 5.15 micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de farinha de banana verde sem aglomerar e depois de submetidas ao processo de aglomeração. Análise microscópica fornece uma visão mais profunda das partículas estudadas, é uma ferramenta que possibilita o conhecimento dos grânulos de amido presentes na farinha de banana verde de um modo mais qualitativo, levando em conta que este trabalho visa manter seu conteúdo e sua estrutura com a finalidade de obter um alimento funcional.

Dessa forma, com as micrografias obtidas as características morfológicas e de superfície dos grânulos de amido presentes na composição da farinha antes de ser submetida ao processo de aglomeração foram observadas, bem como a sua estrutura e mudanças decorrentes após o processo.

Farinha sem aglomerar

(a)

Farinha Aglomerada

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

Figura 5.15- Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura de farinha de banana verde sem aglomerar (a), (c), (e), (g), e (i), e aglomerada (b), (d), (f), (h), e (j).

De acordo com as imagens, os grânulos de amido apresentam uma distinta morfologia e tamanho, alguns mais alongados e achatados especialmente aqueles que são de maior tamanho, e os menores são um pouco mais arredondados. Estes resultados são similares aos obtidos por Bezerra *et al.*(2013), Izidoro *et al.* (2007) e Lii *et al.* (1982).

Nas micrografias da farinha de banana verde sem aglomerar são observados os grânulos de amido isolados, devido que, são partículas com menor tamanho, enquanto que para a farinha após o processo de aglomeração, esses grânulos se encontram juntos uns aos outros, Figura 5.15 (f), (h), e (j), devido à solução de agente ligante de alginato de sódio, que confere o recobrimento das partículas e seu aumento de tamanho. Ainda que as partículas estejam juntas e os grânulos de amido aparecem recobertos, a sua morfologia e integridade após o processo foram preservados, sendo um resultado satisfatório para a finalidade deste trabalho.

6 CONCLUSÕES

O processo de aglomeração de partículas em leito fluidizado pulsado operado às condições e parâmetros estabelecidos neste trabalho, não influenciaram na estrutura química da farinha de banana verde, conservando o conteúdo de amido resistente no produto final. Deste modo, foi possível obter um produto aglomerado que sofreu poucas variações do conteúdo de amido resistente desde o fruto até o produto aglomerado final, que representa uma excelente fonte de amido resistente para ser usado como alimento funcional para ajudar a melhorar os índices glicêmicos no sangue quando ingerido, além de possuir um alto grau de instantaneização e dispersão em líquidos devido ao incremento de tamanho de partícula.

A farinha de banana verde obtida depois da secagem e moagem apresenta um comportamento coesivo, com baixa fluidez e resultados obtidos dos parâmetros medidos de fluidez, densidade, tamanho, forma, e micrografias das partículas antes e depois de aglomeradas, foram coerentes com as características esperadas para um produto aglomerado, sendo que para a farinha de banana verde aglomerada, houve um aumento do tamanho das partículas com mudanças estruturais (mais rugosas e alongadas) com elevada porosidade e esfericidade, que permitem uma fácil solubilização em água como foi conferido com o decréscimo do tempo de instantaneização. Portanto o processo de aglomeração apresenta vantagens para particulados que possuem baixa fluidez e baixa solubilidade em água, atribuindo melhores propriedades que favorecem o manuseio, transporte e dispersão.

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da farinha de banana verde proporcionam um adequado análise qualitativo dos grânulos de amido presentes na farinha de banana verde antes e após o processo, conferindo que não houve danos estruturais nos mesmos e ainda na farinha aglomerada estes se encontram recobertos pela solução ligante conservando suas características originais permanecendo aglomeradas. Desta forma, o processo de aglomeração em leito fluidizado pulsado contribuiu para a obtenção de uma farinha de banana verde de fácil instantaneização em água e conservando o alto conteúdo de amido resistente, alcançando o objetivo deste trabalho.

CONTINUIDADE DO TRABALHO

- Estudo do comportamento fluidodinâmico no leito fluidizado pulsado com variações dos parâmetros de processo de aglomeração de partículas com o intuito de obter uma melhora no processo para o produto de farinha de banana verde.
- Análises térmicas na farinha de banana verde antes e depois do processo de aglomeração pelo método DSC podem ser realizadas para conhecer a temperatura e entalpia de gelatinização do amido presente na farinha, que permitiram conferir se o amido não sofreu alterações e continua conservando-se após o processamento. As curvas de entalpia podem ser comparadas com dados existentes na literatura.
- Estudo da secagem usando leito fluidizado pulsado para a obtenção de farinha de banana verde com alto conteúdo de amido resistente que preserve sua qualidade como alimento funcional, comparando com o processo e produto obtido por Tribess (2009).
- Realizar preparações de alimentos que incluam a farinha de banana verde aglomerada com alto conteúdo de amido resistente, aplicando análise sensorial para obter a resposta de aceitação por parte do consumidor.

7 BIBLIOGRAFIA¹

ABDULLAH, E. C.; GELDART, D. The use of bulk density measurements as flowability. *Powder Technology*, v.102, p.151-165, 1999.

ALMEIDA-PRIETO, S.; BLANCO-MÉNDEZ, J.; OTERO-ESPINAR, F, J. Microscopic image analysis techniques for the morphological characterization of pharmaceutical particles: Influence of the software, and the factor algorithms used in the shape factor estimation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, v. 67, p. 766-776, 2007.

AMBROSIO-UGRI, M. C. B.; TARANTO, O. P. Drying in the rotating-pulsed fluidized bed. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.24, n.01, p.95-100, 2007.

ALVIM, D. I. *Produção e caracterização de micropartículas obtidas por spray drying e coacervação complexa e seu uso para alimentação de larvas de peixes*. 2005. Tese (Doutorado em Alimentos e Nutrição)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2005.

ANJO, D. F. C. Alimentos funcionais em angiologia e cirurgia vascular. *Journal Vascular Brasileiro*, v.3, n.2, p.147-154, 2004.

A.O.A.C. Association of Official Analytical Chemists. *Oficial Methods of Analysis of AOAC Internacional*, Gaithersburg, Maryland., 1995.

ASP, N. G. Resistant starch. Proceedings from the second plenary meeting of EURESTA: European Flair Concerned Action 11, on physiological implications of the consumption of resistant starch in man. Creta, 29/05 a 02/06/1991. *European Journal of Clinical Nutrition*, v.46, supl.2: S1-148, 1992.

BEDDOW, J. K.; VETTER, A. F.; SISSOPN, K. Powder Metallurgy review, Part I: Particle shape analysis. *Powder Metallurgy International*, v. 8, n. 3, p. 107-109, 1976.

BELLO-PEREZ, L. A.; DE FRANCISCO, A.; AGAMA-ACEVEDO, E.; GUTIERREZ-MERAZ, F.; GARCIA-SUAREZ, F, J, L. Morphological and molecular studies of banana starch. *Food Science and Technology International*, v. 11, p. 367-372, 2005.

BILIADERIS, C. G. The structure and interactions of starch with food constituents. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, v. 69, p. 60-78, 1991.

BJÖRCK, I. Starch: Nutritional Aspects. In: ELIASSON, A-C. *Carbohydrates in Food*. Boca Raton. CRC Press 2006. <http://www.crcnetbase.com>. Acesso em 28 Set. 2012.

BORGES, A. L.; SOUZA, S. L. *O cultivo da bananeira*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2004. p. 279. Disponível em www.embrapa.br. Acesso em 26 Sept. 2012.

¹ De acordo com as normas ABNT NBR 6023 (2002), com adaptações EPUSP- Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses, 1030. 2006. Disponível em www.poli.usp.br.

BORWANKAR, R. P. Food texture and rheology: a tutorial Review. *Journal of Food Engineering*, v.16, p.1-16, 1992.

BOUWMAN, A. M.; BOSMA, J. C.; VONK, P.; WESSELINGH, J. (HANS). A.; FRIJLINK, H. W. Which shape factor(s) best describe granules?. *Powder Technology*, v. 146, p. 66-72, 2004.

CARR, R. L. Classifying flow properties of solids. *Chemical Engineering Journal*, v. 72, p. 69-72, 1965.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. Ecofisiologia de fruteiras tropicais: abacaxizeiro, maracujazeiro, mangueira, bananeira e cacaueiro. In: Nobel S. A. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 1997.

DACANAL, G. C. *Estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leito Fluidizado*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2005.

DACANAL, G. C. *Aglomeração de polpa de acerola e proteína isolada de soja em pó em leito fluidizado cônico e pulsado*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2009.

DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Experimental study and optimization of the agglomeration of acerola powder in a conical fluid bed. *Powder Technology*, v. 188, p. 187-194, 2009.

DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Selection of operational parameters for the production of instant soy protein isolate by pulsed fluid bed agglomeration. *Powder Technology*, v. 203, p. 565-573, 2010.

DEWETTINCK, K.; DEROO, L; MESSENS, W; HUYGHEBAERT, A. Agglomeration tendency during top-spray fluidized bed coating with gums. *Food Science and Technology*, v. 31, p. 576-584, 1998.

DIPLOCK, A. T.; AGGETT, P. J.; ASHWELL, M.; BORNET, F.; FERN, E. B.; ROBERFROID, M. B. Scientific concepts of functional foods in Europe: consensus document. *British Journal of Nutrition*, v.81, p.S1–S27, 1999.

DITCHFIELD, C. *Estudo do processamento contínuo do purê de banana (Musa cavendishii Lamb.)*. 2004. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DICHFIELD, C.; TADINI, C. C.; Acompanhamento do processo de amadurecimento da banana nanica (Musa cavendishii Lamb.). In: XVIII Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2002. Porto Alegre. Disponível em <http://sites.poli.usp.br/pqi/lea/docs/cbcta2002h.pdf> Acesso em 04 Jun. 2012.

DONOVAN, J. W. Phase transitions of the starch-water systems. *Biopolymers*, v.18, p.263, 1979.

EERLINGEN, R. C.; DELCOUR. Formation, analysis, structure and properties of type III enzyme resistant starch. *Journal of Cereal Science*, v. 22, p. 129-138, 1995.

EMBRAPA. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Banana*. Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia40/AG01/Abertura.html>. Acesso em 01 Jul. 2012.

ENGLYST, N. K.; ENGLYST, N. H.; HUDSON, J. G.; COLE, J. T.; CUMMINGS, H. J. Rapidly available glucose in foods: an in vitro measurement that reflects the glycemic response. *The American Journal of Clinical Nutrition*, v. 69, p. 448-454, 1999.

ENGLYST, H. N.; CUMMINGS, J. H. Digestion of the carbohydrates of banana (*Musa paradisiacal sapientum*) in the human small intestine. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 44, p. 42-50, 1986.

ENGLYST, H. N.; KINGMAN, S. M.; CUMMINGS, J. H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, v. 46, n.2, p. 33-50, 1992.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *FAOSTAT statistic database*, 2010. Disponível em <http://faostat.fao.org>. Acesso em 04 Jun. 2012.

FARR, D. R. Functional Foods. *Cancer Letters*, v.114, p.59-63, 1997.

FORNY, L.; MARABI, A.; PALZER, S. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. *Powder Technology*, v. 206, p. 72-78, 2011.

FUENTES-ZARAGOZA, E.; RIQUELME-NAVARRETE, M.; SANCHEZ-ZAPATA, E.; PÉREZ-ALVAREZ, J. Resistant starch as functional ingredient: a review. *Food Research International*, v.43, p.931-942, 2010.

FREITAS, J. M. C. *Dietas ricas em amido resistente de bananas verdes (Musa AAA-Nanicão e Musa AAB-Terra) promovem alterações na função intestinal, no metabolismo lipídico e glicídico e na microbiota intestinal*. 2000. Tese (Doutorado em Ciencia da Nutrição)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R. Drying in a pulsed-fluid bed with relocated gas stream. *Drying Technology*, v.14, n.5, p.1121–1172, 1996.

GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R.; KUDRA, T. Drying of powdery materials in a pulsed fluid bed dryer. *Drying Technology*, v.17, n.(7,8), p.1523-1532, 1999.

GELDART. Types of Gas Fluidization. *Powder Tecnology*, v. 7, p. 285-292, 1973.

GOH, C. H.; HENG, S. P. W.; CHAN, L. W. Alginates as a useful natural polymer for microencapsulation and therapeutic applications. *Carbohydrate Polymers*, v. 88, p. 1-12, 2012.

GONÇALVES, D. V. *Interplântio de variedades de bananeira como prática de controle de sigatoka*. 2006. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Genética e Melhoramento de Plantas)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Jaboticabal/SP, 2006.

GUYTON, A. C.; HALL, J. E. Textbook of Medical Physiology. Philadelphia: W. B. Saunders Company, p. 973, 2000.

HENTSCHEL, M. L.; PAGE, N. W. Selection of descriptors for particle shape characterization. *Particle & Particle Systems Characterization*, v.20, n. 1, p. 25-38, 2003.

HOGKAMP, S.; SCHUBERT, H. Rehydration of food powders. *Food Science and Technology International*, v.9, n.3, p.223-235, 2003.

HOLDICH, R. G. Particle characterization. In HOLDICH, R. G. Fundamentals of Particle Technology. Midland information technology and publishing, United Kingdom, 2002, http://www.particles.org.uk/particle_technology_book/particle_book.htm, acesso 01 Nov 2012.

HONGSHENG, L.; FENGWEI, X.; LONG, Y.; LING, C.; LIN, L. Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in Polymer Science*, v.34, p.1348-1368, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção agrícola municipal período 1990- 2010 e Lavoura permanente em Grandes Regiões*. Disponível em: <http://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PA9&t=lavoura-permanente-quantidade-produzida>. Acesso em: 08 Jun. 2012.

IGATHINATHANE, C.; PORDESIMO, L. O.; COLUMBUS, E. P.; BATCHELOR, W. D.; METHUKU, S. R. Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 63, p. 168-182, 2008.

ILELEJI, K. E.; ZHOU, B. The angle of repose of bulk corn stover particles. *Powder Technology*, v. 187, p. 110-118, 2008.

IVESON, S. M.; LITSTER, J.D.; HAPGOOD, K.; ENNIS, B.J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review. *Powder Technology*, v. 117, n. 1-2, p. 3-39, 2001.

IZIDORO, D. R.; SIERAKOWSKI, M-R.; HAMINIUK, I. C. W.; SOUZA, F. C.; SCHEER, P. A. Physical and chemical properties of ultrasonically, spray-dried green banana (*Musa cavendish*) starch. *Journal of Food Engineering*, v. 104, p. 639-648, 2011.

JAY-LIN, J. Starch: structure and properties. In: TOMASIK, P. *Chemical and functional properties of food saccharides*. Boca Raton: CRC Press, 2003. <http://www.crcnetbase.com>. Acesso em 01 Ago. 2012.

JENSEN, J. D. Advances in Agglomerating, Instantizing, and Spray Drying. *Food Technology*, v.29, n.6, p.60-72, 1975.

JIMENEZ, T.; TURCHIULI, C.; DUMOULIN, E. Particles agglomeration in a conical fluidized bed in relation with air temperature profiles. *Chemical Engineering Science*, v.61, p.5954-5961, 2006.

JINAPONG, N.; SUPHANTHARIKA, M.; JAMNONG, P. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, v. 84, p. 194-205, 2008.

JUAREZ-GARCIA, E.; AGAMA-ACEVEDO, E.; SAYAGO-AYERDI, S. G.; RODRIGUEZAMBRIZ, S.L.; BELLO-PEREZ, L. A. Composition, digestibility and application in breadmaking of banana flour. *Plant Foods for Human Nutrition*, v.61, n.3, p. 131-137, 2006.

KAYISU, K.; HOOD, F. L.; VANSOEST, J. P. Characterization of starch and fiber of Banana fruit. *Food Science*, v.46, n. 6, p.1885-1890, 1981.

KYAW, H. P.; HOGEKAMP, S. Wetting behavior of instantized cocoa beverage powders. *International Journal of Food Science and Technology*, v.34, p.335-342, 1999.

KAYA, E.; KUMAR, S. R.; HOGG, R. Particle shape characterization using an image analysis technique, *In: Changing Scopes in Mineral Processing*. Rotterdam Balkema, p. 47-52, 1996.

KIMURA, Y.; TERAUCHI, M. Process for producing granular cocoa. *Food Science and Technology*, Abstracts, Patent, US6007857, 1999.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. Drying in pulsed fluid beds. In: Taylor & Francis Group. *Advanced Drying Technologies*. Second edition, Boca Raton: CRC Press, 2009. <http://www.crcnetbase.com>. Acesso em 20 Nov. 2012.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*. 2 Ed. Butterworth-Heinemann, p. 491, 1991.

LAJOLO, F. M.; MENEZES, E. W. Carbohidratos en alimentos regionales Iberoamericanos. São Paulo: Universidade de São Paulo, p.646, 2006.

LANGKILDE, A. M.; CHAMP, M.; ANDERSON, H. Effects of high-resistant-starch banana flour (RS2) on in vitro fermentation and the small-bowel excretion of energy, nutrients, and sterols: an ileostomy study 1-3. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 75, p.104-111, 2002.

LAVOIE, F.; CARTILIER, L.; THIBERT, R. New methods characterizing avalanche behavior to determine powder flow. *Pharmaceutical Research*, v.19, n.6, p. 887-893, 2002.

LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. 3ª Ed. Tradução de Verônica M. A. Calado, p. 563, 2000, São Paulo: Editora Blücher,.

LII, C.-Y.; CHANG, S.-M.; YOUNG, Y.-L. Investigation of the physical and chemical properties of bananas starches. *Journal of Food Science*, v. 47, p.1493-1497, 1982.

MACCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5nd Edition, p. 1130, 1993, New York, Ed McGraw-Hill Inc.

MAROULIS, Z. B.; SHAH, K. K.; SARAVACOS, G. D. Thermal conductivity of gelatinized starches. *Journal of Food Science*, v.56, n.3, p.773-776, 1991.

MAZZOLI, A.; FAVONI, O. Particle size distribution and morphological evaluation of airborne dust particles of diverse Woods by Scanning Electron Microscopy and image processing program. *Powder Technology*, v. 225, p. 65-71, 2012.

MEDINA, M. V.; PEREIRA, C. M. E. Pós-colheita. In: BORGES, L. A.; SOUZA, S. L. *O cultivo da Bananeira*. Cruz das Almas-BA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, Mandioca e Fruticultura, 2004. <http://www.cnpmf.embrapa.br>. Acesso em 14 Jun. 2012

MCCLEARY, B. V.; MCNALLY, M.; ROSSITER, P. Measurement of resistant starch by enzymatic digestion in starch selected plant materials: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, v. 85, p. 1103-1111, 2002.

MCCLEARY, B. V.; MONAGHAN, D. A. Measurement of resistant starch. *Journal of AOAC International*, v. 85, p. 665-675, 2002.

MENEZES, E. W.; MELO, A. T.; LIMA, G. H.; LAJOLO, F. M. Measurement of carbohydrate components and their impact on energy value of foods. *Journal. Of Food Composition. and Analysis*, v. 17, p. 331-338, 2004.

MOTA, R. V.; LAJOLO, F. M.; CIACCO, C.; CORDENUNSI, B. R. Composition and functional properties of banana flour from different varieties. *Starch/Stärke*, v.52, n2-3, p.63-68, 2000.

MOHSENIN, N, N. Physical properties of plant and animal material. *Structure, Physical characteristics and breach science publishes*, p. 73-75, 1970.

MORT, P. R. Scale-up of wet granulation processes: science not art. *Powder Technology*, v.150, n.2, p.86-103, 2005.

MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*, Third Edition. Boca Raton. CRC Press 2006. <http://www.crcnetbase.com>. Acesso em 03 Dez. 2012.

NELSON, C. S.; PLOETZ, R. C.; KEPLER, K. A. Musa species (banana and plantain) Musaceae (banana family). In: Species Profiles for Pacific Island Agroforestry, v. 2.2, 2006. Disponível em: www.traditionaltree.org. Acesso em 22 Fev. 2012.

NITZ, M.; TARANTO, O. P. Drying of beans in a pulsed fluid bed dryer: Drying kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization. *Journal of Food Engineering*, v.80, p.249-256, 2007.

NUGENT, A. P. Health properties of resistant starch. *British Nutrition Foundation*. V.30, p. 27-54, 2005.

PALZER, S. Influence of material properties on the agglomeration of water-soluble amorphous particles. *Powder Technology*, v.189, p.318-325, 2009.

PASIN, B. L.; AZÓN, C. G.; GARRIGA, A. M. Microencapsulación con alginato en alimentos. Técnicas y aplicaciones. *Revista Venezolana de Ciencia de Alimentos*, v. 3, n. 1, p. 130-151, 2012.

PEREIRA, K. D. Amido resistente, a última geração no controle de energia e digestão saudável. *Ciência e Tecnologia Alimentaria*, v. 27, p. 88-92, 2007.

POLLONIO, R. M.A. Alimentos funcionais: as recentes tendências e os aspectos de segurança envolvidos no consumo. *Higiene Alimentar*, v. 14, p. 26-31, 2000.

POTHAKAMURY, U. R.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Fundamental aspects of controlled release in foods. *Trends in Food Science & Technology*, v. 6, p. 397-406, 1995.

PRACHAYAWARAKORN, S.; TIA, W.; POOPAIBOON, K.; SOPINRONNARIT, S. Comparison of performances of pulsed and conventional fluidized bed dryers. *Journal of Stored Products Research*, v.41, n.5, p.479-497, 2005.

REYES, A.; CAMPOS, C.; VEGA, R. Drying of turnip seeds with microwaves in fixed and pulsed fluidized beds. *Drying Technology*, v.24, p.1469–1480, 2006.

REYES. A.; MOYANO. P.; PAZ. J. Et. Drying of Potato Slices in a Pulsed Fluidized Bed. *Drying Technology: An International Journal*, v. 25, n. 4, p. 581-590, 2007.

RIBEIRO, D. A. *Produção de banana 'Nanicão' (Musa SP. AAA) em clima Cwa*. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração Fitotecnia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RUSS, J. C. The image Processing Handbook, 4 ed., CRC Press, USA, 2002.

SAAD, M.; SADOUDI, A.; RONDET, E.; CUQ, B. Morphological characterization of wheat powders, how to characterize the shape of particles?. *Journal of Food Engineering*, v.102, p. 293-301, 2011.

SAJILATA, M. G.; SINGHAL, R. S.; KULKARNI, P. R. Resistant Starch-A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v.5, p. 1-17, 2006.

SCHUBERT, H. Food particle technology. Part I: properties of particles and particulate food systems. *Journal of Food Engineering*, v.6, p.1-32, 1987.

SCHUBERT, H. Instantization of powered food products. *International Chemical Engineering*, v. 33, n. 1, p. 28-45, 1993.

SCHUCHMANN, H. Production of instant foods by jet agglomeration. *Food Control*, v.6, n.2, p.95-100, 1995.

SILVA, J. S. G. *Respostas biométricas, ecofisiológicas e nutricionais em genótipos diploides de bananeira (Musa spp) submetidos à salinidade*. 2007. Tese (Doutorado em Botânica, área de concentração em Taxonomia, Fisiologia e Ecologia dos Ecossistemas do Nordeste) Fisiologia Vegetal e Biotecnologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife/PE, 2007.

SMITH, M. A. The synthesis of the starch granule. Plant Carbohydrate biochemistry, edited by Bryant, J.A; Burrell, M. M and Kruger, N, J. *BIOS Scientific Publishers Ltd, Oxford*, 1999.

SINGH, J.; DARTOIS, A.; KAUR, L. Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends in Food Science & technology*, v. 21, p. 168-180, 2010.

SOUZA, D. O. C.; MENEGALLI, F. C. Image analysis: Statistical study of particle size distribution and shape characterization. *Powder Technology*, v. 214, p. 57-63, 2011.

SOUZA, D. O. C. *Modelagem e simulação do processo de granulação de alimentos em leite fluidizado*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2012.

STEFFE, J, F. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. East Lansing: Michigan State University, 1996. 418 p. Edited by Freeman Press.

TARDOS, G. I.; KHAN, M. I.; MORT, P. R. Critical parameters and limiting conditions in binder granulation of fine powders. *Powder Technology*, v. 94, p. 245-258, 1997.

TESTER, R; KARKALAS, J; QI. Starch - composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, v. 39, p. 151-165, 2004.

TEUNOU, E; FITZPATRICK, J, J; SYNNOTT. Characterisation of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, v. 39, p. 31-37, 1999.

TEUNOU, E.; PONCELET, D. Fluid-Bed Coating. In: ONWULATA, C. *Encapsulated and Powdered Foods*. Boca Raton: CRC Press, 2005. <http://www.crcnetbase.com>. Acesso em 03 Ago. 2012.

TURCHIULI, C.; ELOUALIA, Z.; MANSOURI, N. E.; DUMOULIN, E. Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties. *Powder Technology*, v. 157, n. 1-3, p. 168-175, 2005.

TURCHIULI, C.; SMAIL, R.; DUMOULIN, E. Fluidized bed agglomeration of skim milk powder: Analysis of sampling for the follow-up of agglomerate growth. *Powder Technology*, v.238, p.161-168, 2012.

TRIBESS, T. B. *Processo de obtenção de farinha de banana verde com alto conteúdo de amido resistente*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TRIBESS, T. B.; HERNANDEZ-URIBE, J. P.; MENDEZ-MONTEALVO, M. G.; MENEZES, E. W.; BELLO-PEREZ, L. A.; TADINI, C. C. Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa Cavendishii*) produced at different drying conditions. *Food Science and Technology*, v. 42, p. 1022-1025, 2009.

VISSOTTO, F. Z.; JORGE, L. C.; MAKITA, G. T.; RODRIGUES, M. I.; MENEGALLI, F. C. Influence of the process parameters and sugar granulometry on cocoa beverage powder steam agglomeration. *Journal of Food Engineering*, v.97, p.283-291, 2010.

WANG, W.; ZHANG, J.; YANG, S.; ZHANG, H.; YANG, H.; YUE, G. Experimental study on the angle of repose of pulverized coal. *Particuology*, v. 8, p. 482-485, 2010.

WONG, A. C-Y. Use of angle of repose and bulk densities for powder characterization and the prediction of minimum fluidization and minimum bubbling velocities. *Chemical Engineering Science*, v. 57, p. 2635-2640, 2002.

YANG, W-C. Particle characterization and Dynamics. In: YANG, W-C. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. Boca Raton. CRC Press 2003. <http://www.crcnetbase.com>. Acesso em 10 Out. 2012.

ZENEBON, O.; PASCUET, N. S. Métodos físico-químicos para análises de alimentos do Instituto Adolfo Lutz. 4a. ed, Brasília: IAL - Instituto Adolfo Lutz, p, 1018, 2005.

ZHANG, P; WHISTLER, R. L.; BEMILLER, J. N.; HAMAKER, B. R. Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility-a review. *Carbohydrate Polymers*, v. 59, p. 443-458, 2005.

ZHANG, D.; KOKSAL, M. Heat transfer in a pulsed bubbling fluidized bed. *Powder Technology*, v.168, p.21-31, 2006.